

A APLICAÇÃO DE *LEAN SIX SIGMA* NA OTIMIZAÇÃO DAS OPERAÇÕES DE PERFURAÇÃO DE POÇOS

Patrícia Rodrigues Balla

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Petróleo da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Orientadores: Virgílio José Martins Ferreira Filho, D.Sc.
Daniel Michilini Carocha, Bel. Eng.

Rio de Janeiro,
Agosto de 2014

A APLICAÇÃO DE *LEAN SIX SIGMA* NA OTIMIZAÇÃO DAS OPERAÇÕES DE PERFURAÇÃO DE POÇOS

Patrícia Rodrigues Balla

PROJETO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO DE
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO.

Examinada por:

Prof. Virgílio José Martins Ferreira Filho, D.Sc

Daniel Michilini Carocha, Bel. Eng.

Prof. Paulo Couto, Dr. Eng.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
AGOSTO DE 2014

Balla, Patrícia Rodrigues

A Aplicação de *Lean Six Sigma* na Otimização de Operações de Perfuração de Poços – Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2014.

XI 128 p.: il.; 29,7 cm

Orientadores: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Daniel Michilini Carocha

Projeto Graduação – UFRJ/Escola Politécnica/
Curso de Engenharia de Petróleo, 2014.

Referências Bibliográficas: p.126-128.

1. Aplicação de Lean Six Sigma 2. Operações de Perfuração de Poços. 3. Otimização de Operações. 4. Redução de Custos Operacionais. 5. Estudos de Caso. I. Ferreira Filho, Virgílio José II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Petróleo. III. A Aplicação de Lean Six Sigma na Otimização de Operações de Perfuração de Poços.

Agradecimentos

Agradeço a Agência Nacional de Petróleo – ANP a qual, através do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor do Petróleo e Gás Natural – PRH-21, obtive apoio financeiro para minha formação acadêmica e para a realização deste trabalho.

Ao professor Virgílio José Martins Ferreira Filho, pela orientação e conhecimentos transmitidos durante a realização do curso de Engenharia de Petróleo e por dar as diretrizes necessárias à minha pesquisa.

Ao Daniel Michelin Carocha, por me fornecer treinamento em *Lean Six Sigma*, dados da indústria e por todo o suporte técnico e orientação fundamentais para minha pesquisa.

Ao Cláudio Azevedo e Milton Takada, pelos conhecimentos técnicos de perfuração na indústria e disponibilidade em ajudar sempre que solicitados.

Aos professores Paulo Couto e Ilson Paranhos Pasqualino, pela disponibilidade em ajudar, pelos ensinamentos e por toda contribuição durante minha formação acadêmica.

À minha família, especialmente meus pais, irmão e tia, por todo o amor e apoio incondicionais proporcionados em minhas decisões e por todos os recursos e esforços para minha formação acadêmica, profissional e pessoal.

Aos meus amigos, por me proporcionarem as melhores lembranças que terei da minha vida acadêmica na UFRJ, especialmente: Thiago Sauma, Garbriel Lengruber, Alexandre Michels e Vinícius Veleda, pela certeza de amizades para a vida toda.

Patrícia Rodrigues Balla

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de *Engenheiro de Petróleo*.

A APLICAÇÃO DE *LEAN SIX SIGMA* NA OTIMIZAÇÃO DAS OPERAÇÕES DE PERFURAÇÃO DE POÇOS

Patrícia Rodrigues Balla

Agosto/2014

Orientadores: Virgílio José Martins Ferreira Filho, Ds.C.

Daniel Michilini Carocha, Bel. Eng.

Curso: Engenharia de Petróleo

Com a demanda crescente por petróleo no mundo e recursos cada vez mais escassos e de difícil extração, as operações de perfuração de poços estão mais complexas e com maiores custos. Sendo o preço do petróleo determinado pelas variações de oferta e demanda do mercado internacional, a margem de lucro das empresas operadoras é determinada pelos custos operacionais. Sendo assim, investir em técnicas de gestão capazes em otimizar o processo produtivo e reduzir custos, revela-se uma necessidade atual. Neste contexto, a metodologia *Lean Six Sigma* se revela uma importante ferramenta capaz de encontrar soluções simples e eficientes para os problemas encontrados nas operações, como desperdício de tempo e falta de performance. Este estudo trata especificamente da aplicação da metodologia *Lean Six Sigma* na perfuração de poços, utilizando-se de estudos de casos para comprovar a eficácia e aplicabilidade do método. Os estudos de caso tiveram suas análises feitas com o software *SPC XL* do *Microsoft Excel* e abordam a questão de tempos não produtivos e tempos perdidos presentes em uma operação e retratam a realidade atual da perfuração de petróleo brasileira.

Palavras chave: Lean Six Sigma, perfuração de poços, otimização.

Abstract of the Graduation Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Petroleum Engineer.

THE APPLICATION OF LEAN SIX SIGMA TECHNIQUES IN THE OPTIMIZATION OF DRILLING OPERATIONS

Patrícia Rodrigues Balla

August/2014

Orientadores: Virgílio José Martins Ferreira Filho, Ds.C.

Daniel Michilini Carocha, Bel. Eng.

Curso: Engenharia de Petróleo

With the increasing demand for oil in the world and increasingly scarce resources and difficult extraction, the drilling of wells are more complex and with higher costs. As the price of oil determined by variations in supply and demand of international market, the profit margin of the operators companies is determined by operational costs. Thus, investing in management techniques capable of optimizing the production process and reduce costs, proves to be a current need. In this context, the Lean Six Sigma turns an important tool to find a simple and effective solution to the problems encountered in operations such as waste of time and lack of performance. This study specifically addresses the application of Lean Six Sigma in drilling wells, using case studies to demonstrate the effectiveness and applicability of this method. The case studies have made their analyzes with the *SPC XL software of Microsoft Excel*, and address the issue of non-productive time lost and downtime in an operation and reflect the current reality of Brazilian oil drilling.

Key words: Lean Six Sigma, drilling, optimization.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivos	5
1.2	Metodologia	6
1.3	Estrutura do Trabalho	7
2	LEAN SIX SIGMA	8
2.1	Lean Manufacturing	8
2.1.1	Breve Histórico	8
2.1.2	Principais Conceitos	10
2.1.3	Principais Ferramentas	20
2.2	Six Sigma	23
2.2.1	Breve Histórico	23
2.2.2	Principais Conceitos	24
2.2.3	Principais Ferramentas	29
2.3	Lean Six Sigma	31
2.3.1	Gestão de Projetos Lean Six Sigma	32
2.3.2	Principais Ferramentas Comuns entre as Metodologias	33
3	PERFURAÇÃO DE POÇOS	36
3.1	Principais Equipamentos de uma Sonda de Perfuração	37
3.1.1	Sistema de Sustentação de Cargas.....	37
3.1.2	Sistema de Movimentação de Cargas	38
3.1.3	Sistema de Rotação	39
3.1.4	Sistema de Circulação de Fluidos.....	40
3.1.5	Sistema de Monitoramento	40
3.1.6	Sistema de Segurança	41
3.1.7	Sistema de Geração de Energia.....	42
3.2	Coluna de Perfuração	42
3.3	Construção de Poço	50
3.4	Fases de um Poço	52
3.5	Operações de poço	54
3.5.1	Principais operações	55
3.5.2	Sequência operacional	59

4	LEAN SIX SIGMA NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO.....	62
4.1	Lean Six Sigma na perfuração de poços	63
4.2	Análise de dados	65
4.3	Custos da perfuração de poços	67
4.4	Tempos Perdidos.....	69
4.5	Projeto Lean Six Sigma na perfuração de poços	76
5	ESTUDOS DE CASO	80
5.1	1º Estudo de Caso: Tempos não produtivos	80
5.1.1	Contextualização	81
5.1.2	Fase Definir	82
5.1.3	Fase Medir	88
5.1.4	Fase Analisar.....	95
5.1.5	Fase Melhorar	101
5.1.6	Fase Controlar	107
5.2	2º Estudo de Caso: Tempos Perdidos	108
5.2.1	Contextualização	109
5.2.2	Fase Definir	109
5.2.3	Fase Medir	112
5.2.4	Fase Analisar.....	117
5.2.5	Fase Melhoria.....	122
5.2.6	Fase Controlar	129
6	CONCLUSÃO	131
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Produção e consumo de óleo por região.....	2
Figura 2.1: Princípio da redução de custos.	19
Figura 2.2: COPQ versus nível sigma.	25
Figura 2.3: Erros versus nível sigma.	26
Figura 3.1: Mastro de sonda de perfuração.	38
Figura 3.2: Catarina.	39
Figura 3.3: Top Drive.	40
Figura 3.4: Painel do sondador.	41
Figura 3.5: <i>Blowout Preventor</i>	42
Figura 3.6: <i>Drill Collars</i>	43
Figura 3.7: <i>Heavy Weight Drill Pipes</i>	44
Figura 3.8: <i>Drill Pipes</i>	45
Figura 3.9: Substitutos.	46
Figura 3.10: Estabilizador.	46
Figura 3.11: <i>Rotary Steerable System</i>	49
Figura 3.12: Brocas PDC, Tricônicas e de testemunho).	50
Figura 3.13: Janela operacional.	51
Figura 3.14: Esquema de poço com assentamento de sapatas.	54
Figura 4.1: Classificação dos tempos em uma operação de perfuração.	64
Figura 4.2: Realização de tampão de abandono e desvio de trajetória.	73
Figura 4.3: Mecanismo de prisão de coluna.	75
Figura 5.1: Esquemático dos poços da empresa estudada.	83
Figura 5.2: Diagrama IPO para processo de conexão de <i>drill pipes</i> usando RSS.	88
Figura 5.3: Mapa de processos para sequência operacional de conexão de drill pipes. ..	91
Figura 5.4: Mapa de processos de conexão de drill pipes com etapas de desperdício identificadas.	96
Figura 5.5: Painel do mud logging enviado pela sonda.	98
Figura 5.6: Diagrama espinha de peixe para desperdício anterior à conexão.	99
Figura 5.7: Diagrama espinha de peixe para desperdício posterior à conexão.	100
Figura 5.8: Modelagem hidráulica de tempo de estimado de limpeza de BHA.	102
Figura 5.9: Resultados do Teste-T e Teste-F.	107
Figura 5.10: Diagrama IPO para processo de redução de tempo perdido por falha de equipamentos de sonda.	112
Figura 5.11: Diagrama espinha de peixe para o gerador.	118
Figura 5.12: Diagrama espinha de peixe para a bomba de lama.	119
Figura 5.13: Diagrama espinha de peixe para o <i>Top Drive</i>	120
Figura 5.14: Diagrama espinha de peixe para o BOP.	121
Figura 5.15: Programa de manutenção como solução.	126
Figura 5.16: Teste-T e teste-F para comprovação das soluções implementadas.	129

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Escala Sigma.	28
Tabela 2.2: Ferramentas básicas nas fases DMAIC.	34
Tabela 4.1: Taxa média diária de aluguel de sonda por tipo de sonda.	68
Tabela 4.2: Custos médios por 35 dias de operação.	69
Tabela 4.3: As recomendações de um projeto <i>Lean Six Sigma</i> por fases.	79
Tabela 5.1: Equipamentos da sonda S1 com histórico de falhas.	116
Tabela 5.2: Ações para redução de falha de equipamentos.	123

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1: Distribuição normal, com e sem variação.	27
Gráfico 5.1: Gráfico Pareto de tempos de conexão por fase.	85
Gráfico 5.2: Run Chart da média dos tempos de conexão antes do projeto <i>Lean Six Sigma</i>	89
Gráfico 5.3: Histograma para os tempos médios de conexão antes do Projeto <i>Lean Six Sigma</i>	90
Gráfico 5.4: Histograma das médias após a implementação do projeto.	105
Gráfico 5.5: <i>Run Chart</i> para tempos de conexão após projeto <i>Lean Six Sigma</i>	106
Gráfico 5.6: Histograma tempos perdidos causados por falha de equipamentos.	113
Gráfico 5.7: Run Chart Tempos Perdidos por Falha de Equipamento de Sonda.	114
Gráfico 5.8: Gráfico Pareto para falha de equipamentos de sonda.	115
Gráfico 5.9: <i>Run Chart</i> para processo melhorado.	127
Gráfico 5.10: Histograma falha de equipamentos após projeto <i>Lean Six Sigma</i>	128

1 INTRODUÇÃO

O cenário atual do petróleo no mundo está sendo marcado por uma mudança de parâmetros que afeta todas as fases de sua cadeia produtiva, seus derivados e também a relação com seu mercado consumidor. Nos últimos tempos, a matriz energética mundial, completamente dependente da utilização do petróleo e do gás natural, vivencia uma diminuição evidente das reservas mais acessíveis, que marcaram o boom do petróleo no início do século XX, impulsionando a expansão vertiginosa da riqueza global ao longo dos últimos 65 anos.

No entanto, o planeta ainda está repleto de reservas petrolíferas ainda não exploradas, suficientes para abastecer a demanda mundial por muitos anos, porém estas são de difícil produção. Este petróleo de difícil exploração é caracterizado pela alta demanda por técnicas avançadas de tecnologia, o que implica em maiores custos de exploração, extração e refino.

Atualmente, as reservas provadas de petróleo no mundo, ou seja, aquelas que, com base na análise de dados geológicos e de engenharia, se estima recuperar comercialmente de reservatórios descobertos e avaliados com elevado grau de certeza, compreendem a aproximadamente 1,7 bilhões de barris. (EIA, 2013).

O consumo mundial de petróleo passou de 79,2 milhões de barris diários, em 2003, para 91,3 milhões de barris diários em 2013, representando assim, um aumento de 10.8% em dez anos (EIA, 2013). Com a ampliação acelerada das necessidades de petróleo da China e da Índia, e com o desenvolvimento dos países em geral, espera-se um aumento ainda mais acentuado da demanda de petróleo para os próximos anos. Como o petróleo é um bem finito, a velocidade de esgotamento em breve ultrapassará a velocidade com que

novas reservas possam ser descobertas. A figura 1.1 retrata a tendência de crescimento da produção versus a demanda de petróleo por região.

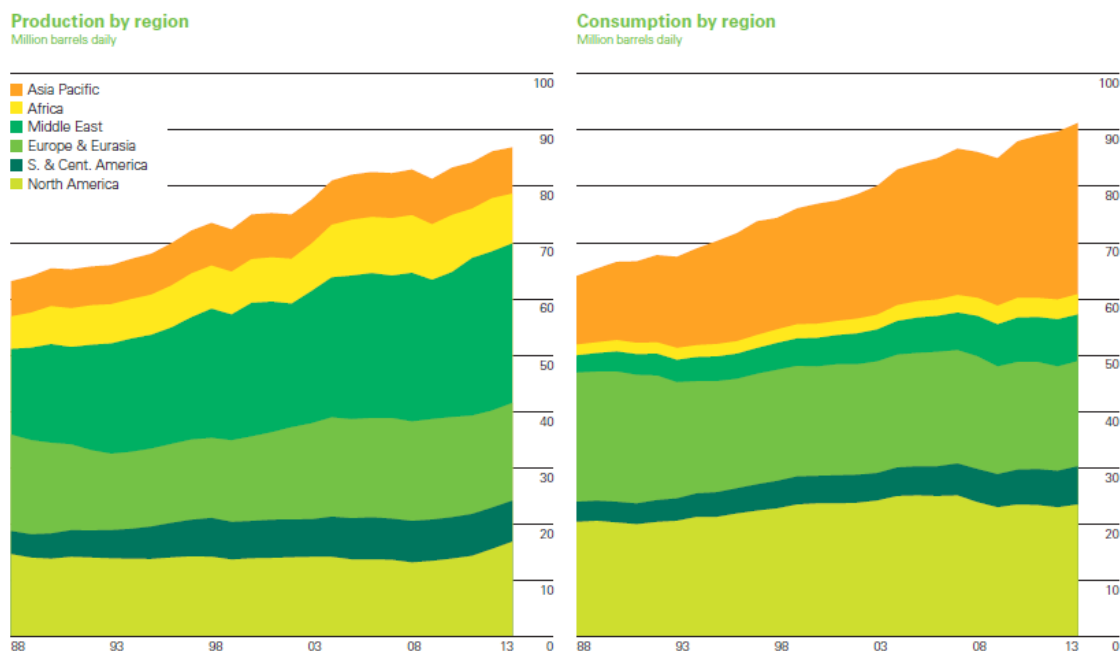


Figura 1.1: Produção e consumo de óleo por região.
(Fonte: BP Statistical Preview, 2013)

Considerando a atual quantidade de reservas provadas e o ritmo de consumo de hidrocarbonetos, alguns analistas estimam que o mundo irá precisar de cerca de 100 milhões de barris por dia de óleo até o final da década. Esse valor corresponde a aproximadamente 36.5 bilhões de barris por ano. Se as reservas provadas atuais correspondem a 1,7 bilhões de barris de óleo convencional e não convencional, então estima-se que as reservas atuais sejam suficientes para suprir a demanda mundial por 53.3 anos. (BP Statistical Preview, 2013). Deste total de reservas provadas, apenas uma parcela representa óleo de fácil recuperação, sendo a grande maioria composta de recursos não convencionais, como óleo de xisto, ou de águas profundas.

Isto ocorre devido à diferença nos tipos de reservatórios em que os hidrocarbonetos estão alocados, que vão desde localizações próximas à superfície em rocha porosa até

localizações em subsolo profundo distante da costa com formações rochosas inflexíveis. Os sítios de fácil exploração compreendem as reservas que estão cada vez mais escassas, sendo necessária a exploração do segundo caso citado, que demandam técnicas custosas, ambientalmente arriscadas e, muitas vezes, resultam num produto que deve ser fortemente processado antes que o refino possa começar.

Esta realidade atinge o mundo inteiro, excluindo apenas os alguns países do Oriente Médio que fazem parte da OPEP, tais como o Iraque e o Irã. Praticamente todas as reservas atuais do mundo são de difícil alcance e produção, isto inclui o petróleo do offshore profundo, o petróleo do Ártico e o petróleo de xisto, juntamente com os arenitos betuminosos do Canadá. Atualmente, a tecnologia permite a exploração de reservas não convencionais destes tipos, mas muitas vezes a preços exorbitantes, não apenas em dólares mas também em danos para o meio ambiente.

A fim de sustentar a demanda mundial por hidrocarbonetos, as empresas focam seus investimentos em inovações tecnológicas, visando atingir reservatórios cada vez mais distintos. Porém, a necessidade de utilização de recursos cada vez mais caros e refinados, como aluguel de plataformas que operam em lâmina d'água muito alta e contratos de serviços e materiais de operações inovadores, geram aumentos significativos nos custos das operações. Atentando-se ao fato de que o preço do óleo é determinado pelo mercado global, sempre sujeito a constantes variações, a única maneira de se aumentar a margem de lucro das empresas operadoras é investir na redução dos custos.

Neste contexto, a eficiência nas operações de exploração e produção de óleo e gás é um tema recorrente e que vem ganhando espaço maior nos últimos anos. A preocupação ambiental aliada ao desperdício de dinheiro causado por falhas operacionais ou logísticas

representam dois dos principais temas antagônicos que precisam ser muito bem trabalhados na gestão de operações na indústria de petróleo.

Dentro das inúmeras etapas que o petróleo deve passar até chegar ao mercado consumidor, certamente aquela que enfrenta os maiores desafios em relação aos entraves tecnológicos é a perfuração de poços. Esta atividade representa uma fase essencial para que as reservas descobertas possam ser acessadas e recuperadas e, assim, o óleo obtido.

Uma de suas principais características são os custos que esta etapa representa para as empresas operadoras, causado pela necessidade de aluguel de sondas e equipamentos específicos e prestação de diversos serviços que apenas agregam custos para suas operações. Sendo assim, investimentos em melhorias no processo produtivo e em novas tecnologias para a perfuração de poços são essenciais para a manutenção da rentabilidade deste negócio.

Portanto, para que novas tecnologias sejam implementadas, aumentando os investimentos das empresas, alguns problemas que afetam o ritmo de operação atual devem ser analisados em busca de soluções efetivas para reduzir custos.

Analisando-se o desempenho das operações de perfuração de poços das grandes operadoras atuantes no mundo, é possível perceber que há inúmeros motivos recorrentes que afetam o ritmo das operações. Tais motivos alteram, não só o planejamento de perfuração e futura produção dos poços, como também os custos associados a estas operações.

As principais causas de desperdício nas operações de exploração de campos de petróleo são difíceis de prever e combater, porém, inúmeras delas podem ser mais bem estudadas e processadas, visando encontrar o foco de problemas frequentes, de forma que este

possa ser trabalhado a fim de melhorar a eficiência de execução prática de determinado processo.

Neste contexto, o conceito de *Lean Six Sigma* pode ser introduzido para mapear as principais etapas na perfuração de um campo de petróleo em que haja desperdícios de tempo e dinheiro, visando à melhoria do processo como um todo.

Lean Six Sigma é uma metodologia de gerenciamento produtivo que vem de uma junção de duas vertentes de pensamento diferentes. A primeira, conhecida como *Lean Manufacturing*, está relacionada à eliminação de desperdícios ocorridos durante a produção. Já a segunda, o Seis Sigma, refere-se à redução da variância de processos, visando criar uma produção eficaz e contínua. Dessa forma, visa cortar o desperdício e melhorar a qualidade. Sendo assim, a aplicação do método *Lean Six Sigma* nas cadeias produtivas de petróleo iria ajudar a reduzir os enormes custos associados a esta atividade.

1.1 Objetivos

Hoje em dia, muitas empresas empregam a teoria do *Lean Six Sigma* em sua cadeia produtiva, visando à redução de custos e tempo em seus processos. O uso da teoria de *Lean Six Sigma*, embora já seja adotada em alguns países do mundo no setor petrolífero, continua pouco explorada no ramo petrolífero brasileiro, pois ao contrário do segmento automotivo onde surgiu o conceito, na indústria de petróleo esta filosofia ainda está em processo de implementação, sendo desenvolvido como uma necessidade por um diferencial competitivo entre as empresas.

Dessa forma, trata-se como objetivos principais desta pesquisa:

- Apresentar a teoria de *Lean Six Sigma* e suas principais ferramentas;

- Discutir possibilidades de implementação deste conceito na perfuração de poços;
- Evidenciar os benefícios trazidos pela utilização da metodologia *Lean Six Sigma* na perfuração de poços;
- Destacar a importância de implementação desta teoria para o mercado petrolífero brasileiro;
- Realizar estudos de caso que se aplicam a realidade atual da indústria de petróleo brasileira para evidenciar formas de aplicabilidade do conceito.

1.2 Metodologia

A pesquisa a ser realizada, será baseada em estudos de caso com abordagem de pesquisa qualitativa, pois mostra melhorias da qualidade do processo produtivo, porém também mostrará uma abordagem de pesquisa quantitativa com ênfase em análises numéricas dos resultados, com uso de estatísticas básicas. Será utilizado o *software SPC XL do Excel* para simular os diversos casos a serem estudados.

O enfoque desta pesquisa será dado em operações de perfuração de poços. Será feito um estudo baseado em uma empresa multinacional do ramo petrolífero e mapeadas as operações necessárias para a perfuração de um poço, feita uma análise de performance com a identificação de seus principais defeitos e causas de tempos perdidos e não produtivos de sonda.

Com isso, serão implementados cenários de aplicação da gestão *Lean Six Sigma*, utilizando ferramentas como gráficos de análise de performance, mapas de fluxo de valor, padronização e mudança de *Layout*, entre outros, visando aumentar a capacidade produtiva a fim de reduzir os custos de produção. Serão apresentados casos de possíveis formas de tempos perdidos e não produtivos e feito um comparativo entre o estado atual, no qual o processo apresenta alguma deficiência na organização ou movimentação, sem

fluxo contínuo, e o estado futuro que revela os ganhos adquiridos e resultados obtidos na prática com a cultura *Lean Six Sigma*.

1.3 Estrutura do Trabalho

Após a apresentação do contexto do problema, objetivos e estrutura do trabalho no capítulo 1, o capítulo 2 apresenta uma explicação sobre a teoria de *Lean Six Sigma* e de suas origens: o *Lean Manufacturing* e o Seis Sigma. São apresentados o histórico de cada teoria, seus principais conceitos e principais ferramentas.

O terceiro capítulo trata da perfuração de poços, indicando seus principais equipamentos e descrevendo suas operações essenciais.

No Capítulo 4 encontra-se uma descrição da aplicabilidade da metodologia na perfuração de poços, explicitando conceitos de projetos de *Lean Six Sigma* e seus principais pontos de aplicação. Além disso, são apresentadas as formas de coleta de dados para operações de perfuração e suas análises seguindo os requisitos da metodologia abordada.

No Capítulo 5 serão realizados os estudos de caso que evidenciam a efetividade de implementação da gestão *Lean Six Sigma* na perfuração de poços, tratando de problemas ajustados aos novos desafios encontrados na realidade brasileira de perfuração *offshore* em águas profundas.

No Capítulo 6, a conclusão do estudo trata de explicitar a eficácia do método e sua importância para a indústria de petróleo. Além disso, faz uma correlação dos estudos de caso estudados com o panorama nacional da indústria.

2 LEAN SIX SIGMA

Hoje em dia, muitas empresas empregam a teoria do *Lean Six Sigma* em sua cadeia produtiva, visando à redução de custos e tempo de seus processos. O nome *Lean Six Sigma* vem de uma junção de duas vertentes de pensamento diferentes. A primeira, conhecida como *Lean*, está relacionada à eliminação de desperdícios ocorridos durante a produção. Já a segunda, o Seis Sigma, refere-se à redução da variância de processos, visando criar uma produção eficaz e contínua. Dessa forma, o *Lean Six Sigma* visa cortar o desperdício e melhorar a qualidade.

Na teoria, o *Lean* se refere a uma abordagem sistemática para identificar e eliminar desperdícios através da melhoria contínua, iniciando o fluxo produtivo somente quando solicitado, buscando sempre a perfeição. Nesse contexto, o Seis Sigma seria uma metodologia para melhoria de um processo inovador; uma visão de qualidade na qual busca-se reduzir a variação de um processo, realizando tarefas sempre da maneira correta.

Nesse contexto, entender as origens dessas duas teorias é essencial para verificar a eficácia dessa técnica.

2.1 *Lean Manufacturing*

2.1.1 Breve Histórico

O *Lean* nasceu no Japão, logo após a Segunda Guerra Mundial, na fábrica de automóveis Toyota. O Japão foi praticamente destruído na II Guerra Mundial e as nações vencedoras empreenderam esforços para transformar o país imperialista em uma democracia e em criar uma nova forma de trabalho que considerasse o fato de o país ser uma ilha distante dos grandes centros, sem competências e recursos para o desenvolvimento. Eram

necessários grandes investimentos para criar o próprio mercado japonês. Além disso, no país existiam muitos problemas e desafios a serem contornados como: mercado interno limitado que demandava uma vasta variedade de produtos; mão-de-obra organizada; existência de vários fabricantes de veículos do mundo interessados em ingressar no Japão, dentre outros.

O resultado foi a consciência de que o país precisava ser altamente eficiente para servir aos mercados locais e ao mesmo tempo ser competitivo no ambiente internacional. Para isso, seus produtos deveriam ter qualidade superior e custos competitivos capazes de fidelizar seus compradores, tanto pela qualidade como pelo custo. Naquela época a indústria japonesa tinha uma produtividade muito baixa e uma enorme falta de recursos, o que a impedia de adotar o modelo da produção em massa.

Este era o sistema vigente na época, conhecido como Fordismo, em que se priorizava a produção em larga escala através de uma linha de montagem. Neste sistema, que predominou no mundo até a década de 90, o objetivo era a redução de custos unitários dos produtos através da produção em larga escala, da especialização e da divisão do trabalho, gerando criação de estoques e profissionais desqualificados.

Nesse contexto, quatro pessoas perceberam as falhas do antigo sistema produtivo vigente e criaram uma proposta para uma nova forma de produção, que visava otimizar a cadeia produtiva em geral, evitando desperdícios. Assim, o fundador da Toyota e mestre de invenções, Sakichi Toyoda, juntamente com seu filho, Kiichiro Toyoda, o primo dele, Eiji Toyoda, e o engenheiro chefe da Toyota Motors Company, o chinês Taiichi Ohno, criaram o Sistema Toyota de Produção (STP). Este sistema se aplicou perfeitamente a realidade pós guerra em que eles viviam, pois necessitava de menos investimento, esforço humano e fornecedores e ainda solucionaram o problema de criação de estoques e desperdícios

com a introdução do método *just in time*.

Com este sistema, houve a produção de lotes em baixa escala, o que gerava uma maior variedade de produtos. Eles podiam agora, adaptar a produção ao gosto do cliente, criando mais opções de escolha e revolucionando o mercado da época. Os trabalhadores se tornaram multifuncionais, ou seja, conheciam outras tarefas além de sua própria e sabiam operar mais que uma única máquina. Diferente do Fordismo, no Sistema Toyota de Produção a preocupação com a qualidade do produto tinha fundamental importância.

Foram desenvolvidas diversas técnicas simples, mas extremamente eficientes para proporcionar os resultados esperados. Dessa forma, eles podiam fabricar produtos de maneira econômica em menor volume e com maior variedade, requerendo menos estoque em cada etapa e causando menos lesões nos empregados.

Segundo Ghinato (1996), o Sistema Toyota de Produção, que ficou conhecido como “Sistema de Produção Enxuta”, revolucionou o mercado automobilístico da época, e fez com que a Toyota ganhasse cada vez mais espaço na indústria mundial e se tornando uma das maiores montadoras do planeta.

2.1.2 Principais Conceitos

A base do *Lean Manufacturing* é a combinação de técnicas gerenciais com as máquinas a fim de produzir mais com menos recursos. Um dos conceitos fundamentais do *Lean Manufacturing* é a melhoria contínua (chamado de *Kaizen*), considerada a chave do sucesso dos métodos japoneses de produção. O sistema de produção japonês é constituído para encorajar mudanças e aperfeiçoamentos constantes, como parte das operações diárias. Para alcançar o *Kaizen*, a gerência aproveita a experiência coletiva de todos os seus trabalhadores e valoriza a solução de problemas em conjunto.

O *Lean Manufacturing* ou Produção Enxuta surgiu como um sistema de manufatura cujo foco é aperfeiçoar os processos e procedimentos através da redução contínua de desperdícios. Seus objetivos fundamentais são:

- Otimização e Integração do sistema de manufatura: É preciso integrar todas as partes de um sistema de manufatura, buscando sempre a otimização do sistema como um todo. Qualquer processo ou atividade que não agrega valor ao produto é desperdício e precisa ser eliminado. A integração e otimização de um sistema de manufatura é um processo contínuo de redução do número de etapas estanques, necessárias para completar um processo em particular;
- Qualidade: Um sistema de processamento precisa e exige um ambiente produtivo que forneça produtos com qualidade. Cada processo de produção deve transferir para a próxima etapa, produtos de qualidade, ou seja, a qualidade deve ser assegurada ao longo de todo o processo. A Manufatura Enxuta exige que cada pessoa envolvida no processo produtivo seja educada e treinada para aceitar a responsabilidade pelo nível de qualidade do seu trabalho;
- Flexibilidade do processo: Significa minimizar os fatores de restrição na produção. Flexibilidade reflete a capacidade de obter materiais e de preparar um processo de produção em curto espaço de tempo e a custo mínimo, ou seja, é ser capaz de suportar variações na demanda;
- Produção de acordo com a demanda: Empresas devem organizar sua produção de acordo com os pedidos dos clientes, pois eles impõem a necessidade de determinado produto.
- Manter o compromisso com clientes e fornecedores: Compromissos representam elos de ligação que permitem que as empresas fabricantes individuais se juntem em um processo industrial contínuo. Planejamento a fim de manter os

compromissos envolve determinar as etapas necessárias para atender aos planos de entrega, níveis de qualidade e margens de lucro;

- Redução do custo de produção: Objetivo mais evidente e factível com a implementação do *Lean Manufacturing*, que evita ao máximo o desperdício e busca de forma determinada e contínua a redução dos custos do processo de manufatura como um todo.

Segundo Ohno (1997), os pilares do Sistema Toyota de Produção são dois:

- Automação: consiste em dotar máquinas, equipamentos e pessoas da autonomia necessária de parar a produção sempre que uma condição preestabelecida, ou normal, for atingida (como a quantidade produzida) ou em condição anormal (em casos que há desvios no padrão de qualidade desejado);
- *Just in time*: uma lógica de produção que tem como princípio gerar estoque em níveis estritamente necessários ao sistema, de forma a produzir no exato tempo apenas a quantidade necessária de produtos.

Como forma de explicar o pensamento *Lean*, Liker & Meier (2007) sugerem formas capazes de explicar os princípios da produção enxuta:

- Filosofia: a base para o pensamento de longo prazo é a filosofia enxuta, onde os líderes veem a empresa como um veículo para agregar valor aos clientes, à sociedade, à comunidade e aos seus funcionários;
- Processo: o princípio é que processos certos geram resultados certos;
- Pessoas e Parcerias: segundo esse princípio é fundamental o desenvolvimento de longo prazo, de pessoas e parceiros como modo de adição contínua e sistemática de valor aos clientes; e uma boa alternativa é agregar valor aos clientes desafiando seus funcionários e parceiros a crescer;

- Solução de Problemas: a solução contínua da raiz dos problemas conduz à aprendizagem organizacional e à melhoria contínua.

Na visão de OHNO (1997), uma produção enxuta depende da eliminação de sete tipos clássicos de desperdícios, também denominado de perdas, existentes dentro de uma empresa. Entre eles, pode-se destacar:

1. Superprodução

Superprodução significa produzir mais do que a quantidade pedida pelo processo seguinte, mais cedo do que o tempo necessário para o processo seguinte ou mais rápido do que o ritmo necessário para o processo seguinte.

Esse tipo de perda, além de muito difícil de ser eliminada, cria um incontável número de outros desperdícios, como por exemplo, área de estoque, deterioração, custos de energia, manutenção de equipamentos, problemas operacionais e administrativos através de “estoques de segurança”.

2. Tempo de espera

Este tipo de perda consiste no tempo em que nenhum processamento, transporte ou inspeção é executado. O tempo de espera pode se referir a materiais, processo ou pessoas.

A perda por materiais ocorre quando estes já passaram por determinado processo e tem que esperar todas as outras peças do lote para poder seguir a próxima etapa. A perda por processo é caracterizada quando ocorre a falta ou atraso na matéria-prima e um lote inteiro fica aguardando a operação da máquina para iniciar sua produção. A perda por pessoas ocorre quando o operário permanece ocioso, assistindo uma máquina em operação.

3. Transporte

Transporte costuma ser um dos gargalos de qualquer fluxo de processo. Este tipo de perda está relacionado a deslocamentos desnecessários ou estoques temporários. Encaradas como desperdícios de tempo e recursos, as atividades de transporte e movimentação devem ser eliminadas ou reduzidas ao máximo, através da elaboração de um arranjo físico adequado, que minimize as distâncias a serem percorridas.

4. Processamento

Perda por processamento consiste em máquinas ou equipamentos usados de modo inadequado quanto à capacidade desempenhar uma operação. Por exemplo, a realização de formulários e transações desnecessárias, aprovações redundantes, contatos ou processos excessivos, etc.

Nesse sentido, torna-se importante a aplicação das metodologias de engenharia e análise de valor, que são importantes ferramentas para minimizar este desperdício, que não afeta as funções básicas do produto.

5. Estoque

Estoque é a perda sob a forma de estoque de matéria-prima, material em processamento e produto acabado. Significam desperdícios de investimento e espaço.

O combate às perdas por estoque torna-se uma barreira a partir do momento que é considerado uma vantagem, quando se trata de aliviar os problemas de sincronia entre os processos. A redução dos desperdícios de estoque deve ser feita através da eliminação das causas geradoras da necessidade de manter estoques. Isto pode ser feito reduzindo-se os tempos de preparação de máquinas e os *leads times* de produção, sincronizando-se os fluxos de trabalho, tornando as máquinas confiáveis e garantindo a qualidade dos processos.

6. Defeitos

A perda por fabricação de produtos defeituosos é o resultado da geração de produtos com alguma característica de qualidade fora do especificado, e que por isso não satisfaça requisitos de uso. Produzir produtos defeituosos significa desperdiçar materiais, disponibilidade de mão de obra, disponibilidade de equipamentos, movimentação de materiais defeituosos, armazenagem de materiais defeituosos, inspeção de produtos, entre outros. Técnicas para solucionar este desperdício estão muito relacionadas com métodos de controle de qualidade na fonte do causador do problema.

7. Movimentação

Movimentação significa qualquer movimentação excessiva de pessoas ou máquinas. Esta perda está relacionada aos movimentos desnecessários realizados por operadores na execução de uma operação.

Segundo OHNO (1997), no sistema de Produção Enxuta tudo o que não agrega valor ao produto, visto sob os olhos do cliente, é desperdício. Todo desperdício apenas adiciona custo e tempo. Todo desperdício é o sintoma e não a causa do problema.

No *Lean Manufacturing*, existem cinco princípios ditos como fundamentais na eliminação das perdas, resumindo todo o pensamento enxuto. Esses princípios são ensinamentos que orientam as empresas que queiram adotar esta filosofia, mostrando o que deve ser realizado para alcançar seus objetivos.

Antes de conceituar os cinco princípios, é necessário conhecer o significado de “Valor Agregado”, ou simplesmente “Valor”. O valor real de um produto, processo ou sistema é o grau de aceitabilidade de um produto pelo cliente, ou seja, é o índice final do valor econômico. Quanto maior é o valor real de um item sobre outro com a mesma finalidade, maior será a probabilidade deste vencer a concorrência. Assim, responsável por agregar

valor a um produto, é a operação produtiva que é realizada para cumprir os requisitos do cliente ou consumidor final. A empresa deve visar fornecer produtos ou serviços valorizados a partir da perspectiva do cliente e não a partir da visão interna da organização, pois o mercado está cada vez menos disposto a aceitar produtos que não atendem às necessidades do cliente.

Segundo WOMACK e JONES (1998), os cinco princípios do *Lean Manufacturing* são:

1. Especificação do Valor

Essencial para a eficiência de qualquer processo é a determinação do conceito de valor. Segundo uma mentalidade *Lean*, o valor do produto deve ser especificado pelo cliente final, e não pela empresa. E para isso, este produto deve ter requisitos que atendam às necessidades do cliente, com um preço específico e com um prazo adequado de entrega. Quaisquer características ou atributos do produto ou serviço que não atendam as percepções de valor das clientes representam oportunidades para racionalizar. A empresa cria este valor que concebe, projeta, produz, vende e entrega o produto ao cliente final.

2. Identificação da Cadeia de Valor

Cadeia ou fluxo de valor é o conjunto de todas as ações específicas necessárias para se levar um produto a passar pelas três tarefas gerenciais críticas de qualquer negócio:

- Tarefa de solução de problemas: vai da concepção até o lançamento do produto, passando pelo projeto detalhado e pela engenharia de processo;
- Tarefa de gerenciamento da informação: vai do recebimento do pedido até a entrega, seguindo um cronograma detalhado;

- Tarefa de transformação física: vai da matéria prima ao produto acabado nas mãos do cliente (WOMACK e JONES, 1998).

Identificar e mapear com precisão o fluxo de valor completo do produto é tarefa fundamental para enxergar os desperdícios em cada processo, além da implementação de ações para eliminá-los, criando assim um novo fluxo de valor otimizado (ROTHER e SHOOK, 1998).

Portanto, identificar a cadeia de valor se baseia em mapear o conjunto de todas as atividades. Nesta fase é importante separar os processos em três categorias: os que efetivamente geram valor, aqueles que não geram valor, mas são importantes para a manutenção dos processos e da qualidade, e aqueles que não agregam valor, devendo ser eliminados.

3. Fluxo de Valor

Segundo WOMACK e JONES (1998), uma vez que, para determinado produto o valor tenha sido especificado com precisão, o fluxo de valor mapeado e as etapas que não agregam valor eliminadas, é fundamental que o valor em processo flua suave e continuamente dentro das três tarefas gerenciais críticas: solução de problemas, gerenciamento da informação e transformação física.

Dessa forma, após Identificado o valor de acordo com o primeiro princípio, mapeada a cadeia de valor do produto e eliminados os desperdícios de acordo com o segundo princípio, o passo seguinte do pensamento enxuto é fazer com que o fluxo otimizado de valor flua de forma harmônica até a chegada do produto ao cliente final, redefinindo-se as funções e os departamentos, permitindo que estes contribuam para a criação de valor para o cliente.

4. Produção Puxada

Este princípio ressalta a importância da demanda para determinar o ritmo de uma produção. Desta forma surge o pensamento de produzir apenas aquilo que é necessário quando for necessário. Assim, visa-se evitar a acumulação de estoques de produtos mediante a produção e fornecimento daquilo que o cliente deseja quando o cliente precisar, nem antes nem depois. Ou seja, é responsável por determinar a produção, eliminando estoques, dando valor ao produto e acarretando ganhos em produtividade.

5. Busca da Perfeição

Em um fluxo de valor, a perfeição deve ser o objetivo final de todos os seus envolvidos. Após a implementação dos quatro princípios anteriores, especificando o valor do produto a partir do cliente, identificando a cadeia de valor como um todo, fazendo com que o fluxo de valor flua e com que os clientes puxem o valor da empresa, a produtividade empresarial consequentemente aumenta e os custos diretos e indiretos diminuem. Ao intensificar a aplicação dos quatro princípios de forma interativa, surgem novos desperdícios e novos obstáculos ao fluxo de valor, criando-se oportunidades de melhoria e permitindo sua eliminação. Trata-se de um processo contínuo de aumento de eficiência, em busca da perfeição.

Com a conceituação dos cinco princípios descritos acima, pode-se observar que a força de transformação da iniciativa enxuta está na especificação correta do valor para o cliente final, na identificação de todas as ações que levam um produto da concepção ao lançamento, do pedido a entrega, da matéria-prima às mãos do cliente.

Além disso, o pensamento de acordo com o *Lean manufacturing* está focado na eliminação das atividades que não agregam valor e na estimulação de ações que

adicionam valor a ocorrerem em um fluxo contínuo e puxado pelos clientes e, finalmente, na análise dos resultados e na criação de um novo processo.

Analisando todos os principais conceitos, fica evidente a essência do Sistema Toyota de Produção ou *Lean Manufacturing* como a busca incessante da eliminação de toda e qualquer perda.

Pela lógica tradicional, o preço era estabelecido pela empresa em que se somava o custo de produção ao lucro estimado ($\text{Preço} = \text{Custo} + \text{Lucro}$). Entretanto, com a concorrência cada vez mais acirrada e os consumidores cada vez mais exigentes, o preço passa a ser determinado pelo mercado ($\text{Preço} - \text{Custo} = \text{Lucro}$). Analisando a segunda fórmula, chega-se à conclusão de que a única maneira de se aumentar ou manter o lucro é reduzindo-se os custos, como destacado na figura 2.1. Para eliminação destes desperdícios e alcance das metas estabelecidas, o *Lean Manufacturing* lança mão de um conjunto de técnicas e ferramentas como a otimização de *Layout*, o *Kanban*, o Mapa do Fluxo de Valor (VSM - *Value Stream Map*), dentre outras.

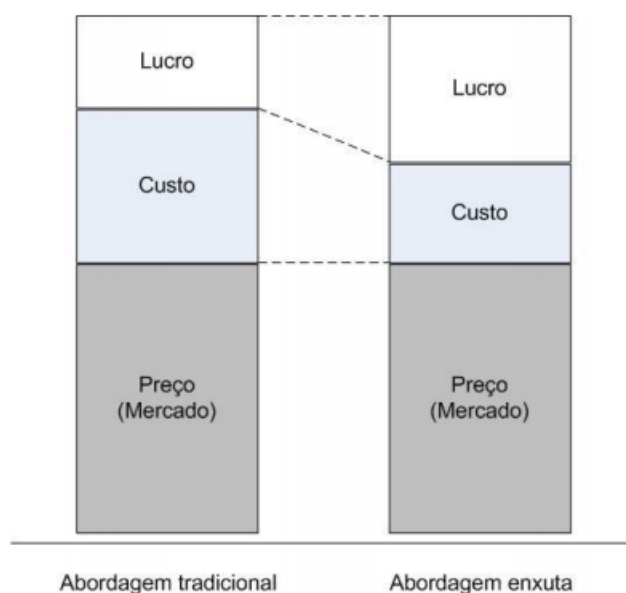


Figura 2.1: Princípio da redução de custos.
(Fonte: Adaptado de Giannini, 2007)

2.1.3 Principais Ferramentas

Para que o *Lean Manufacturing* consiga atingir seus objetivos, é necessário aplicar algumas ferramentas que auxiliam na obtenção dos resultados. As ferramentas são instrumentos utilizados como um guia a para implementação dos princípios de um Sistema de Manufatura Enxuta. As principais ferramentas do *Lean Manufacturing* estão descritas abaixo:

- VSM (*Value Stream Map*) ou Mapa de Fluxo de Valor

Mapeamento de Fluxo de Valor é uma das ferramentas essenciais do *Lean Manufacturing*, proposta por ROTHER e SHOOK (1998), que se basearam em uma técnica de modelagem proveniente da metodologia Análise da Linha de Valor.

O VSM consiste no processo de identificação de todas as atividades específicas que ocorrem ao longo de um fluxo de valor referente ao produto. Entende-se por fluxo de valor o conjunto de todas as atividades que ocorrem desde a colocação do pedido até a entrega ao consumidor final.

É um processo de observação e compreensão do estado atual e o desenho de um mapa dos processos, ou seja, é uma representação visual de cada processo no fluxo do material e informação real que reformulam-se um conjunto de questões chaves e desenharam um mapa do estado futuro de como a produção deveria fluir.

O mapeamento ajuda a identificar as fontes de desperdício, fornece uma linguagem comum para tratar dos processos de manufatura e torna as decisões sobre o fluxo visíveis. A meta que se pretende atingir pela Análise do Fluxo de Valor é a obtenção de um fluxo contínuo, orientado pelas necessidades dos clientes, desde a matéria prima até o produto final.

O grande diferencial do VSM é reduzir significativamente e de forma simples a complexidade do sistema produtivo e ainda oferecer um conjunto de diretrizes para a análise de possíveis melhorias. Nesse sentido, a técnica de Mapeamento do Fluxo de Valor auxilia no desenvolvimento conceitual da “situação futura” do sistema de produção enxuta.

▪ 5 S

O chamado “5S” é outra ferramenta muito utilizada no processo de implantação do *Lean Manufacturing*. Ela surgiu no Japão, no momento em que se buscava métodos para ajudar a reconstruir o país no pós guerra e veio para o Brasil juntamente com os conceitos da Qualidade.

Os objetivos principais desta ferramenta são: melhorar a qualidade dos produtos/serviços; melhorar o ambiente de trabalho e de atendimento ao usuário; melhorar a qualidade de vida dos funcionários; educar para a simplicidade de atos e ações; maximizar o aproveitamento dos recursos disponíveis; reduzir gastos e desperdícios; otimizar o espaço físico; reduzir e prevenir acidentes; melhorar as relações humanas; aumentar a autoestima dos funcionários/moradores.

A sigla 5S é proveniente de cinco palavras japonesas:

- Seiri (Senso de utilização): Consiste em decidir o que é necessário e eliminar o que não é necessário.
- Seiton (Senso de Ordenação): Este senso consiste em colocar tudo em ordem e com fácil acesso.
- Seisou (Senso de Limpeza): consiste em eliminar lixo e sujeira, fazer uma faxina geral, tornar os problemas fáceis de serem localizados.

- Seiketsu (Senso de Saúde): eliminar todas as causas de desordem e cuidar sempre da saúde e higiene pessoal.
 - Shitsuke (Senso de Autodisciplina): consiste basicamente, em disciplinar a prática dos “S” anteriores, mantendo todas as melhorias feitas.
- *Just in Time*

A expressão *just in time* é de origem inglesa e foi adotada pelos japoneses. Em português, esta expressão significa “bem na hora”. Este sistema consiste em fabricar somente aquilo que se vende, de preferência que se venda primeiramente, depois fabricar e posteriormente, entregar. O *just in time* não se adapta facilmente a uma produção diversificada, pois em geral isto requereria extrema flexibilidade do sistema produtivo, em dimensões difíceis de serem obtidas neste sistema.

Entretanto, este sistema tende a reduzir os custos operacionais, já que diminui a necessidade da mobilização e manutenção de espaço físico, principalmente na estocagem de matéria-prima ou de mercadoria a ser vendida. Assim, para a eliminação de perdas sistematicamente deve-se remover barreiras ao fluxo de material e reduzir estoque de segurança.

▪ *Kanban*

O *Kanban*, literalmente traduzido do japonês como “sinal”, é um sistema de sinalização entre cliente e fornecedor, constituindo-se num método simples de controlar visualmente os processos. Tecnicamente, o *Kanban* é o sistema de comunicação da ferramenta *just in time*. É uma forma de ordenar o trabalho, definindo o que, quanto, quando e como produzir, além de como transportar e onde entregar. O sinal funciona como o disparador da produção, coordenando a

produção de todos os itens de acordo com a demanda e ainda, controlando visualmente a produção e programando a produção.

- SMED - *Single Minute Exchange Die* – Troca Rápida de Ferramenta

A redução do tempo de troca de ferramentas é de extrema importância no sucesso do Sistema de Manufatura Enxuta. Consiste na quantidade de tempo necessária para trocar uma referência desde a última peça produzida de um lote até a primeira peça produzido no seguinte lote de produção. A redução do tempo é importante porque melhora a eficácia de todo o equipamento, contribui para implementar programas de produção nivelada, ajuda a reduzir o inventário de produtos finais, dá suporte à metodologia “Fluxo de Produção”, contribui para a eliminação das perdas e desperdícios, além de adicionar a capacidade da máquina e melhorar a qualidade.

2.2 *Six Sigma*

2.2.1 Breve Histórico

O *Six Sigma* teve origem na fábrica da Motorola, quando o então CEO da empresa, Bob Galvin, estabeleceu uma meta ambiciosa: atingir o décuplo de melhoria da qualidade dos produtos e atingir a satisfação do cliente em cinco anos. O plano focaria na competitividade global, gerenciamento participativo e, o mais importante, melhoria severa da qualidade.

Em poucas palavras, eles atingiriam esse objetivo com a aplicação de métodos estatísticos a processos empresariais, orientados pela meta de eliminar defeitos. Então, a Motorola voltou-se para o caminho de qualidade conhecido como *Six Sigma* e se tornou um ícone do ramo de tecnologia mundialmente.

Em 1988, o engenheiro de qualidade da Motorola, Bill Smith, chamou o processo de melhoria de qualidade de Six Sigma. Era um nome atraente e os resultados eram ainda mais extraordinários, tornando a Motorola conhecida como líder de qualidade e em lucro. Neste mesmo ano, a Motorola ganhou o Prêmio Nacional da Qualidade Malcolm Baldrige, tornando de conhecimento público o segredo de seu sucesso e, assim, a revolução do *Six Sigma* pôde ser iniciada.

2.2.2 Principais Conceitos

O objetivo do *Six Sigma* não está puramente em adquirir qualidade em seu sentido tradicional, mas sim em ajudar a organização a ganhar mais dinheiro, aumentando o valor e eficiência de seus produtos e processos. Para haver uma interligação deste objetivo com qualidade de produto, deve-se pensar em uma nova definição de qualidade.

Para fins de *Six Sigma*, a qualidade se refere ao valor agregado por um esforço produtivo e pode vir em duas vertentes: potencial de qualidade e qualidade real. A diferença entre o potencial de qualidade e a qualidade real é o desperdício. *Six Sigma* se concentra na melhoria da qualidade, ou seja, na redução do desperdício, ao ajudar as organizações a produzirem produtos e serviços melhores, mais rápidos e mais baratos.

Há uma correspondência direta entre os níveis de qualidade e “níveis sigma” de desempenho. Por exemplo, um processo operando em *Six Sigma* irá deixar de atender uma média de 3 requisitos por milhão de transações. Empresas típicas operam em cerca de quatro sigma, o que significa que eles produzem cerca de 6.210 falhas por milhão de transações. O *Six Sigma* se concentra nas necessidades dos clientes, na prevenção de defeitos, redução de tempo e redução de custos. Então, ele ataca diretamente o foco do problema e, ao contrário dos programas de redução de custos irracionais, que também

reduzem valor e qualidade, ele identifica e elimina os custos que oferecem nenhum valor para os clientes, os custos de resíduos.

Esses custos de desperdícios costumam ser extremamente altos. Empresas que operam com 3 ou 4 sigmas, tipicamente gastam entre 25 e 40% de sua receita consertando problemas. Este pode também ser chamado de COPQ ou custo de qualidade inferior (*Cost Of Poor Quality*). Empresas que empregam o *Six Sigma* tipicamente apresentam menos de 5% de suas receitas consertando problemas. Os valores de COPQ de acordo com o nível sigma mostrados na figura 2.2 são resultados de diversos estudos e evidenciam que o custo desta diferença é grande.

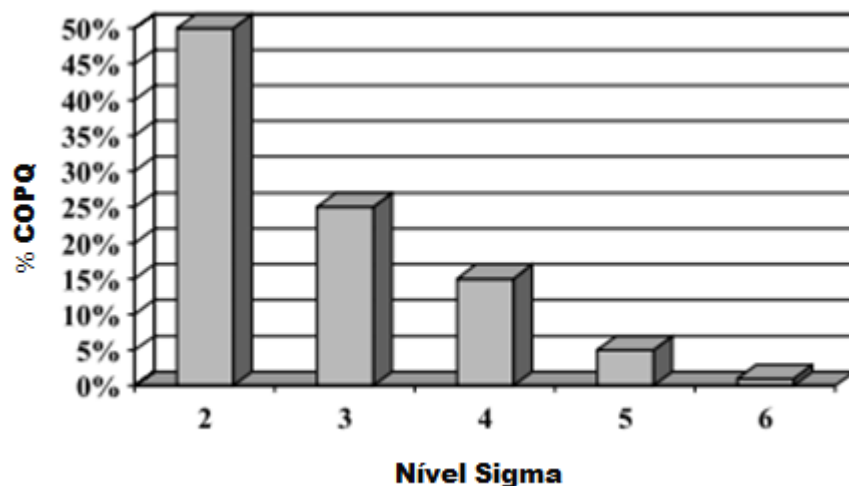


Figura 2.2: COPQ versus nível sigma.
(Fonte: *The Six Sigma Handbook*, Pzydek 2003)

Uma razão do porque os custos estarem diretamente relacionados com os níveis sigma é muito simples: os níveis sigma são quantificados através de taxas de erro, e erros demandam custos para que sejam consertados. A figura 2.3 mostra a relação entre erros e níveis sigma. Facilmente pode-se notar que a taxa de erro cai exponencialmente enquanto o nível sigma aumenta, correlacionando bem com os dados de custo mostrados na figura 2.2. Além disso, é importante notar que os erros são mostrados como erros por

milhão de oportunidades e não por porcentagens. Isto é uma convenção introduzida pelo *Six Sigma*. No passado, era possível tolerar porcentagens de taxas de erro, ou seja, erros a cada 100 oportunidades. Hoje em dia, esta representação significa um número muito alto para os padrões que os processos produtivos atingiram (Pyzdek, 2003).

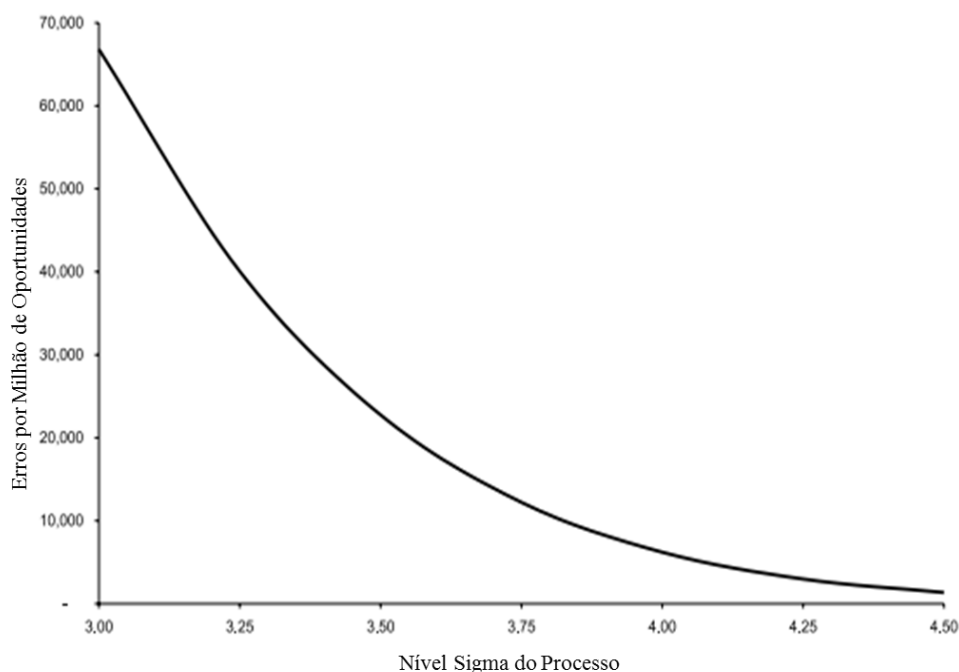


Figura 2.3: Erros versus nível sigma.
(Fonte: *The Six Sigma Handbook*, Pzydek 2003)

Sob o ponto de vista estatístico, o sigma é uma medida de variabilidade intrínseca de um processo definido pelo desvio padrão e representado pela letra Sigma (σ). Sigma é uma letra do alfabeto grego usada por estatísticos para calcular a variação de um processo. Sobre condições de normalidade, a medida Seis Sigma representa 2 partes por bilhão de oportunidades, na qual a oportunidade de defeitos representa a chance de existir um defeito por unidade de produto ou serviço fornecido. Entretanto, considerando a flutuação de 1,5 sigma do processo em uma perspectiva de longo prazo, o processo tende a operar em uma taxa de 3,4 defeitos por milhão (PPM), o que efetivamente equivale a 4,5 sigmas em relação à média (Ehie & Sheu, 2005).

No entanto, todo processo apresenta uma variação natural, que os estatísticos da Motorola, pais da metodologia Six Sigma, após verificar o comportamento de muitos resultados de processos, determinaram para esta variação o valor de 1,5 desvios padrões (σ) (MONTGOMERY, 2004). Esta explicação pode ser observada através do Gráfico 2.1, que mostra a distribuição com e sem variação do desvio padrão. Assim, ainda que a média se desloque 1.5 sigmas em relação ao valor nominal, espera-se 3.4 defeitos por milhão de oportunidades. A Tabela 2.1 sinteticamente ilustra os principais valores adotados pela abordagem Seis Sigma, segundo Harry & Schroeder (2000). De forma que, se o valor do desvio padrão é baixo, mais uniforme será o processo e menor variação existirá entre os resultados; e quanto menor for o desvio padrão, então melhor será o processo e menor será a possibilidade de falhas (Trad & Maximiano, 2009).

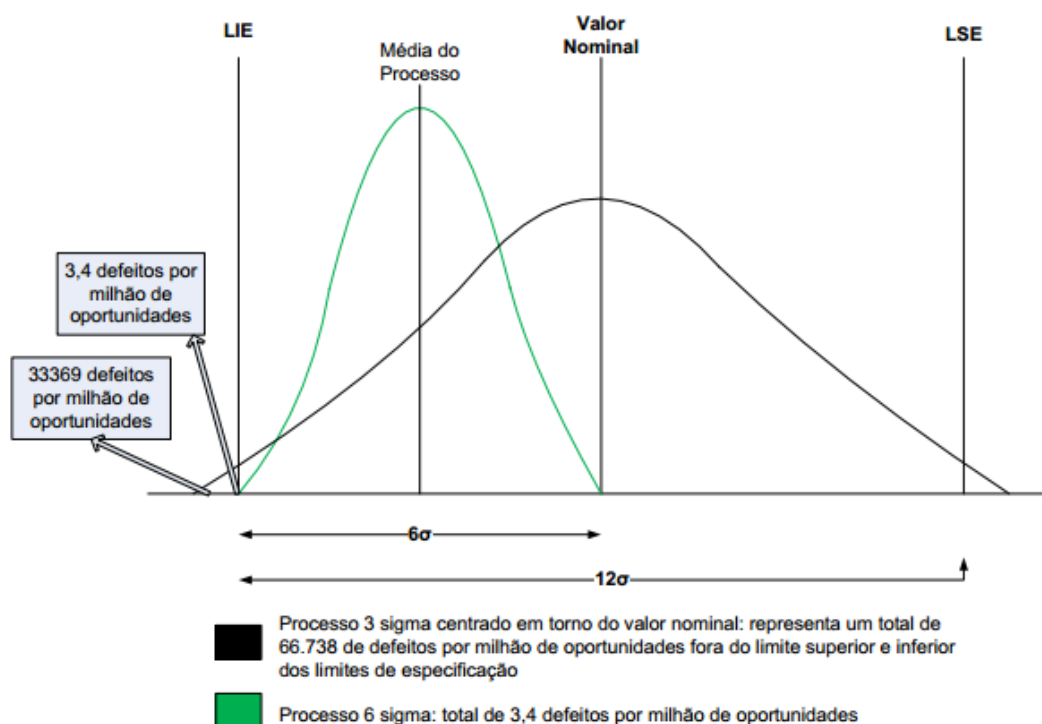


Gráfico 2.1: Distribuição normal, com e sem variação.
(Fonte: *Six Sigma Guide*, CABRERA 2006)

Nível sigma	Nível da qualidade (%)	Taxa de erro (%)	Defeitos por milhão de oportunidades (DPMO)	Custo da não qualidade (% do faturamento)
1 σ	30,90	69,10	691,462	Não se aplica
2 σ	69,10	30,90	308,538	Não se aplica
3 σ	93,30	6,70	66,807	25 a 40
4 σ	99,38	0,62	6,21	15 a 25
5 σ	99,977	0,023	233	5 a 15
6 σ	99,99966	0,00034	3,4	<1

Tabela 2.1: Escala Sigma.
(Fonte: Harry & Schroeder, 2000)

Inicialmente o foco de aplicação do Seis Sigma se deu no contexto da manufatura. Entretanto, com a maturidade da abordagem ao longo dos anos, o Seis Sigma vem ganhando força em outras áreas como área de serviços, saúde, alimentação e assim por diante. Segundo Santos & Martins (2010), após o foco de gestão da qualidade se destacando na medição, em métodos quantitativos, equipe especializada e definição clara de metas de desempenho, o Seis Sigma, passou a ser usado num contexto mais amplo, sendo reconhecido como uma estratégia efetiva para melhorar o desempenho do negócio. Pacheco *et al.* (2013), por exemplo, integraram a técnica de mineração com as ferramentas Seis Sigma para melhorar os índices de qualidade na indústria.

Hoje, parte da popularidade do programa é devido ao seu foco na redução de custos e na melhoria da lucratividade. Conforme Andrietta e Miguel (2002), essa melhoria é obtida através de rastreamento e eliminação das causas raiz dos defeitos, assim como na melhoria da eficiência em todas as operações, desde o chão de fábrica até os níveis gerenciais. A eliminação de falhas em processos e produtos no *Six Sigma* envolve a medição e melhoria da capacidade do processo na produção de itens conformes.

Na prática, em empresas onde a metodologia está fortemente implantada, *Six Sigma* é um processo altamente disciplinado que ajuda a focalizar o desenvolvimento e a entrega de produtos e serviços “quase perfeitos”. Assim, dentro deste conceito, a ideia central por trás de *Six Sigma* é: se for possível medir quantos “defeitos” existem em um processo, também é possível otimizá-los e, chegar o mais próximo possível a “zero defeitos”.

Six Sigma está focado nos valores dos clientes, que são traduzidos em objetivos de melhoria do negócio. Segundo Eckes (2001), essa é uma responsabilidade do “dono do processo”, que também é responsável, entre outros, pelo conhecimento das necessidades e expectativas do cliente, pela identificação das fontes de falhas e defeitos nos processos, e pela implantação de ações que agreguem valor às necessidades dos clientes. Isto se deve ao impacto do *Six Sigma* nas vantagens competitivas, como:

- Velocidade
- Custo
- Mix de produtos
- Confiabilidade na entrega
- Qualidade

Uma implementação bem sucedida de *Six Sigma* associa o conhecimento estatístico ao conhecimento técnico da gestão de processos, para estabelecer onde e como utilizar os métodos. O uso de ferramentas não é motivado apenas pela necessidade de se mostrar o emprego de uma determinada técnica, mas sim pela utilização de um conjunto de métodos para solucionar problemas específicos do processo e dos negócios.

2.2.3 Principais Ferramentas

A implementação propriamente dita do Seis Sigma envolve uma série de etapas focadas na melhoria contínua que são conhecidas pela sigla DMAIC (*Define, Measure, Analyse,*

Improve e Control – Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar) (PANDE, NEUMAN E CAVANAGH, 2001). Segundo Rotondaro (2002), a metodologia DMAIC significa seguir determinadas etapas na condução de um estudo no qual se deseja otimizar processos e produtos, consequentemente com a redução de custos e aumento de produtividade.

A metodologia DMAIC foi concebida e aperfeiçoada para aplicações em processos já existentes em ambiente de manufatura, processos e serviços. Segundo Pyzdek, o modelo DMAIC é essencial para o acompanhamento de projetos, visto que é usado para estabelecer marcações no final de cada fase.

A fase *Define* (Definir) se refere a definição do problema a partir de opiniões de consumidores e objetivos do projeto. Nele consistem o mapeamento de processos e fluxogramas, desenvolvimento de projetos de fretamento, ferramentas de resolução de problemas, e as chamadas ferramentas de 7M.

A fase *Measure* (Medição) corresponde à investigação de relações de causa e efeito. Ela abrange os princípios de medição, dados contínuos e discretos, escalas de medida, uma visão geral dos princípios de variação e repetitividade, utilizando dados contínuos e discretos.

A fase *Analysis* (Análise) corresponde à análise descritiva dos dados e o mapeamento para a identificação das causas-raiz dos defeitos e das oportunidades de melhoria. Ela estabelece uma linha de base do processo, como determinar metas de melhoria de processos, incluindo a análise descritiva e exploratória de dados e ferramentas de refinamento de dados, princípios básicos de controle estatístico de processo. Além disso, utiliza de ferramentas como de gráficos de controle especializados, análise de capacidade de processo, de correlação e de análise de regressão, a análise de dados categóricos, e métodos estatísticos não paramétricos.

A fase *Improve* (Melhoria) visa otimizar o processo baseada na análise dos dados usando técnicas como desenho de experimentos, e busca padronizar o trabalho para criar um novo estado de processo. Então, ela abrange gerenciamento de projetos, avaliação de risco, simulação de processos, planejamento de experimentos e conceitos de otimização de processos.

A fase *Control* (Controle) abrange o planejamento de controle de processo, prevendo o futuro estado de processo para se assegurar que quaisquer desvios do objetivo sejam corrigidos antes que se tornem defeitos. Implementar sistemas de controle como um controle estatístico de processo ou quadro de produções, e continuamente monitorar os processos.

Para definir um projeto *Six Sigma*, primeiramente se define o processo ou método de condução do projeto. Ao longo do projeto, as análises buscam identificar as variáveis independentes que mais contribuem para explicar uma mudança na variável dependente que expressa o desempenho do processo.

2.3 *Lean Six Sigma*

Hoje em dia, a prática da teoria *Lean* foi aprimorada para a realidade atual das empresas. Para uma maior confiabilidade no método de otimização utilizado, houve a junção da teoria *Lean* com a teoria do Seis Sigma, que visa a redução da variância dos processos. A primeira integração e popularização do *Lean* com o *Six Sigma* ocorreu em 1986, por George Group (SALAH; RAHIM e CARRETERO, 2010). Mas a evolução do *Lean Six Sigma* teve início nos anos 2000 (BYRNE et. al., 2007). Sheridan (2000) usou o termo *Lean Six Sigma* para descrever o sistema da combinação de ambos *Lean Manufacturing* e *Six Sigma*.

A forma como o *Lean Manufacturing* e o *Six Sigma* têm se relacionado é integralmente aceitável hoje, e mais empresas estão estabelecendo programas *Lean Six Sigma*, especialmente depois de comprovarem a capacidade do método dentro das empresas como GE e Toyota. Recentemente, algumas empresas têm ensinado essa integração internamente, o que tem facilitado a expansão e adequação às práticas conjuntas dessas duas metodologias (SALAH; RAHIM e CARRETERO, 2010).

A abordagem *Six Sigma* oferece um conjunto de ferramentas para identificação, medição e análise de problemas e o sistema *Lean* preconiza a adoção de técnicas e procedimentos que tornam o modo de produção mais competitivo. Portanto, enquanto o *Six Sigma* é voltado para o diagnóstico, análise e planejamento, o *Lean* ajuda a reconfigurar o modo de operar de um sistema de produção.

2.3.1 Gestão de Projetos *Lean Six Sigma*

A fase mais importante do *Lean Six Sigma* é o seu início, pois existem aspectos que são essenciais no processo de inserção do programa nas organizações. Entre os principais fatores que podem assegurar a eficácia do método destaca-se o comprometimento da gerência com o programa, em virtude da necessidade da alocação de recursos que sustentem sua manutenção.

Outro fator relevante é a mudança cultural, pois a implementação do *Lean Six Sigma* exige ajustes na cultura da organização e uma nova atitude dos funcionários que devem se sentir continuamente motivados para os desafios e o rigor que o programa impõe, em especial, no que se refere à coleta e mensuração dos dados dos processos (ANTONY, 2004).

Considera-se também como um fator decisivo para iniciar uma gestão *Lean Six Sigma*, a necessidade de existir uma infraestrutura organizacional adequada e que assegure a

introdução, desenvolvimento e continuidade do programa nas empresas (WIPER; HARRISON, 2000). Os projetos são derivados da ação e dinamismo do ambiente sobre a orientação estratégica e missão, que direcionam a formulação da estratégia competitiva e a definição dos objetivos e metas operacionais.

O gerenciamento de projetos nos moldes do *Lean Six Sigma* deu mais foco para as atividades e possibilitou um maior comprometimento das pessoas pelo fato de os projetos serem formalizados por meio de contrato celebrado entre membros de uma equipe composta por profissionais de níveis hierárquicos e funções diferenciadas (ROTONDARO, 2002).

A formação e capacitação de uma equipe de especialistas é necessária, com identificação própria (*master black belts, champion, black belts e green belts*) para compor um grupo dos profissionais mais aptos para desenvolverem e promoverem o crescimento do desempenho do negócio, aplicando métodos de redução de perdas e desperdícios e técnicas estatísticas para implementarem projetos definidos e/ou direcionados estrategicamente.

Goh (2002) aponta que a implementação dos projetos *Lean Six Sigma* está atrelada a problemas interfuncionais e multidisciplinares, e embutem uma forma fértil de se gerar e enriquecer ideias e técnicas, tendo o pensamento estatístico como um denominador comum. Usar uma abordagem orientada para dados e projetos é uma característica fundamental que aumenta a habilidade de reconhecer, descrever, gerenciar, controlar e mesmo utilizar a variação existente nos diversos processos.

2.3.2 Principais Ferramentas Comuns entre as Metodologias

O sucesso que as empresas conseguem com a utilização da metodologia *Lean Six Sigma* deve-se principalmente ao uso de poderosas ferramentas que, aplicadas em situações

específicas e de maneira correta, proporcionam um significativo auxílio à melhoria dos sistemas administrativos e de manufatura, à gestão da qualidade e ao gerenciamento de processos.

Entre as ferramentas mais usadas, mostradas na tabela 2.2, destacam-se o Diagrama IPO (*input, processo, output* – entradas, processo, saídas), para a identificação de problemas; as Provas de Significância Estatística (Teste-F, Teste-T e Análise de Variância), para definição do problema e análise da causa-raiz; os Diagramas Espinha de Peixe, análise de causas-raiz e previsão de resultados e os Mapas de Processos, para visualização de defeitos e aperfeiçoamento do processo.

Etapa	ATIVIDADES & FERRAMENTAS
DEFINIR	Identificação do Problema Escolha do Projeto Plano de Projeto IPO (Processo) VOC/CTQ Fluxogramas Indicadores do Estado Atual
MEDIR	Avaliação de Sistemas de Medição Box Plot Planilhas de Coletas de Dados Histogramas Diagrama de Pareto
ANALISAR	Brainstorming Diagrama de Causa & Efeito Teste de Hipóteses Análise de Regressão Análise de Causas Raízes Diagrama Espinha de Peixe
MELHORAR	Matriz de Priorização Mapa de Processos 5 Porquês
CONTROLAR	Validação Cartas de Controle Gráficos “Antes X Depois” Padronização

Tabela 2.2: Ferramentas básicas nas fases DMAIC.
(Fonte: MARCONDES, 2012)

Segundo Júnior (2007), As representações gráficas são importantes para permitir a visualização imediata do conjunto de dados, além de evidenciar as relações existentes entre os atributos ou variáveis observadas. Este tipo de recurso é geralmente característico da segunda fase da metodologia DMAIC, ou seja, a fase medir.

As ferramentas usadas em *Lean* e *Six Sigma* não foram todas inventadas nessas metodologias, mas elas foram usadas para estruturar a forma de cada metodologia. Ambas podem conviver em uma mesma caixa de ferramentas, onde certamente uma ferramenta pode ser usada mais do que outra, dependendo da natureza do problema ou oportunidades encontradas.

Através da união das duas metodologias, são identificados caminhos para melhorar simultaneamente, de maneira significativa, custos, qualidade, variabilidade e lead time (*LEAN SIX SIGMA INSTITUTE*, 2008 apud SALAH; RAHIM e CARRETERO, 2010).

A metodologia Seis Sigma traz melhorias de processo, ganhos de produtividade e principalmente, maior rentabilidade e redução de custos. Portanto, *Lean Six Sigma* é uma metodologia que visa a melhoria de processos baseada na utilização de dados para identificar problemas em uma determinada sequência operacional.

3 PERFURAÇÃO DE POÇOS

Um poço de petróleo ou gás é executado visando atingir camadas litológicas no subsolo que contêm estas matrizes energéticas. Para isto, são realizados estudos geológicos e estratigráficos buscando inferir o local com maior possibilidade de acerto, uma vez que os mesmos chegam a custar algumas dezenas de milhões de dólares.

Os poços são perfurados e revestidos, utilizando-se para isto tubos de aço de diâmetros gradativamente menores. Visa-se isolar camadas que possam erodir ou colapsar e impedir a continuidade do poço ou, inversamente, isolar formações que produzam fluidos de alta pressão colocando em risco equipamentos, pessoal e o meio-ambiente. Deste modo, finalmente o poço poderá produzir sem riscos, os hidrocarbonetos presentes na zona de interesse.

Segundo J.J. Azar (2004), o processo de extração de petróleo teve início 1859 com a perfuração do poço do Coronel Drake. A exploração desse poço foi realizada através da técnica de perfuração por percussão, onde se utilizou uma sonda percussiva. Nesse método, um peso ou broca, é movimentado alternadamente para cima e para baixo, golpeando as rochas e avançando na perfuração. Esse sistema apresentava baixas taxas de penetração, bem como limitações quanto às profundidades alcançadas.

A partir de 1920, foi iniciada a utilização do método de perfuração rotativo com injeção de fluido, método largamente utilizado até hoje. Ele consiste em rotacionar uma coluna de perfuração, aplicando peso sobre uma broca em sua extremidade para permitir o avanço dessa coluna de perfuração. Tal broca possui jatos através dos quais um fluido de perfuração é projetado para transportar os fragmentos das rochas cortadas até a superfície (BOMMER, 2008).

Atualmente, há um notável reconhecimento da relevância da etapa de perfuração de poços, responsável por gerar os mais altos custos de operações dentro da cadeia produtiva petrolífera por mobilizar grandes quantidades de capital e oferecer riscos consideráveis ao meio ambiente e às condições de trabalho dos funcionários.

3.1 Principais Equipamentos de uma Sonda de Perfuração

A operação de perfuração de poços é realizada por sondas de perfuração que possuem várias estruturas que podem ser divididas nos seguintes sistemas, descritas com detalhes posteriormente:

- Sistema de Sustentação de Cargas
- Sistema de Movimentação de Cargas
- Sistema de Rotação
- Sistema de Circulação de Fluidos
- Sistema de Monitoramento
- Sistema de Segurança
- Sistema de Geração de Energia

3.1.1 Sistema de Sustentação de Cargas

- Mastro: Sustenta o peso das colunas de perfuração e de revestimento, fornecendo também uma altura suficiente para o manuseio dos tubos içados (Figura 3.1).
- Estaleiro: Espaço da locação reservado para armazenar os tubos a serem utilizados ou substituídos durante a perfuração do poço. Os tubos estaleirados ficam sobre vigas que permitem o seu içamento para a área do mastro.

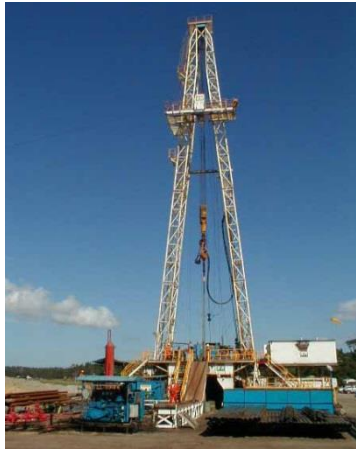


Figura 3.1: Mastro de sonda de perfuração.
(Fonte: <http://dc100.4shared.com/doc/yWymcn0i/preview.html>)

3.1.2 Sistema de Movimentação de Cargas

- **Cabo de Perfuração:** É o cabo que será enrolado ou desenrolado para permitir a movimentação de equipamentos móveis.
- **Guincho:** Responsável por enrolar ou desenrolar o cabo de perfuração com velocidade controlada.
- **Bloco de Coroamento:** Bloco fixo na parte superior do mastro formado por um conjunto de polias por onde passa o cabo de perfuração.
- **Catarina:** Responsável por sustentar diretamente os tubos a serem descidos no poço e permitir a movimentação para cima e para baixo no mastro (Figura 3.2).
- **Gancho:** Realiza a ligação das cargas a serem suspensas à catarina, tendo a função de absorver eventuais choques que possam acontecer.



Figura 3.2: Catarina.

(Fonte: <http://dc100.4shared.com/doc/yWymcn0i/preview.html>)

3.1.3 Sistema de Rotação

- **Cabeça de Injeção ou Swivel:** O *swivel* está ligado diretamente ao Top Drive em sua parte inferior e, como visto no sistema de sustentação de cargas, também está ligado à catarina em sua parte superior. Seu objetivo é fazer a ligação entre elementos não rotativos com rotativos.
- **Top Drive:** O *Top Drive* é basicamente um motor capaz de gerar rotação, ficando posicionado abaixo do *swivel* convencional. Para suportar o torque reacional da rotação da coluna, o *Top Drive* desliza sobre dois trilhos fixados ao mastro da sonda, como observado na figura 3.3. As vantagens deste equipamento são a possibilidade de adicionar três tubos de uma só vez à coluna de perfuração, tornando-a mais rápida e eficiente, e a possibilidade de descer e subir a coluna rotacionando e circulando fluido de perfuração, durante manobras.



Figura 3.3: Top Drive.

(Fonte: <http://cruisertopdrive.en.ecplaza.net/top-drive-system-rental--166733-822216.html>)

3.1.4 Sistema de Circulação de Fluidos

- Tanques de Lama: Responsáveis por armazenar o fluido de perfuração que será injetado na coluna de perfuração.
- Bombas de Lama: Responsáveis por bombear o fluido de perfuração.
- Tubo Bengala: Tubo disposto na vertical que leva o fluido que sai da bomba de lama de perfuração até a altura do mastro da sonda.
- Subsistema de Tratamento: Responsável por tratar os fluidos que retornam pelo anulas junto com os cascalhos perfurados. Composto por peneira vibratória, equipamentos de remoção de sedimentos e centrífugas.

3.1.5 Sistema de Monitoramento

Formado basicamente pelo painel do sondador. Este painel apresenta informações de parâmetros de perfuração, como o peso sobre a broca (WOB – weight on bit), rotação do Top Drive (RPM), torques, pressão de bombeio, vazão das bombas, entre outros, como mostrado na figura 3.4.



Figura 3.4: Painel do sondador.
(Fonte http://www.tecnicodepetroleo.ufpr.br/apostilas/engenheiro_do_petroleo/perfuracoes.pdf)

3.1.6 Sistema de Segurança

- **Cabeça do Poço:** Representa a parte superior do poço, logo acima da superfície ou leito submarino, no caso de poços offshore, e é composta por diversos equipamentos responsáveis pela ancoragem e vedação das colunas de revestimento.
- **BOP (*Blowout Preventor*):** O BOP é um equipamento fundamental para a segurança de uma operação. Sua finalidade é permitir o fechamento do poço em situações de emergências como *kicks* ou *blowouts* (Figura 3.5).



Figura 3.5: Blowout Preventor.
(Fonte: http://www.shanglin-oilfield.com/pro_info.asp?id=41)

3.1.7 Sistema de Geração de Energia

A energia necessária para o funcionamento inteiro de uma sonda de perfuração geralmente é fornecida através de motores a diesel.

3.2 Coluna de Perfuração

A coluna de perfuração é o conjunto formado por comandos de perfuração, tubos de perfuração e substitutos, estabilizadores, escareadores (*reamers*), equipamento de absorção de choques (*shock sub*), ferramentas de monitoramento, em tempo real, como MWD, LWD, PWD, alargadores (*under reamers*) e, na sua extremidade, a broca.

Esse conjunto tem a função de transmitir rotação à broca, aplicar e a manter peso sobre a mesma, e viabilizar, no seu interior, o fluxo do fluido de perfuração que parte desde a cabeça de injeção (*swivel*) até a broca, retornando pelo anular. A transmissão da rotação pode ser feita pela mesa rotativa ou pelo top drive. A coluna de perfuração está sujeita a muitos esforços dinâmicos, desde condições oceano-meteorológicas, torção, flexão, força normal e força cortante.

A seguir, estão descritos cada componente de uma coluna de perfuração:

- Os *Drill Collars* (DC), ou comandos de perfuração, são tubos de aço de elevada espessura colocados logo acima da broca para fornecer grande peso sobre a mesma assegurando melhor controle da trajetória do poço e podem ser visualizados na figura 3.6. No caso de uma parada, se os comandos estiverem em frente à zona permeável, pode ocorrer prisão de coluna por diferencial de pressão. Para evitar esta anormalidade utiliza-se um tipo de comando espiralado. A existência destas espirais evita que toda superfície dos comandos esteja em contato com a parede do poço minimizando assim o risco deste tipo de problema, uma das causas mais comuns de tempo não produtivo de sonda para operações de perfuração.



Figura 3.6: Drill Collars.
(Fonte: <http://www.chinaoilequipments.com/Drilling-Production/Drilling-tools/spiral-drill-collar.1099.htm>)

- Os *Heavy Weight Drill Pipes* (HWDP) ou tubos pesados (figura 3.7), apresentam um diâmetro inferior comparando com os comandos. Esses tubos são responsáveis por formar uma transição de rigidez na coluna de perfuração entre os

comandos e os *drill pipes* que são ligados imediatamente acima destes. Essa transição reduz a possibilidade de existência de falha por fadiga. Os tubos pesados possuem maior espessura de parede, uniões mais resistentes e revestidas de metal duro e o reforço central no corpo do tubo revestido de metal duro quando comparados aos tubos de perfuração (Bourgoyne et al., 1991).



Figura 3.7: Heavy Weight Drill Pipes.
(Fonte: <http://www.chinaoilequipments.com/Drilling-Production/Drilling-tools/spiral-drill-collar.1099.htm>)

- Os *Drill Pipes* (DP) ou tubos de perfuração (figura 3.8), fazem a conexão dos tubos pesados (*Heavy Weight Drill Pipe*), resinados internamente visando a redução de

eventual desgaste e corrosão. Estes se estendem da conexão com os HWDP até a altura da mesa rotativa. Quanto à rigidez, esses apresentam menores valores comparando-os com os comandos e tubos pesados.



Figura 3.8: Drill Pipes.

(Fonte: <http://www.rockdrillbits.org/drill-pipes-p-211.html>)

Em todos esses três grupos de tubos de perfuração as conexões (*tool joints*) são todas semelhantes, numa extremidade pino e noutra caixa, ambas contendo roscas cônicas. Estes tubos podem apresentar falhas derivadas de fadiga, ranhuras, sulcos, corrosão e tração.

A coluna de perfuração é constituída também por elementos acessórios como os substitutos, os estabilizadores, os alargadores e os amortecedores de vibrações.

- Substitutos: Possuem diversas funções, tais como:
 - Movimentar os comandos, pois possuem a seção superior com diâmetro externo igual a dos tubos de perfuração para facilitar a adaptação do elevador (sub de içamento);

- Conectar a broca, sendo que as conexões ao primeiro e a broca são todas pino (sub da broca);
- Conectar tubos de diferentes roscas e diâmetros, podendo ser tipo caixa-pino, caixa-caixa e pino-pino (sub de cruzamento).

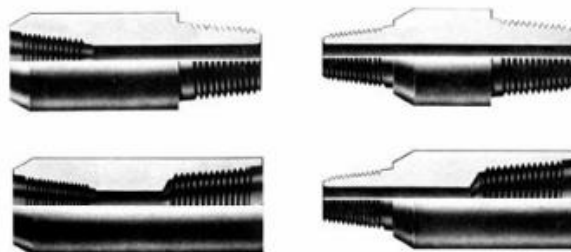


Figura 3.9: Substitutos.

(Fonte: http://www.tecnicodepetroleo.ufpr.br/apostilas/engenheiro_do_petroleo/perfuracoes.pdf)

- Estabilizadores: São ferramentas que servem para centralizar a coluna de perfuração, conferindo maior rigidez e afastando os comandos das paredes do poço. Também ajuda a manter o poço calibrado. Seu posicionamento na coluna é importante na perfuração direcional, controlando a variação da inclinação (Figura 3.10).



Figura 3.10: Estabilizador.

(Fonte: http://www.tecnicodepetroleo.ufpr.br/apostilas/engenheiro_do_petroleo/perfuracoes.pdf)

- BHA: O conjunto de fundo de poço, mais conhecido como BHA ou *bottomhole assembly*, é o conjunto de todos os equipamentos presentes na porção mais baixa da coluna de perfuração, englobando a broca, o substituto da broca, motor de

fundo (para certos casos), estabilizadores, comandos, tubos pesados de perfuração e crossovers. O BHA deve proporcionar a força necessária para que a broca quebre a formação (peso na broca), possuir resistência para um ambiente mecânico hostil e permitir ao sondador, um alto controle direcional do poço. Muitas vezes, o BHA pode possuir motor de fundo, equipamentos de perfuração direcional e equipamentos de medição de parâmetros, como MWD (measurements-while-drilling) e LWD (logging-while-drilling), entre outros equipamentos específicos. O BHA pode apresentar várias configurações possíveis, conforme o tipo de poço e trajetória.

- *Down Hole Motors* (Motores Hidráulicos de Fundo): Para as possíveis configurações de BHA com o objetivo de perfuração direcional, o motor hidráulico de fundo é uma ferramenta de deflexão operada hidraulicamente através do fluido de perfuração e proporcionam um meio de girar a broca sem girar a coluna de perfuração. Usando esta particularidade, um *bent sub* (sub torto) é colocado no topo da ferramenta e por orientação deste sub, a mesma é posicionada para a direção proposta. A coluna é mantida parada na direção que se quer e um contínuo *build-up* é construído até um ângulo pré-calculado. Estes motores são constituídos basicamente de quatro partes: uma válvula tipo *by pass* (*dump valve*), a qual permite a drenagem da coluna durante as manobras, um motor de estágios (*stage motor section*) contendo o rotor e o estator de borracha, uma haste de conexão (*connecting rod section*), contendo uma junta universal isolada do fluido de perfuração através de uma camisa de borracha, o rolamento e uma haste motriz (*bearing and drive shaft section*) incluindo o bit sub conectando à haste. Esta ferramenta produz torque. Consequentemente, uma reação contrária tenderá a girá-la em sentido oposto. O torque é manifestado na coluna através de um giro à

esquerda. Este torque depende de alguns fatores tais como vazão, dureza da formação, peso sobre a broca, penetração e tipo de broca usada.

- *Rotary Steerable System*: Dentre os equipamentos de perfuração direcional presentes no BHA, o mais largamente utilizado na indústria atualmente é o Sistema Direcional Rotativo, ou *Rotary Steerable System* (RSS), mostrado na figura 3.11. Este equipamento emprega o uso de ferramentas específicas no fundo do poço que substituem o uso de ferramentas tradicionais, como o motor de lama. Eles são geralmente programados pelo engenheiro de direcional, que transmite comandos utilizando equipamentos específicos que enviam sinais elétricos da sonda. A ferramenta de RSS responde aos comandos recebidos, ajustando sua trajetória na direção desejada. Em resumo, o *Rotary Steerable System* consiste em uma ferramenta de fundo de poço responsável por perfurar direcionalmente a partir de uma rotação lhe imposta na superfície, eliminando a necessidade de deslizamentos como para motores de lama. A rotação contínua da coluna de perfuração permite um maior transporte de cascalhos para a superfície resultando em um melhor desempenho hidráulico, permitindo que trajetórias de poço cada vez mais complexas sejam perfuradas. Além disso, permite o alcance de direções mais firmes, com menos tortuosidades, o que leva a uma geometria menos agressiva e a parede do poço é mais suave se comparada a perfuração com motor. À medida que os reservatórios encontrados estão em zonas cada vez mais remotas, esta tecnologia irá permitir um maior número de poços economicamente viáveis.



Figura 3.11: Rotary Steerable System.
(Fonte: IADC News, 2014)

- Brocas: Na extremidade da coluna de perfuração é onde se localiza a broca. Ela é responsável por causar fragmentação da rocha devido ao movimento rotativo que lhe é transferido. As brocas com partes móveis englobam as brocas integrais de lâmina de aço, as brocas de diamantes naturais e artificiais, chamadas de PDC. As brocas com partes móveis são geralmente formadas por uma estrutura cortante de três cones que giram em torno de um eixo próprio, sendo por isso, comumente chamadas de brocas tricônicas. Há ainda casos de brocas especiais, de acordo com a finalidade da broca, como alargamento ou testemunho, quando se deseja alargar o diâmetro da fase perfurada e quando se deseja obter uma amostra de rocha, respectivamente.



Figura 3.12: Brocas PDC, Tricônicas e de testemunho).
(Fonte: http://www.shanglin-oilfield.com/pro_info.asp?id=41)

3.3 Construção de Poço

A perfuração de um poço de petróleo é feita baseada na janela operacional traçada para a formação rochosa a qual se pretende perfurar. Ela é representada por um gráfico de Gradiente de Pressão (lb/gal) x Profundidade (m), e possui dados de geopressões na área de interesse. A partir dela é possível realizar o esquema de assentamento de sapatas e definir os critérios de construção de poço.

A obtenção da janela operacional permite calcular o limite máximo de peso de fluido que pode ser utilizado no fundo do poço durante sua perfuração, evitando-se a fratura da formação e, o limite mínimo para evitar a ocorrência de kicks durante a operação. Além disso, a janela operacional é a principal aliada no assentamento das sapatas, visto que sua interpretação correta permite determinar as profundidades para o assentamento das mesmas.

A Janela Operacional pode ser obtida a partir da estimativa dos gradientes de sobrecarga, colapso, fratura e poros, podendo ser determinada plotando-se um gráfico de profundidade vs. Gradiente de pressão, sendo eles principalmente, sobrecarga, poros e fratura, como mostrado na figura 3.13.

Com a obtenção das curvas destes gradientes, pode-se dar início à definição do design de construção dos poços, sendo necessário estabelecer alguns critérios de segurança. São eles: *kick tolerance* e *trip margin*.

- Margem de Riser

Margem de Riser é o acréscimo na densidade do fluido de perfuração de modo a compensar a hidrostática dentro do poço caso aconteça uma desconexão de riser.

- Critério de *Trip Margin*

O critério de *Trip Margin* representa a tolerância aumentada do gradiente de poros, em peso de lama, permitindo assim, um menor peso de lama efetivo nas manobras de coluna. O *Trip Margin* adotado para construir a janela operacional foi de 0.5 ppg adicionais ao gradiente de pressão de poros.

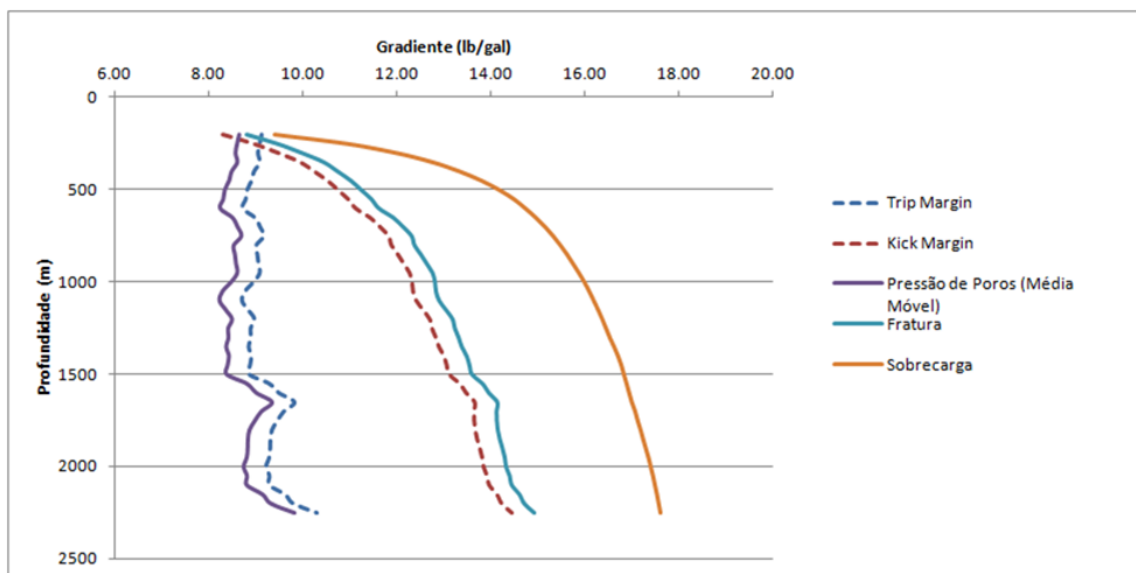


Figura 3.13: Janela operacional.
(Fonte: Próprio autor)

Para determinar as profundidades de assentamento de sapatas, é necessário traçar uma reta partindo da profundidade final até chegar verticalmente à curva de gradiente de pressão de fratura. Nesta profundidade, deve ser assentada uma sapata. Para assentar as próximas sapatas, este procedimento deve ser repetido partindo sempre da profundidade da sapata anterior. O limite inferior considerado é o gradiente de pressão de poros acrescido da margem de 0.5 ppg e o limite superior, o gradiente de pressão de fratura. A reta vertical indica o peso de lama máximo permitido para cada fase de perfuração, evitando a fratura da formação no ponto mais fraco, no ponto de limite máximo. Nesta profundidade, uma sapata deve ser assentada, indicando que, para as seções superiores, aquele peso de lama não deve ser utilizado e requer o assentamento de um revestimento para proteger o poço.

3.4 Fases de um Poço

Cada sapata assentada pode ser representada por fases correspondendo a diâmetros de broca e respectivos revestimentos. A depender do tipo, trajetória de poço e reservatório estas podem variar conforme a especificidade de cada projeto. A seguir, é apresentada uma possível sequência simplificada das fases de perfuração de um poço offshore.

1. Fase de condutor: Em perfuração marítima, esta fase pode ser perfurada utilizando o alargador de 36", descido e cimentado o revestimento condutor de 30", ou ainda jateada quando solo marinho possuir baixa resistência e o seu revestimento condutor de 30" cravado. O fluido de perfuração usado é água do mar e este retorna para o leito marinho. Os cascalhos são descarregados ao fundo marinho não existindo retorno de lama para sonda. Os diâmetros típicos dos revestimentos são: 30", 20" e 13 3/8".

2. Fase de superfície: nesta fase o revestimento do poço é cimentado em toda sua extensão para evitar a flambagem devido ao elevado peso dos equipamentos de segurança do poço e dos revestimentos a serem assentados nas próximas fases. O fluido de perfuração usado é água do mar. Os cascalhos são atirados ao fundo marinho não existindo retorno de lama para sonda. Os diâmetros típicos dos revestimentos são: 20", 18 5/8", 16", 13 3/8", 10 3/4" e 9 5/8".
3. Fase intermediária: Nesta fase registra-se a descida e o assentamento do BOP (blowout preventor), que é um equipamento fundamental para segurança das operações de perfuração e para todo pessoal na plataforma. O poço está conectado com a sonda e o fluido de perfuração retorna pelo anular para as peneiras fechando o ciclo injeção, retorno, tratamento e injeção. Pode ser exaltado que esta fase tem como objetivo o isolamento e proteção de zonas de alta ou baixa pressões, zonas de perda de circulação, formações mecanicamente instáveis, formações com fluidos corrosivos ou contaminantes para o fluido de perfuração. Os diâmetros típicos de revestimento pode ser 13 3/8", 9 5/8" e 7".
4. Fase de produção: Nesta fase, a perfuração atinge o reservatório e neste intervalo produtor, deve-se ter cuidado com o tipo de fluido para evitar danos à formação. O poço pode ser mantido aberto em condições em que hajam formações competentes ou com uma tela de contenção de areia em formações inconsolidadas. Os diâmetros típicos dos revestimentos podem ser 9 5/8", 7" e 5 1/2".

As fases de perfuração de poço de petróleo dependem de vários fatores como: o tipo das formações a serem perfuradas, dados de correlação (explicando a profundidades onde ocorreram problemas, por exemplo), gradientes de pressão, custos, entre outros. Um exemplo de esquema de poço padrão pode ser representado a seguir de acordo com o esquema de assentamento de sapatas de sua janela operacional, pela figura 3.14:

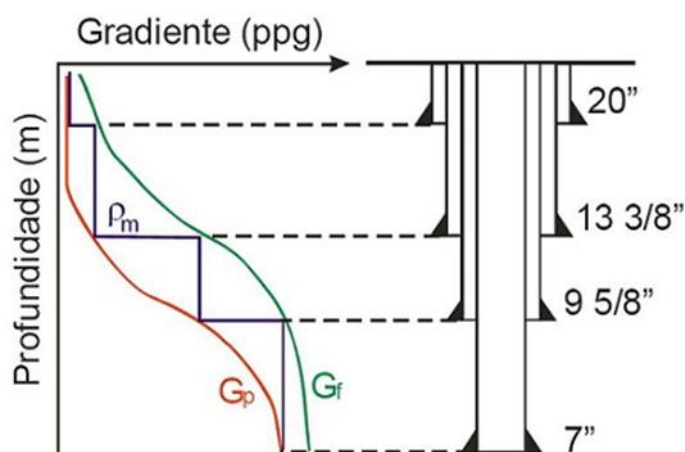


Figura 3.14: Esquema de poço com assentamento de sapatas.

(Fonte: http://www.gtep.civ.puc-rio.br/Hidraulica_de_pocos.aspx)

3.5 Operações de poço

A perfuração das fases de um poço é composta por uma série de rotinas de procedimentos padrão à medida que se vai avançando para horizontes mais profundos. Mais adiante nesta seção, se fará uma descrição sucinta destas rotinas, destacando-se as principais operações presentes durante a perfuração de um poço, assim como a sequência em que elas costumam ser realizadas no tempo.

3.5.1 Principais operações

- **Manobra:** é uma operação que visa a descida ou retirada parcial ou completa da coluna de perfuração de poço. Por exemplo, faz-se manobra para:
 - Troca de broca desgastada ou por outra adequada a formação ou ainda a fase que se iniciará;
 - Retirar a coluna até a sapata mais próxima para verificação das condições de poço (manobra curta);
 - Descida de equipamento de perfilagem;
 - Testemunhagem;
 - Pescaria;
 - Efetuar conexões;
 - Troca de equipamento do BHA.
- **Conexão:** é operação que se caracteriza pelo acréscimo de tubos de perfuração à coluna de perfuração depois que perfurou-se toda a profundidade dos tubos conectados. O top drive é elevado até o primeiro tubo de perfuração aparecer e coloca-se a cunha. Desconecta-se o top drive da coluna e conecta-se ao tubo de perfuração a ser adicionado, e seguidamente eleva-se o conjunto top drive e tubo de perfuração, conecta-se novamente a coluna e retira-se a cunha e desce-se a coluna para voltar a perfuração de novos trechos.
- **Circulação:** é efetuada para garantir a limpeza do poço durante a perfuração. Quando existir indícios de acúmulo de cascalho no espaço anular podendo causar eventual prisão da coluna de perfuração. Pode ainda existir fatores que levam a intervalos de circulação, como sendo para:
 - Manter a limpeza no poço;

- Garantir uma retirada da coluna de perfuração em segurança evitando pistoneio;
 - Condicionamento para descida do revestimento;
 - Restabelecer a rotação (em caso de perda desta - ameaça de prisão - no decorrer na perfuração);
 - Troca de fluido;
 - Cimentação;
 - Lavar fundo falso;
 - Eliminar excesso de torque e arraste;
- Alargamentos e repasses (*backreaming*): os repasses são feitos para manter os trechos em boas condições para que os revestimentos, perfis de perfilagem, coluna de pescaria e demais componentes do BHA possam passar sem problemas no diâmetro planejado no projeto de poço. Esta operação, mais conhecida como *backreaming* consiste basicamente na retirada parcial da coluna com rotação e bombeio, a fim de realizar a retirada dos cascalhos (limpeza do poço). Esta operação é feita com alargador que se encontra acima da broca, e normalmente é caracterizado por baixo peso e baixa rotação na broca para evitar seu desgaste prematuro.
 - Repassa-se na retirada quando houver indícios de resistência (por exemplo, acunhamento);
 - Repassa-se na descida quando há intervalos que ofereçam resistência (por exemplo: topamento);
 - Repassa-se quando há ameaça de prisão;
 - Repassa-se para cortar a pega de cimento.
 - Cimentação: é uma operação que consiste no bombeio de uma pasta de cimento para o preenchimento do espaço anular entre a tubulação do revestimento e as

paredes do poço, isto fará com que não haja migração de fluidos das formações perfuradas. A cimentação é executada depois da descida da coluna de revestimento e se repete o mesmo procedimento conforme o número de fases projetadas para o poço. Antes de qualquer operação de cimentação deve-se condicionar ou fazer a circulação no poço (normalmente em períodos de duas horas ou mais) para resfriá-lo e assegurar uma boa pega da pasta de cimento. Recomendam, as boas práticas de perfuração, cortar o tampão de cimento usando um BHA com broca lisa. O BHA é descido sem os aparelhos acessórios (MWD, estabilizadores, etc.), pois o efeito da vibração provocada pela ação mecânica da broca pode danificar estes equipamentos. No entanto, por razões de redução do tempo de manobras nas operações, é comum usar-se uma BHA com todos os equipamentos no início da perfuração. A broca corta o primeiro o tampão de cimento e prossegue com a perfuração.

- Teste de absorção (*Leak Off Test*) – é efetuado no trecho imediatamente abaixo da sapata para determinação da pressão de fratura da formação. Durante o teste bombeia-se o fluido de perfuração para que a pressão possa ser incrementada gradualmente. O processo é monitorado até que se atinja uma pressão para qual o fluido entra na formação, é esta a pressão de fratura. O resultado deste teste determina o peso máximo que o fluido deve ter durante a perfuração dessa fase. Por razões de segurança operacional o peso do fluido é mantido ligeiramente abaixo da pressão obtida no teste. O teste de absorção também serve para avaliar a qualidade da cimentação na sapata quando possível deve-se deixar aberta a comunicação do anular entre o revestimento descido e o anterior (Siqueira, 1989). Este teste também é conhecido como teste de integridade a pressão (*Pressure Integrity Test*).

- **Perfilagem:** é uma operação que consiste na descida de ferramentas com o objetivo de medir as características ou propriedades da rocha (porosidade, permeabilidade, nível de saturação em fluidos, argilosidade, fraturas etc.) inspecionar o diâmetro do poço (por exemplo: o *caliper*), verificar a qualidade de cimentação, etc. De uma maneira geral a perfilagem contribui para o melhor conhecimento das formações atravessadas e do tipo de fluidos contidos no meio poroso respectivo – avaliação das formações. Na perfuração de um poço piloto curto quando a inclinação é inferior a 55° não realiza-se perfilagem a cabo visto que, os equipamentos de perfilagem a cabo têm grandes dificuldades em descer. Os dados são coletados pelos MWD e LWD. A perfilagem a cabo faz-se geralmente em poços pilotos longos.
- **Downlink:** Realizada em perfurações direcionais, consiste no ajuste de parâmetros a serem feitos no BHA, como ângulo, peso na broca, rotação de coluna, entre outros, com o intuito de manter a trajetória prevista no poço. Esta operação é viabilizada através de ferramentas de perfuração direcional específicas que se encontram na extremidade do BHA e recebem pulsos elétricos enviados por comandos da sonda, através do bombeio de fluido, que interpretam os ajustes necessários para que a trajetória seja sempre ajustada.
- **Testemunhagem:** Para uma melhor avaliação da formação para além dos dados indiretos fornecidos pela perfilagem existe a necessidade de análise de amostras. A testemunhagem se faz descendo uma broca específica vazada com dois barriletes um externo que gira com a coluna outro interno onde se vai alojar a amostra. À medida que a coroa avança, o cilindro da rocha não perfurada é encamisado pelo barrilete interno e em seguida içado até a superfície. A testemunhagem é feita geralmente com uma broca de 8½" para garantir uma colheita mais confiável do testemunho sem grandes perturbações da formação.

- Pescaria: é uma operação que consiste em recuperar objetos que tenham caído no fundo do poço ou tenham ficado aprisionados nele.

3.5.2 Sequência operacional

A perfuração de um poço segue uma sequência de operações em que o fim de uma dita o início imediato da próxima. O entendimento desta lógica sequencial é importante para o estudo de problemas de poço, pois é conhecendo as atividades normais que se pode ter experiência identificar eventos anômalos.

- Fase condutor 30" perfurado
 - Movimentação de Sonda;
 - Instalação de linhas de ancoragem ou calibrar Posicionamento Dinâmico;
 - Montagem e descida de BHA de 26" com alargador de 36";
 - Perfurar com BHA de 26";
 - Condicionamento de Poço;
 - Retirada de BHA 26";
 - Descida de Revestimento de 30";
 - Circular para cimentar;
 - Cimentado revestimento de 30";
 - Retirada de coluna de assentamento do revestimento;
 - Aguardar pega do cimento;
- Fase superfície 26"
 - Montagem e descida de BHA de 26";
 - Cortar cimento;
 - Perfurar 10 m com BHA de 26";
 - Circular para teste de absorção;
 - Teste de absorção;

- Perfurar com BHA de 26";
- Condicionamento de poço;
- Descida de revestimento de 20";
- Circular para cimentar;
- Cimentar revestimento de 20";
- Retirada de coluna de assentamento do revestimento;
- Fase intermediária de 17 1/2"
 - Instalação do BOP;
 - Teste de BOP;
 - Montagem e descida de BHA de 17 1/2";
 - Perfurar 10 m com BHA de 17 1/2";
 - Circular para teste de absorção;
 - Teste de absorção;
 - Perfurando com BHA de 17 1/2";
 - Condicionamento de poço;
 - Descida de revestimento de 13 3/8";
 - Circulando para cimentar;
 - Cimentando revestimento de 13 3/8"
- Fase Produção 12 1/4"
 - Montando e descendo BHA de 12 1/4";
 - Cortando o cimento;
 - Perfurando 10 m;
 - Circulando para teste de formação;
 - Teste de formação;
 - Perfuração;
 - Retirando a coluna com BHA 12 1/4";

- Montando e descendo a BHA de 8 1/2" com barrilete;
- Testemunhando;
- Retirando a coluna com BHA 8 1/2" com testemunho;
- Montando e descendo BHA de 12 1/4"
- Fase HP aterrissagem
 - Montagem de BHA de 12 1/4";
 - Descida de BHA 12 1/4";
 - Calibração de BHA 12 1/4";
 - Perfuração direcional;
 - Teste de absorção;
 - Perfuração direcional (até o topo do reservatório);
 - Circulação;
 - Manobra curta (condicionamento do poço);
 - Retirada de BHA 12 1/4";
 - Descida de revestimento de 9 5/8";
 - Circulação
- Fase HP drill in
 - Montagem de BHA 8 1/2";
 - Descida de BHA 8 1/2";
 - Calibração de BHA 8 1/2";
 - Perfurando 8 1/2"(10m);
 - Teste de absorção;
 - Perfurando 8 1/2";
 - Retirada de BHA 8 1/2";

4 LEAN SIX SIGMA NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

As operações de perfuração de poços envolvem um alto risco, financeiro e ambiental. Tendo como base as operações no Brasil, em sua maioria offshore, pode-se afirmar que o desenvolvimento e aprimoramento das técnicas de perfuração têm proporcionado a exploração de hidrocarbonetos em horizontes cada vez mais profundos.

Porém, o avanço tecnológico que permitiu um maior aproveitamento dos campos de petróleo existentes em todo o mundo, tornando possível operações em ambientes remotos e antes inimagináveis, também foi responsável por aumentar os custos intrínsecos a esta atividade.

Atualmente, o preço spot (imediato) do barril de petróleo no mercado internacional está em torno de US\$100,00 (EIA, 2014). Analisando a produção de petróleo nacional é possível concluir que o óleo produzido no Brasil é caro, por estar concentrado sua maior parte em campos offshore.

Isso induz a conclusão de que o retorno financeiro das empresas quanto a exploração de petróleo depende, em grande parte, da redução de custos operacionais. Portanto, fica cada vez mais evidente a importância de investimento em novas tecnologias que tenham como foco a diminuição do custo total de operação.

O investimento em inovação também é uma maneira de as empresas brasileiras superarem os velhos problemas que atrapalham sua competitividade, como alta carga tributária, ausência de infraestrutura e baixa quantidade de mão de obra qualificada. O Brasil tem um problema de formação de preços que é estrutural e a inovação é o que pode fazer a diferença entre as empresas nacionais e estrangeiras.

Neste contexto, a cultura *Lean Six Sigma* surge como uma metodologia revolucionária na indústria de petróleo e gás, capaz de ajudar as empresas a reduzirem os custos de operação com propostas de solução simples e imediatistas, pois ajudam a identificar os pontos de melhoria de um processo e, através da implementação de técnicas específicas, são responsáveis por traçar planos de otimização bem definidos e eficazes.

4.1 *Lean Six Sigma* na perfuração de poços

A perfuração de um poço reúne uma série de operações específicas com o objetivo de atingir uma determinada profundidade numa formação rochosa. Com isso, a identificação de atividades que agregam ou não valor a este processo é bem definida e pode ser identificada facilmente. A seguir, são apresentadas as três possíveis classificações dos tempos de operação de perfuração de acordo com o tipo de atividade realizada:

- Tempos Produtivos: São os tempos de sonda gastos em atividades que trazem progresso direto ao poço, incluindo, por exemplo, perfuração, jateamento e testemunhagem;
- Tempos Não Produtivos: São tempos de sonda gastos com atividades necessárias ao desenvolvimento do poço ou que visem à melhoria de sua qualidade, mas sem produzirem avanço ou aprofundamento do poço, onde se incluem manobras, alargamento, repassamento, circulação, registro de inclinação, orientação do motor de fundo, descida de revestimento, cimentação, perfilagem, testes de formação, etc.;
- Tempos Perdidos (conhecidos como *downtime* na indústria): São tempos de sonda gastos sem avanços do poço e apenas com incorporação de custos, incluindo remediamento de situações inesperadas, restauração de determinada etapa do poço interrompida por força maior, quebra de equipamentos, interrupções das operações para reparos, socorro em acidentes de trabalho, paradas por condições

padrão que assegurem segurança e eficiência no processo. Tais procedimentos fazem parte dos tempos não produtivos, porém essenciais para o sucesso das operações.

Sendo assim, destaca-se a importância de encontrar medidas que trabalhem a fim de minimizá-los, sem afetar a qualidade do resultado final. Além disso, evitar os tempos perdidos, que apenas agrega custos e tempo ao processo, é outro foco a ser discutido com a introdução da metodologia *Lean Six Sigma* na perfuração e poços. Ambos os casos serão abordados neste trabalho e exemplificados com estudos de caso reais no capítulo 5.

4.2 Análise de dados

As informações geradas durante a perfuração de um poço representam bens valiosos para as operadoras de um campo, pois através delas é possível identificar problemas, realizar previsões futuras, fazer análises de performances, entre outros. O desenvolvimento de sensores e sistemas de processamento de dados permitiu medir e registrar informações que abrangem desde parâmetros operacionais da sonda até características geológicas da formação perfurada.

Com todo este desenvolvimento tecnológico, é possível captar os dados para realizar análises, fundamentais para o avanço na melhoria das operações futuras. A análise de dados de perfuração ocorre durante o planejamento de novas operações. Dessa forma, as lições apreendidas através da análise dos dados podem contribuir para a melhoria do processo de perfuração de novos poços.

Um Projeto *Lean Six Sigma* depende expressivamente dos dados gerados durante uma campanha de perfuração. Sem eles, não seria possível identificar os problemas, realizar as análises e tampouco planejar medidas corretivas. O avanço tecnológico na captura dos

dados de operações foi um dos responsáveis por permitir a aplicação do método na indústria de petróleo.

Um dos principais documentos que proporcionam dados de uma operação é o Boletim Diário de Perfuração (BDP). Este documento contém as informações relevantes relativas às operações executadas no dia anterior em um poço, operações estas previstas no Programa do Poço. De acesso controlado e de circulação restrita, normalmente é vetado o seu envio para fora do ambiente das empresas operadoras. Nos BDPs são capturados o avanço das operações de perfuração de um poço de petróleo, sendo cada atividade relacionada a um período de tempo do dia reportado.

Os principais dados reportados em um BDP sob o ponto de vista técnico e econômico da perfuração, são: número sequencial da broca no poço, diâmetro, tipo, número de série, profundidade de saída, metros perfurados, horas de rotação, desgastes IADC, inclinação após à saída, dados de fluidos de perfuração, litologia atravessada, coluna de perfuração utilizada, além de observações relevantes relativas a acidentes e problemas operacionais, que podem afetar a avaliação econômica.

Estas informações detalhadas sobre a operação servem como base para análises das ações levadas a efeito no dia anterior, para a programação de operações de curto prazo, ações corretivas, referência para consulta em poços em desenvolvimento no futuro, e também para o atendimento das exigências de órgãos governamentais.

Além deste, existem boletins complementares que são gerados diariamente para retratar detalhadamente as atividades do poço, como por exemplo o boletim de fluidos, da geologia, da cimentação, do direcional, etc.

A totalidade desses boletins faz parte de uma extensa base de dados que serve para a avaliação final da operação, incluindo análise de tempos, estudos econômicos, desvios de

operação, operações anormais, acidentes de poço, lições aprendidas, avaliação do modelo geológico estabelecido a partir dos perfis geosísmicos e poços de correlação, estabelecimento de diretrizes para a produção do poço ou seu abandono, etc.

A análise de tempos de operação é, assim, de grande importância para a avaliação econômica de projetos de *Lean Six Sigma*, pois ela servirá para direcionar as futuras ações corretivas para o planejamento de novas operações.

4.3 Custos da perfuração de poços

Os custos relacionados às operações de perfuração de poços são constituídos, basicamente, do aluguel de sondas e da contratação de serviços específicos. As empresas produtoras de óleo e gás afretam as embarcações e utilizam os serviços das empresas proprietárias de sondas através de contratos de duração variável.

A empresa que afreta uma sonda é conhecida como a operadora do campo, pois é quem possui direitos exploratórios sobre o bloco e define todas as particularidades relativas à campanha exploratória, como quais poços serão perfurados, localização e especificações dos poços, quais equipamentos serão utilizados, entre outros, durante o período de vigência daquele contrato.

O valor dos contratos é estabelecido em tarifas diárias que, num determinado momento podem variar com a região em que a sonda está operando, com suas características técnicas, com a duração do contrato propriamente dito e com as variações entre oferta e demanda para a contratação de sondas de perfuração.

Para este trabalho, foram consideradas apenas sondas flutuantes, ou seja, semi-submersíveis e navios-sonda. A tabela 4.1 mostra as taxas médias de aluguel diário para e a frota mundial total desses três tipos de sonda de perfuração.

Tipo de Sonda	Lâmina D'água	Frota Total Mundial	Taxa Média Diária (US\$/dia)
Navio Sonda	até 1200m	8 sondas	\$259.000
Navio Sonda	acima de 1200m	99 sondas	\$521.000
Semi-submersível	até 500m	15 sondas	\$297.000
Semi-submersível	de 500m a 1200m	88 sondas	\$350.000
Semi-submersível	acima de 1200m	118 sondas	\$437.000

Tabela 4.1: Taxa média diária de aluguel de sonda por tipo de sonda.
(Fonte: <https://www.rigzone.com/data/dayrates/>, 2014)

Além dos custos dispendidos com o aluguel de sonda de perfuração, para que a perfuração do poço possa ser realizada, a empresa operadora tem necessidade da atuação de inúmeros serviços e equipamentos que ela contrata para serem prestados por outras empresas, terceirizando a realização de determinadas operações.

Esses serviços podem ser segmentados em inúmeras formas, tais como: contratos de perfuração; serviços de perfuração e equipamentos associados, ou seja, atividades e equipamentos de suporte à perfuração, medição e registro; revestimento e completação de poços, preparam os poços para a produção; fluidos de perfuração; brocas; serviços de pescaria; entre outros. Baseando-se em dados de operações offshore, os custos médios de perfuração de poços pode variar de US\$2 a \$6 milhões. A grande variação nos custos depende de fatores como profundidade do poço, trajetória do poço, lâmina d'água e tipos de formações a serem perfuradas. A tabela 4.2 mostra os custos médios estimados a serem dispendidos para a contratação de serviços para perfuração offshore, durante um período de operações de 35 dias.

SERVIÇOS E EQUIPAMENTOS	CUSTOS MÉDIOS (US\$/35dias)
Fluidos, químicos, transporte e combustível	290.000,00
Equipamentos de Serviços e de aluguel	540.000,00
Brocas e Equipamentos Consumíveis	90.000,00
Mão de obra, Engenharia e Supervisão	70.000,00
Revestimento e tubos	190.000,00
Contingências	240.000,00
Plugs e Abandono	100.000,00
TOTAL	1.520.000,00

Tabela 4.2: Custos médios por 35 dias de operação.
(Fonte: Rig Zone, 2014)

4.4 Tempos Perdidos

Através da análise de dados coletados durante uma operação de perfuração, a partir dos boletins diários ou através de outros sistemas, é possível determinar os casos mais recorrentes de tempo de parada de operação.

Estes tempos são mais conhecidos na indústria como *downtimes*, serão tratados neste trabalho como tempos perdidos. Eles ocorrem sempre por causa de algum problema que tenha acontecido durante um processo produtivo, seja ele por falha mecânica de equipamentos, falha humana ou por falta de planejamento de alguma etapa do processo.

Os tempos perdidos representam desperdício de dinheiro e tempo, falhas, excesso de custos, falta de confiabilidade, ineficiências, planos que deram errado e muitos outros elementos desagradáveis de uma operação de perfuração. No entanto, eles também evidenciam e identificam pontos a serem melhorados no processo.

Mais do que em qualquer outra indústria, na indústria do petróleo, os tempos perdidos representam um enorme gasto de dinheiro. Isso se deve ao fato de que as operações não terem nenhum avanço, o que significa horas de aluguel de sonda e equipamentos sendo desperdiçados, e maiores custos demandados para realizar reparos, substituições de equipamentos e manutenções.

Visando um melhor planejamento de custos, os operadores normalmente destinam de 10% a 25% de sua Autorização de Despesas ou, em inglês conhecida como *Authorization for Expenditures (AFE)*, para cobrir eventos inesperados que podem impactar significativamente nos orçamentos de perfuração. Riscos operacionais e técnicos versus o potencial de retorno de investimento são fatores críticos para a determinar se um projeto é rentável.

A seguir, são listadas as causas mais comuns de tempos perdidos observadas em uma operação de perfuração de poços offshore:

- Espera por condições de tempo ou de mar

Esse tipo de espera ocorre quando as condições meteorológicas estão muito adversas e impossibilitam a continuidade das operações. As operações offshore necessitam de condições de mar e tempo específicas para que possam ser executadas, pois se não respeitadas, podem gerar outros problemas mais sérios como quebra de equipamentos ou equipamentos caídos no poço, necessitando pescaria. As condições normalmente avaliadas para que uma operação possa ser realizada são altura e período de onda e a amplitude de seu movimento de *heave* (afundamento).

Este tipo de espera independe da atuação humana, pois não há nenhuma atividade que possa ser feita durante este tempo, resultando em tempo de aluguel de sonda desperdiçado.

- Espera por material

A espera por material reflete as falhas logísticas presentes no planejamento das operações de perfuração de poços. Ela pode ocorrer devidos a alguns fatores como a falta de organização no planejamento das operações, que pode levar a falta de materiais específicos que deveriam chegar a bordo da sonda em uma fase pré-determinada, a falta de comunicação bem sucedida entre os responsáveis, podendo ser interpretada também como um erro humano e a espera de materiais não previstos segundo o escopo de operação original, que pode ter sido solicitado devido à falha do equipamento presente a bordo; para este equipamento de substituição dá-se o nome de *back-up*.

- Pescaria

Pescaria consiste na retirada de equipamentos, materiais ou peças que venham a cair no poço ou a romper-se. A estes equipamentos é dado o nome de “peixe”. Diversas ferramentas são utilizadas nessa operação, pois para cada caso existem equipamentos apropriados. Muitas vezes é necessário realizar o desenho de uma nova ferramenta para que se possa remover o material preso no poço. Tempos perdidos causados por problemas de pescaria costumam durar muito tempo, pois envolvem uma operação inteira de montagem de BHA com os equipamentos específicos de pesca, descida de coluna, circulação para limpeza e retirada de coluna que pode vir ou não com os “peixes” capturados.

Esta incerteza quanto às operações de pescaria determina a demora e desperdício de tempo de sonda relacionadas a este tipo de tempo perdido. Muitas vezes é necessário realizar inúmeras corridas para que todo o material deixado no fundo do poço possa

ser localizado e posteriormente retirado, pois é impossível prosseguir com as operações até que o poço esteja completamente limpo.

Além disso, após a retirada do peixe é necessário realizar testes e inspeções nos equipamentos instalados no fundo do poço como válvulas ou bombas para assegurar que nada foi danificado. Algumas peças, quando caídas no poço possuem baixa resistência e é possível continuar as operações perfurando-as. Outras pequenas e não perfuráveis como dentes, cones de broca, ferramentas de manuseio, rolamento entre outros podem ser removidas do poço por magneto, para retirada de ferro por grande atração, e sub-cesta, colocada acima da broca para que remova pequenas peças de ferro que possam prejudicar o andamento da perfuração. Além de pequenas partes de equipamentos, outro tipo frequente de pescaria em operação de perfuração é a pescaria de tubo de perfuração. A quebra da coluna pode ser ocasionada por torque excessivo ou torção, chamada assim de *twist-off*, ou por problemas de fadiga, devido ao tubo ser manuseado de forma errada, torque impróprio, entre outros fatores.

Outro tipo comum de pescaria é a pescaria de arames, mais conhecido como *slick line*. Para este tipo de pescaria é usualmente utilizado o arpão. Os cabos de arame são utilizados para a realização de perfilagens, canhoneios, entre outros, e podem ser usados em poço revestido ou aberto. Em alguns casos, este material pode romper dentro do poço, caído sobre a ferramenta que estava acoplada nele, causando um amontoado em seu topo. O arpão tem a finalidade de penetrar no emaranhado de cabos com o objetivo de retirar toda a linha.

As operações de pescaria em muitos casos podem ser simples, em outros, podem durar dias ou até meses. Isso gera um custo adicional e não planejado às operações muito alto e nem sempre vale a pena recuperar o peixe. O fator econômico é

determinante para a realização ou não da pescaria. Para saber a viabilidade deste tipo de operação, é feito um estudo de custo da ferramenta que ficou no poço, com o custo diário de pescaria, incluindo o aluguel das ferramentas, o técnico responsável pela mesma e o custo diário de sonda.

Caso não seja viável a operação de pescaria, para não perder o poço, é realizado um desvio de rota e perfurado uma nova trajetória de poço enquanto a parte em que o peixe ficou alocada é abandonada com tampão de cimento (Figura 4.2).

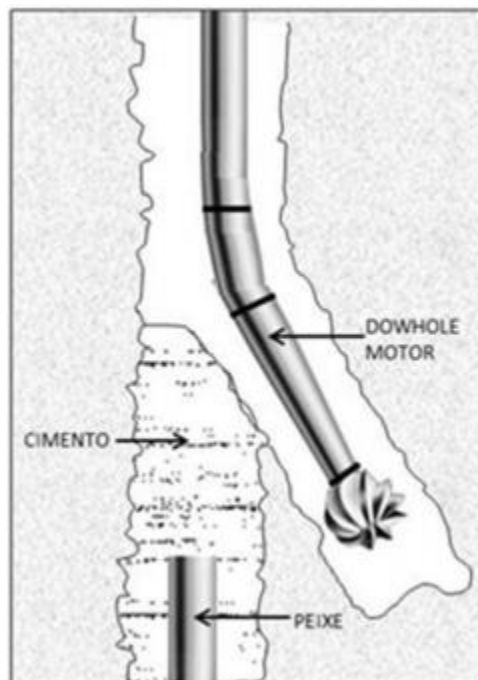


Figura 4.2: Realização de tampão de abandono e desvio de trajetória.
(Fonte: Oilfield Review, 1999)

- Quebra ou reparo de equipamento

Os equipamentos e materiais utilizados em uma perfuração de poços estão sujeitos a estados e condições muito adversas. Com o constante uso, a união de alguns fatores podem ocasionar em falhas desses equipamentos, que demandam tempo e dinheiro para que sejam reparados. Alguns equipamentos presentes na perfuração de poços são tão fundamentais para a realização e determinada operação que estas não podem prosseguir sem que o problema tenha sido reparado ou o equipamento, substituído. Tal fato pode ocasionar horas ou até mesmo dias de espera por reparo de material, ou seja, gastos com aluguel de sonda e equipamentos sendo desperdiçado e custos adicionais com materiais e equipamentos de reparo ou substituição.

A adoção da manutenção preventiva, poderia ser solução ideal para as falhas e defeitos nas máquinas e equipamentos, pois ela consiste em interferir na máquina para providenciar manutenção eficaz, no momento adequado. Tal momento é estabelecido mediante estudo e monitoramento cuidadosos dos vários elementos que intervêm no processo de operação, visando detectar a iminência de uma falha.

- Coluna presa

A prisão de coluna ocorre por diferencial de pressão, quando a coluna de perfuração é presa à parede do poço por um mecanismo de sucção. Esse tipo de prisão ocorre somente frente a intervalos permeáveis da formação. Por esse motivo, a maioria dos fluidos de perfuração utilizados atualmente forma um reboco na parede do poço em formações permeáveis. A pressão hidrostática no poço pode pressionar a coluna de perfuração no reboco contra a parede do poço em trechos onde a pressão da formação seja inferior à pressão interna do poço. Devido ao diferencial de pressão entre poço e formação, sólidos começam a se depositar ao redor da região de contato entre a coluna de perfuração e a parede do poço, e a coluna fica presa. Nesse caso

tem-se que o ECD é muito maior que a pressão de poros da formação. A Figura 4.3 ilustra o mecanismo de prisão de coluna.

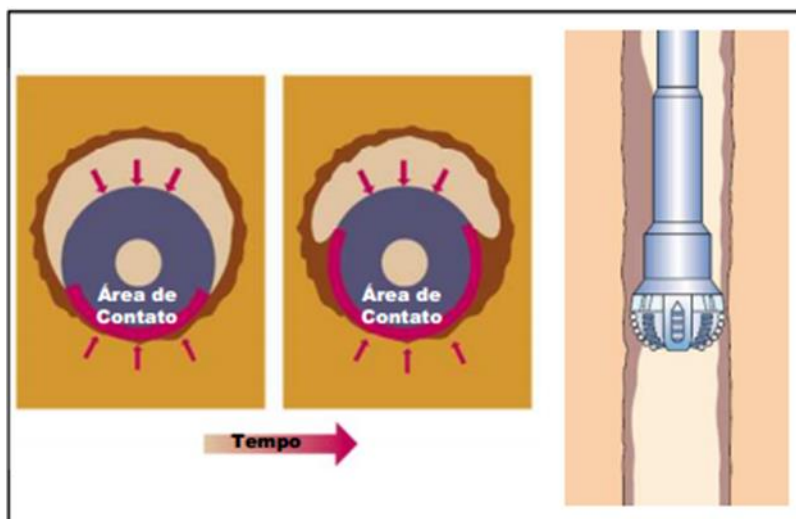


Figura 4.3: Mecanismo de prisão de coluna.
(Fonte: *Oilfield Review*, 1999)

A coluna presa por diferencial de pressão perde os movimentos axiais e radiais, mas continua capaz de circular fluido. A prisão diferencial geralmente ocorre após a parada da coluna de perfuração em frente a intervalos permeáveis para a transmissão de dados das ferramentas de fundo ou para qualquer procedimento que não envolva a perfuração propriamente dita. Se as condições forem muito severas, o tempo gasto na adição de uma nova seção para continuar a perfuração já é suficiente para que a prisão ocorra.

Em poços direcionais a coluna está mais suscetível a ocorrência desse tipo de problema devido ao contato do BHA com a parede do poço em intervalos permeáveis e ao alto peso de fluido muitas vezes necessário para conter as formações expostas.

A intensidade da prisão é proporcional ao diferencial de pressão entre o poço e formação, e também à área de contato da coluna com a parede do poço. Práticas comuns para evitar a ocorrência da prisão de coluna consistem em manter a coluna sempre em movimento vertical ou rotativo, evitar longos períodos de parada da perfuração e acelerar a execução das manobras.

A utilização de comandos de perfuração espiralados é uma ação no sentido de minimizar a ocorrência da prisão. A presença de sulcos helicoidais nos comandos reduz a área de contato com a parede do poço e cria espaço para que as pressões possam ser balanceadas e para que os sólidos possam fluir.

O fluido de perfuração possui um papel fundamental na prevenção desse tipo de incidente. Para evitar a ocorrência da prisão por diferencial, o peso do fluido de perfuração deve ser mantido o mais baixo possível, e as propriedades do fluido devem ser ajustadas de forma a proporcionar um reboco firme.

4.5 Projeto *Lean Six Sigma* na perfuração de poços

Todo projeto tem seu início com a identificação de algum problema ou necessidade de melhoria dentro do processo. Em uma operação de perfuração de poços, a identificação de problemas pode ocorrer com um número recorrente de algum caso de tempo perdido, algum processo ou atividade que esteja demorando mais que a média se comparada a operações anteriores ou, simplesmente, se a performance operacional de alguma atividade está mais baixa do que os valores globais.

Primeiramente, a oportunidade é endereçada a uma lista chamada de Registro de Oportunidades onde o gestor de *Lean Six Sigma* (*Master Black Belt* ou *Black Belt*) faz a gestão de portfólio de projetos (fila de projetos) reunindo-se com frequência pré-

determinada com os *Sponsors* para definir quais oportunidades serão priorizadas, quem serão os *Champions* e *Green Belts* responsáveis pela execução dos projetos *Lean Six Sigma*.

Os *Sponsors* normalmente são os Diretores, Vice Presidente ou Presidente, assim como os *Champions* são, normalmente gerentes ou encarregados de área, definidos pelo nível de influência no processo a ser melhorado/otimizado e os *Green Belts*, os facilitadores que conduzirão o andamento do projeto, guiados pelo gestor de *Lean Six Sigma*.

Um Projeto *Lean Six Sigma* tem seu avanço de acordo com as fases DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar). A seguir na tabela 4.3, será mostrado um guia de implementação de um projeto *Lean Six Sigma*, aplicável à perfuração de poços:

Fase	Sequência do Projeto	Perguntas Sequenciais	Ferramentas
Definir	1. Identificar o problema 2. Falar com o Champion 3. Enviar a oportunidade ao facilitador Lean Sigma 4. Oportunidade aprovada 5. Realizar a entrevista com o champion Identificar claramente o estado do problema e/ou definição dos defeitos Capturar a VOC Determinar o COPQ Preparar o Diagrama IPO Determinar o escopo do projeto Desenvolver o contrato do projeto Preparar as estatísticas básicas (box plot, run chart, etc), histogramas, CPK e gráfico Pareto para identificar as áreas-chave dos problemas (se possível)	Qual é o processo a ser melhorado?	COPQ Gráfico Pareto Métricas de Processo Diagrama IPO Voice of the Customer (VOC)
		Os objetivos do projeto estão alinhados com os objetivos do	
		Quem são os interessados na realização do projeto?	
		Quais características devem ser selecionadas para melhoria?	
		Qual é o COPQ?	
		Quais são as expectativas de economia de custos?	
		Aonde são esperadas as melhorias (redução de tempos não produtivos, diminuição na variância do processo, diminuição de defeitos, minimização de tempos perdidos, etc)?	
		Qual o plano do projeto?	
		Quais são as barreiras que precisam ser ultrapassadas?	
Medir	1. Realização da reunião de início do projeto Apresentação do contexto do problema Definição do defeito Analisar Estatísticas básicas, histograma, pareto, etc Revisar o Diagrama IPO Realizar um mapa de processos do estado atual	Para cada característica selecionada, especificamente qual deve ser melhor estudada e medida?	Run chart
		Quais são as áreas dos problemas identificados em que as mudanças	Box Plot
		Quais dados reais podem ser acessados para fazer medição de performance?	Histogramas
		Quais são os defeitos e esperas em cada etapa do processo?	CPK
		Qual é a performance atual?	Estatísticas Básicas (Teste-T, Teste-F)
			Mapa de Processos
Analisar	Na mesma reunião, realizar a análise das causas raízes Fazer o Diagrama Espinha de Peixe com as 6 vertentes (Material?equipamentos, Método/Procedimento, Máquina, Poder humano, Medição, Meio ambiente) A cabeça do diagrama de peixe precisa ser focada a identificar as áreas-chave da oportunidade de desperdício. Identificar se as variáveis são áreas pontuais (P) ou constantes (C) Após o preenchimento do diagrama, priorizar as mais importantes e identificar suas causas raízes fazendo os 5 "porquês".	Quais são as possíveis causas para as saídas indesejadas identificadas no processo?	Diagrama espinha de peixe.
		Quais causas são as maiores contribuintes para falha?	Matriz de cause e efeito
		Quais são as variáveis principais do processo que contribuem?	Teste de hipóteses.
		Sobre quais dessas variáveis o time possui controle?	Design de Experimentos (DOE)
		Baseado nas análises, qual é o objetivo de melhoria que o time é capaz de alcançar?	

Melhorar	Priorizar e selecionar soluções + criar um novo processo:	Para cada causa verificada, quais são as formas de contrabalançá-las?	Kanban
	Baseado do mapa de processos do estado atual, tentar eliminar passos	Das soluções possíveis, quais aparentam ser mais efetivas,	Testes de Hipóteses
	Listar essas melhorias	Para cada variável de entrada principal do processo, qual é o ajuste e tolerância ótimos?	5S
	Baseado no diagrama espinha de peixe, priorizar as causas mais importantes e pensar em ações para todas elas	Essas soluções vão permitir alcanças a meta traçada anteriormente?	Design de Experimentos (DOE)
	Tentar criar um mapa de processos visando a perfeição, onde nenhum defeito ou espera ocorra	Se não, quais causas ou soluções foram omitidas?	
Controlar	Determinar o novo mapa de processos + lista de ações		
	Se aplicável, definir procedimentos padrões para que sejam seguidos a partir deste projeto		
	Realizar o novo processo: (Aplicar as mudanças propostas no processo real)		
	Estatísticas & Resultados Melhorados:		
	Rastrear o novo processo.		
	Run chart, histograma, box plot, CPK, etc do novo processo		
	Resultados de Testes de Hipóteses:		
	Para dados contínuos, coletar >17 amostras. Para dados discretos, coletar >50 amostras		
	Separar os dados em duas colunas (antes e depois)		
	Realizar o Teste-T (análise das médias)		
	Realizar o Teste-F (análise das variáveis) ou Teste de Proporção (caso os dados forem discretos);		
	Se o valor P do processo for < 0,05, ir para a fase de controle.		
	Se o valor for > 0,05, voltar às variáveis do Diagrama Espinha de Peixe e realizar mais ações		
	Realizar plano de ações de controle a fim de manter as melhorias por mais tempo e fornecer evidências estatísticas no qual as melhorias podem ser sustentadas.	Especificamente, como é possível controlar cara variável do processo ao longo do tempo?	Plano de Controle
	Validar os benefícios, rastreando e registrando os resultados continuamente.	Quais são os novos procedimentos padrões e qual é o plano de treinamento?	Gráfico de Controle
	Realizar um resumo do histórico do projeto com todos os dados e documentos guardados em um repositório central de pesquisa.	Os sistemas de medida são adequados?	Gerenciamento Visual
		Como o novo nível de performance se compara à meta de melhoria?	Instruções de Procedimentos e de Trabalho
		Somos capazes de manter este novo nível de performance?	Operações Padronizadas
		A meta de melhoria e de redução de custos foi atingida?	Manutenção Preventiva
		Quais novas melhorias são necessárias posteriormente?	
		Como é possível aplicar os conhecimentos adquiridos para conseguir melhorias em outras áreas?	

Tabela 4.3: As recomendações de um projeto Lean Six Sigma por fases.

5 ESTUDOS DE CASO

Para melhor entender e analisar os benefícios trazidos pela utilização das técnicas de *Lean Six Sigma* na perfuração de poços será apresentado neste trabalho, estudos de caso que exemplificam de maneira ampla, as possibilidades de aplicação desta técnica, suas análises e resultados.

Os estudos de caso foram feitos com dados sigilosos seguindo padrões hipotéticos e atingindo resultados estimados. Tendo como fonte, dados de operações reais, estima-se que os estudos retratem de maneira segura os ganhos futuros.

O primeiro deles retrata uma das possibilidades de atuação da metodologia *Lean Six Sigma* no aumento de performance produtiva, com a redução de tempos não produtivos de um processo presente em uma operação de perfuração. O segundo, aborda a questão dos desperdícios, explorando um exemplo de tempo perdido que pode ocorrer em operações de perfuração de poços.

Para todas as análises feitas neste trabalho foram utilizados dados de operações reais que ocorreram em campos de águas profundas, e foram todas feitas com o *software SPC XL do Microsoft Excel*.

5.1 1º Estudo de Caso: Tempos não produtivos

No primeiro estudo de caso, será dado o enfoque à melhoria de performance de um processo produtivo baseado na redução dos tempos não produtivos presentes em uma operação de perfuração, ou seja, àqueles tempos dispendidos com atividades necessárias, porém que não agregam valor ao objetivo final da perfuração de alcançar maiores profundidades.

Este primeiro caso tem como foco a melhoria do processo de conexão de drill pipe usando sistemas Rotary Steerables durante a perfuração.

5.1.1 Contextualização

O avanço tecnológico na perfuração de poços permitiu o alcance de zonas produtivas cada vez mais profundas e isoladas, com características exclusivas e incomuns, sendo consideradas há até alguns anos, impossíveis de serem recuperadas. Tal avanço possibilitou a obtenção de designs de poço extremamente complexos, com trajetórias de grandes inclinações ou horizontais, um método de aumentar a produtividade de um poço e a quantidade de reservas, ao mesmo tempo em que se reduz o impacto ambiental. Porém, esta técnica também aumentou os riscos de problemas como coluna presa e compactação das paredes do poço.

Uma vez que os comandos estão em compressão, eles se amoldam facilmente às variações de rumo do poço. É muito mais tarde que os *dog legs* ocasionam contratempos. São os *drill pipes*, que sob tração, se comprimem fortemente contra a parede do poço nos intervalos de maior *dog leg*. São vários os efeitos adversos causados por esta força: rápido desgaste das juntas dos *drill pipes*, formação de chavetas com posterior prisão dos comandos, desgastes localizados na coluna de revestimento, entre outros.

Estes problemas podem ser causados por ineficiência da circulação, muito afetada em poços de grande inclinação. Na parte baixa do poço, a lama perde um pouco a velocidade de circulação, devido à maior concentração de cascalho, ao passo que, na parte alta, a lama mais limpa flui mais livremente. Devido a estes fatores, a eficiência na limpeza do poço é um tema essencial para a perfuração de poços direcionais.

A conexão de *drill pipes* é uma operação essencial para a realização da perfuração de um poço. Através desta operação, é possível adicionar as novas juntas de *drill pipes* para que

assim, se consiga atingir a profundidade desejada como objetivo final do poço. Durante a conexão, as bombas são desligadas, o que interrompe o bombeio de fluido, podendo levar à deposição de cascalhos, a depender da escolha correta do fluido de perfuração e de uma limpeza de poço eficiente.

Neste contexto, destaca-se a importância de um bom gerenciamento do plano de perfuração direcional, pois nele devem constar ações paliativas para evitar que os cascalhos gerados durante a perfuração de um intervalo sejam um problema em potencial no futuro.

5.1.2 Fase Definir

Para a identificação do problema, deve-se entender o panorama a que a empresa se insere. A empresa estudada perfura, aproximadamente, de 30 a 40 poços por ano em águas profundas. Em torno de metade desse total, é utilizado o sistema de *rotary steerable* em pelo menos uma de suas fases. Os poços a serem estudados possuem a seguinte configuração básica:

- Seção 30"
- Seção de 17-1/2"
- Seção de 13-3/8"
- Seção de 9-5/8"
- Seção de 8-1/2"

A figura 5.1 representa o esquemático para estes poços. O programa propõe que se perfure verticalmente, desde o leito marinho até 700m, quando então o poço será desviado. O ângulo vertical será incrementado à razão de 1°/15m. Ao chegar à profundidade de 2800m, os poços deverão estar com 45° de inclinação e profundidade final de 4200m.

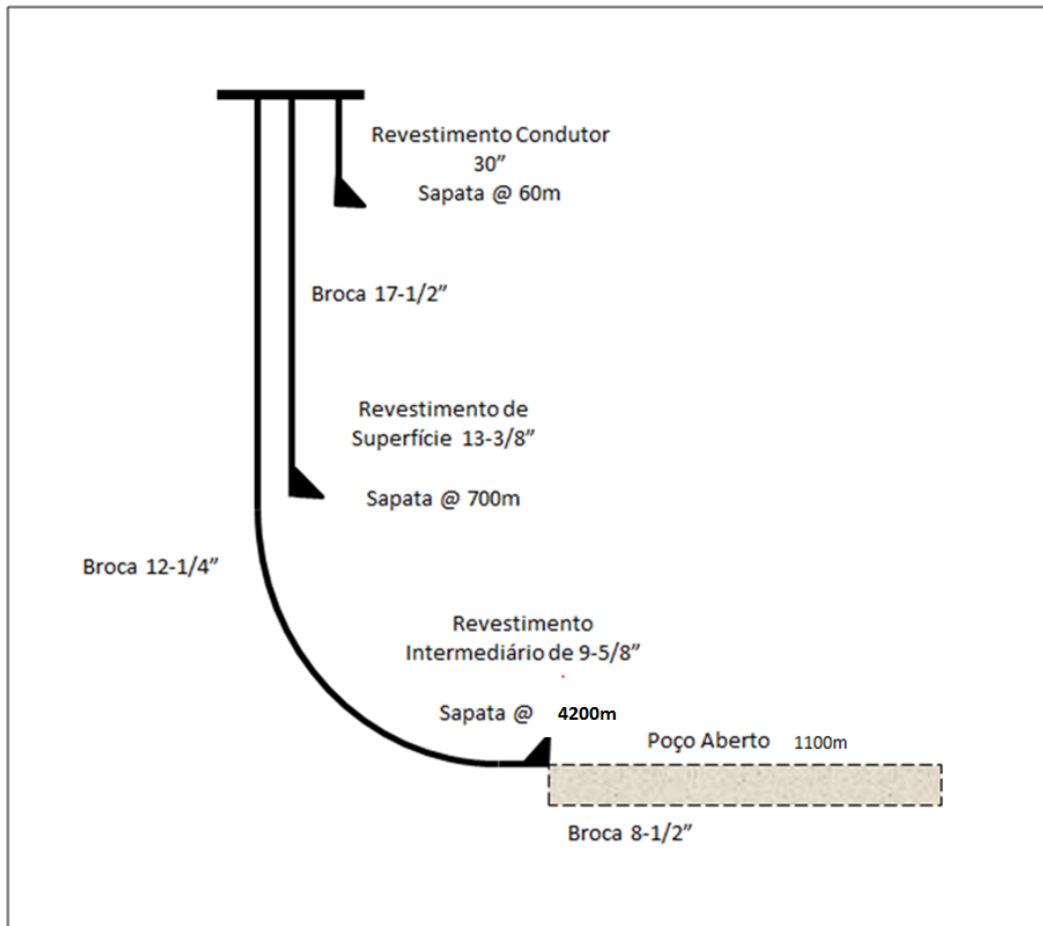


Figura 5.1: Esquemático dos poços da empresa estudada.

- Declaração do Problema

Através da análise de dados feita para cinco poços já perfurados dentro desta campanha de perfuração, identificou-se uma média de 24 minutos sendo gastos durante a realização de conexões de drill pipes, acima da média utilizada como base em operações deste tipo.

Com os dados obtidos, identificou-se uma média de 10 minutos para *backreaming*, 4 minutos para realizar a conexão em si e mais 10 minutos para realizar o *downlinking* e comunicar com as ferramentas direcionais.

Conforme a quantidade de poços previstos para se perfurar neste campo pela empresa dentro do cronograma proposto, ainda faltariam 15 poços direcionais a serem perfurados,

todos utilizando o sistema de *Rotary Steerable*. Nesse caso, melhorias potenciais a serem propostas por um Projeto *Lean Six Sigma* poderiam representar um corte de despesas significativo até o final do projeto.

Após a identificação do problema, tem-se uma oportunidade. Deve-se agora, filtrar o problema identificado (tempo de conexão de *drill pipes*) a fim de definir os pontos a serem abordados pelo projeto, suas metas e objetivos.

- Escopo

Para isso, deve-se primeiramente definir o escopo do projeto. Utilizou-se dados de operação dos primeiros 5 poços, enviados para um banco de dados específico através de um software de monitoramento de dados de perfuração, que reporta dados de tempos reais e captura parâmetros operacionais como pressão de bombeio, torque, ROP e tempos de cada operação.

Com estes dados, foi possível realizar as estatísticas e gráficos básicos que ajudaram na definição do projeto. O primeiro deles, a ajudar na identificação dos maiores agentes causadores de falha, foi o gráfico Pareto com dados dos tempos de conexão de cada fase do poço, como mostrado no gráfico 5.1 a seguir.

Como já esperado por serem mais profundas e demandarem mais tubos, as seções de 9-5/8" e 8-1/2" apresentaram os maiores tempos, representando assim, 82,86% de todo o tempo contabilizado para conexão de *drill pipes*. O ponto em comum entre as três fases escolhidas por apresentarem os maiores tempos de conexão é a realização de perfuração direcional, sendo realizada em todos os poços com o sistema de *Rotary Steerable* (RSS) para este projeto. Porém, é interessante notar que, mesmo sendo a fase menos profunda dentre as três destacadas, a fase de 9-5/8" representou o maior desperdício de tempo,

com 51,43% do total. Isso se deve, principalmente, ao fato de esta fase representar o ganho de ângulo direcional que molda o design do poço.

Com a identificação das seções de maior impacto no tempo total, começou-se a realizar o escopo de definição do projeto, tendo então, o objetivo de melhorar o tempo gasto com a realização de conexões utilizando sistemas de *rotary steerable*.

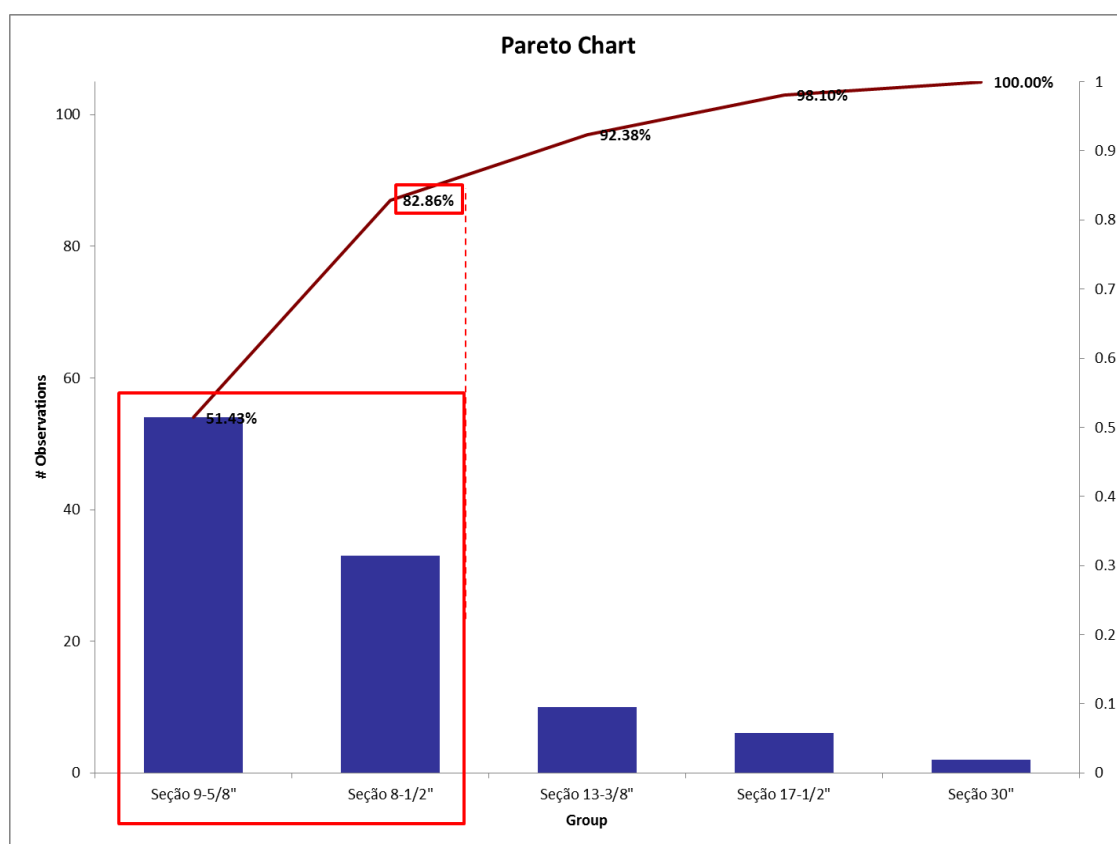


Gráfico 5.1: Gráfico Pareto de tempos de conexão por fase.

Desta forma, foram definidas as áreas de atuação do Projeto *Lean Six Sigma*: seções de 9-5/8" e 8-1/2" a serem perfuradas com o sistema de *Rotary Steerable* (RSS). Fora do escopo deste projeto estão quaisquer operações direcionais dentro do campo em estudo a serem realizadas por sistemas de motor, perfuração de poços próximos a domos salinos, em zonas de transição de pressão, ou em quaisquer outras áreas onde a

instabilidade do poço é identificada como um problema potencial, pois os resultados finais podem ser alterados.

- COPQ

Para definir o COPQ (*cost of poor quality*) inicial, é necessário realizar uma estimativa de tempos inicial e final, de acordo com o estabelecimento de operações padrão para que seja melhor avaliada a estimativa de custos. Com dados dos cinco poços já perfurados em águas profundas, sabe-se que, nos poços em que se utilizam o sistema de *rotary steerable*, cerca de 24 horas de tempo de sonda total são gastas na realização de conexões.

Se o tempo destas conexões fosse reduzido em 15%, sendo calculado a partir de uma média de 24 minutos/conexão, estimando cerca de 60 conexões por poço, correspondentes às três fases destacadas, a economia final seria de 3,6 horas/poço.

Considerando uma sonda semi-submersível que atua em águas profundas e os gastos com serviços equipamentos e materiais, os custos diários de operação desta campanha de perfuração estão em torno US\$480.429 (os custos desta operação podem ser relacionados com a seção 4.3 deste trabalho).

Se forem perfurados 15 poços com sistema *rotary steerable* em um programa de um ano, utilizando-se a média de custos de determinada, os ganhos possíveis poderiam passar de US\$1.000.000,00/ano. Considerando um número médio de conexões por poço, para chegar a este cálculo foram utilizadas médias de acordo com os dados de operação analisados:

Nº conexões por poço = (Profundidade final – lâmina d'água) ÷ tamanho de um stand de *drill pipe*.

Nº conexões por poço = (4200m – 1200m) ÷ 29m = 103

103 conexões/poço x 24 min/conexão x 1hora/60 minutos x 15% melhoria x \$480.429/24 horas de aluguel de sonda, serviços e equipamentos x 15 trabalhos = US\$1.855.857,01.

- VOC

O VOC (*Voice of the Customer*), ou visão do cliente, para este projeto consiste nas necessidades do time de perfuração quanto ao ganho de performance em operações de conexão de *drill pipes*. Sondas de perfuração representam um enorme custo nas operações de perfuração, justificando os avanços tecnológicos para diversas ferramentas que buscam melhores rendimentos, tais como brocas, taxas de fluxo, sistemas de secagem de cascalhos e sistemas de *rotary steerable*. Sendo assim, estes gastos com tecnologias mais avançadas que permitem a economia de dias de aluguel de sonda, não são aproveitados corretamente se as operações simples e rotineiras, como a conexão de *drill pipes*, tiverem um tempo elevado. Desta forma, os custos de sonda estão sendo desperdiçados com atividades que não agregam valor ao objetivo final do processo e, mesmo que necessárias, devem ser otimizadas.

- IPO

O diagrama de entradas-processo-saídas, ou Diagrama IPO, para este projeto identifica as entradas e saídas críticas responsáveis pelo processo estudado e pode ser resumido de acordo com a figura 5.2 abaixo.

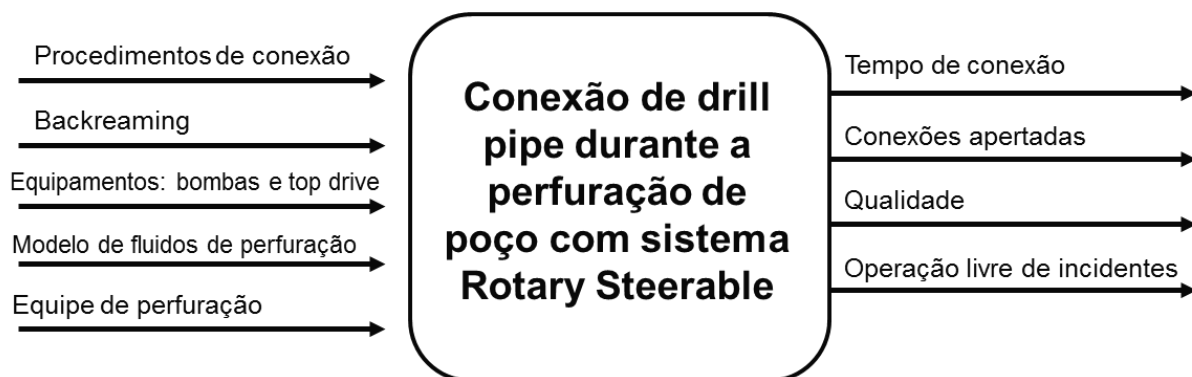


Figura 5.2: Diagrama IPO para processo de conexão de *drill pipes* usando RSS.

Em relação ao Projeto *Lean Six Sigma* proposto, a principal saída a ser mensurada e analisada visando melhorias será o tempo de conexão, foco do projeto. Porém, é importante destacar que os parâmetros operacionais de qualidade e segurança devem ser mantidos para a solução final, a fim da obtenção de um modelo eficiente e seguro.

5.1.3 Fase Medir

Nesta fase, as principais estatísticas preparadas durante a fase de definição serão apresentadas ao time do projeto e revisadas. Além disso, durante esta fase do projeto são mensuradas as principais etapas causadoras de defeito durante a operação, e mais adiante, identificadas suas causas.

O *Run Chart* para este caso foi feito utilizando-se as médias do tempo de conexão pela quantidade de conexão feitas. O *run chart* para a situação inicial, visto no gráfico 5.2, revela qualitativamente como processo está se comportando com relação à média e variação, evidenciando problemas como a falta de uma sequência operacional padronizada ou a presença de muitos defeitos durante a operação.

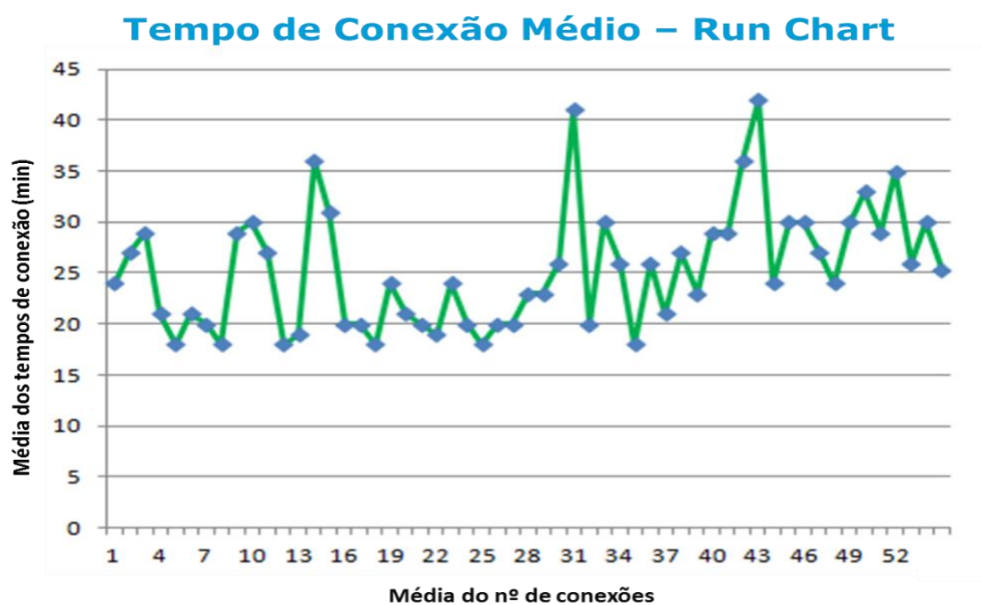


Gráfico 5.2: Run Chart da média dos tempos de conexão antes do projeto *Lean Six Sigma*.

O histograma para este caso também foi feito de acordo com os valores das médias dos tempos de conexão para os cinco poços perfurados neste campo até este momento. Ao analisar o resultado no gráfico 5.3, pode-se confirmar que a média é 24,05 minutos e a variação do processo em um intervalo de 15 a 42 minutos com desvio padrão de 5,44 minutos.

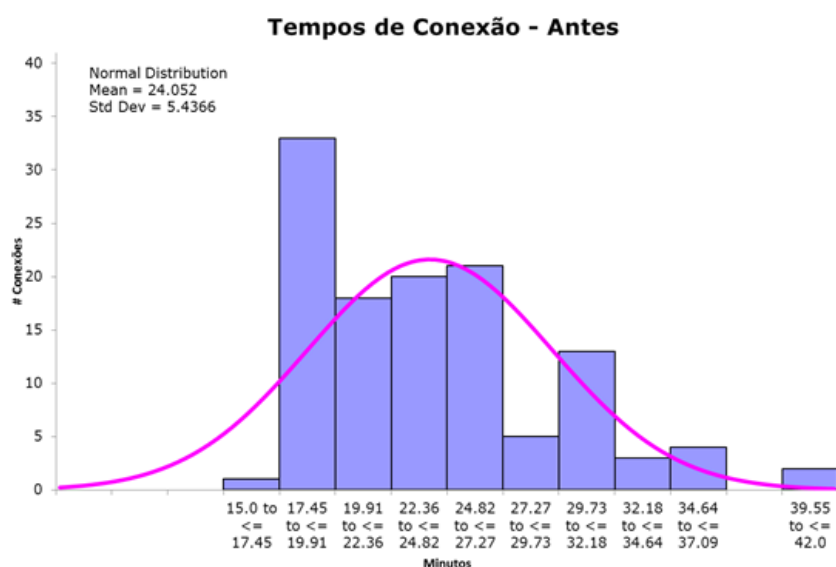


Gráfico 5.3: Histograma para os tempos médios de conexão antes do Projeto Lean Six Sigma.

Para melhor identificar, visualizar e entender as etapas presentes na operação de conexão de *drill pipes* para sistemas de *rotary steerable*, um dos itens mais importantes desta fase é a realização de um mapa de processos. Através dele, se torna possível avaliar a real necessidade de cada etapa presente no processo atual e assim, facilita a obtenção de uma nova versão com etapas revisadas, responsáveis por atingir os resultados esperados com o Projeto *Lean Six Sigma*. Para o processo de conexão de *drill pipes* estudado, o seguinte mapa de processos foi determinado, como mostra a figura 5.3:

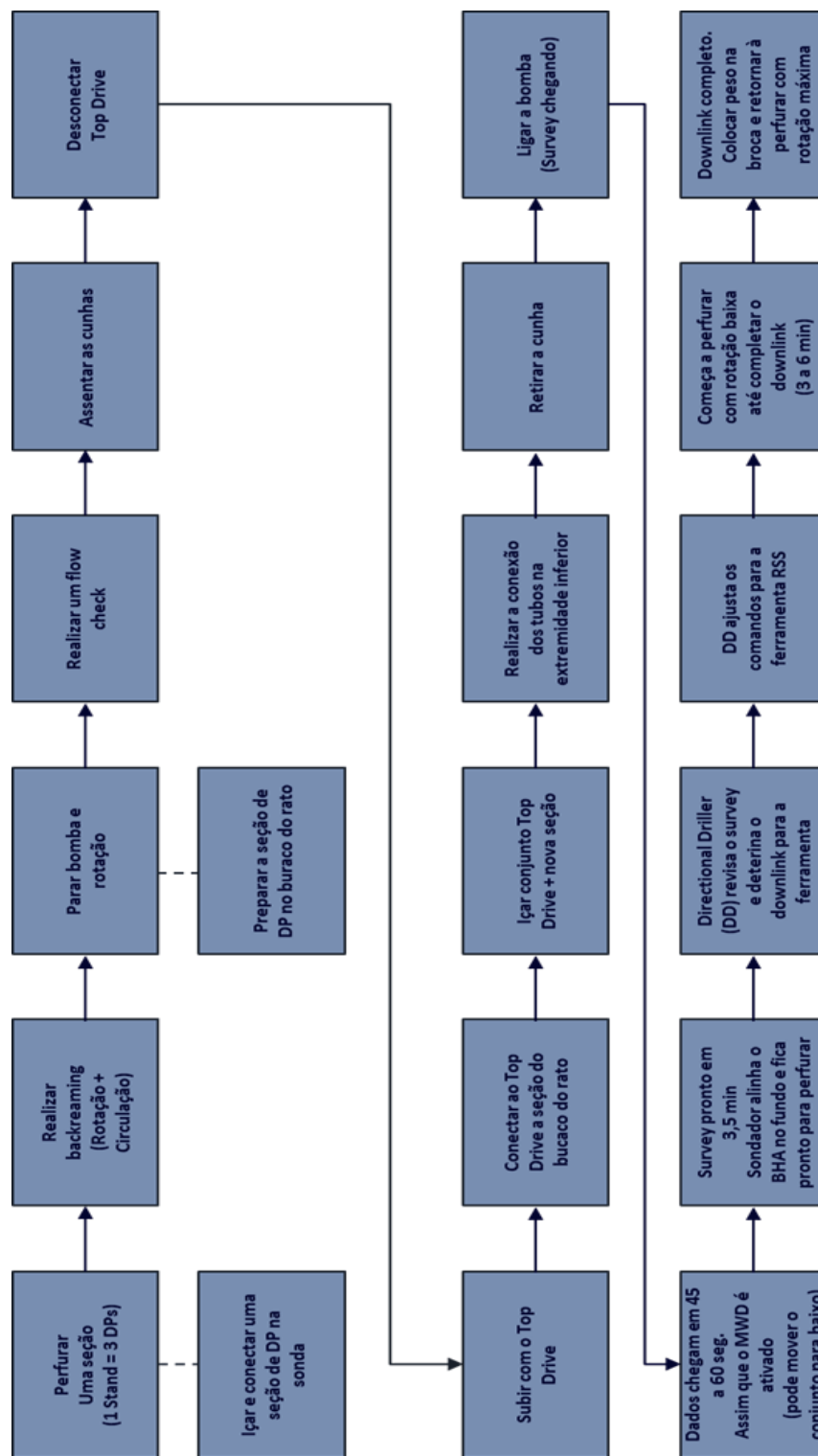


Figura 5.3: Mapa de processos para sequência operacional de conexão de drill pipes.

Portanto, como mostrado pelo mapa de processos, as operações de conexão seguem uma sequência previamente definida:

1. Enquanto é realizada a perfuração de uma seção (stand), equivalente a três juntas de *drill pipe*, novas juntas de *drill pipe* são preparadas na sonda, em seções de três a três juntas. Para isso, cada junta é içada a determinada altura e conectada na seguinte, que é posicionada logo abaixo da anterior.
2. Após a perfuração da seção, os cascalhos gerados devem ser retirados. Por isso é feito o *backreaming*, que consiste na puxada de coluna com rotação e bombeio de fluido, a fim de que os cascalhos retornem pelo anular e, assim, o poço permaneça limpo durante a realização da perfuração. Enquanto isso, a preparação da nova seção de *drill pipes* continua através da montagem deles no buraco do rato, que consiste num furo auxiliar para reservar as seções montadas e prontas para serem conectadas no restante da coluna.
1. Para realizar a conexão da próxima seção acima da coluna, é necessário que a mesma esteja parada. Por isso, as bombas são desligadas.
2. Após o desligamento das bombas é necessário realizar um *flow check*, ou teste de fluxo, que verifica se há sinal de retorno de fluido nos tanques de lama, mesmo com a bomba parada. Caso isso ocorra sem bombeio, pode representar sinal de alguma situação que demande providências de controle de poço, como um *kick*.
3. Para realizar a desconexão do Top Drive, é preciso estabilizar a coluna que está no poço. Para isso, uma cunha é assentada ao seu redor, assegurando sua estabilidade.
4. Após o assentamento da cunha, o Top Drive pode ser desconectado da coluna que está no poço.

5. O Top Drive é desconectado e içado, para que a nova seção de *drill pipes* seja posicionada abaixo dele.
6. A seção que estava aguardando no buraco do rato tem seu topo conectado ao Top Drive.
7. O conjunto Top Drive e nova seção é levantado a fim de que sua extremidade possa ser conectada à coluna logo abaixo.
8. A conexão da nova seção com a coluna é realizada.
9. A cunha é retirada.
10. A bomba é ligada. Com a volta do bombeio de fluido, os pulsos elétricos oriundos dos medidores posicionados em equipamentos específicos (MWD, LWD) na extremidade inferior da coluna retornam a superfície trazendo os resultados do *survey*. O *survey* consiste em uma série de parâmetros medidos no fundo do poço que ajudam na avaliação da perfuração.
11. Com o bombeio de fluido, a ferramenta de MWD (*measurement-while-drilling*) recebe um pulso elétrico e é ativada, retornando com dados de 45 a 60 segundos após a ativação.
12. O *Survey* completo retorna em uma média de 3,5 minutos. Durante este tempo, o sondador se prepara para perfurar a nova seção, descendo-a até o fundo.
13. O responsável pela perfuração direcional, chamado de *Directional Driller* (DD), revisa o *survey* e determina os ajustes necessários para a ferramenta de RSS.
14. O DD ajusta os parâmetros na ferramenta, como inclinação, peso na broca, bombeio, entre outros, enviando comandos da sonda.
15. Neste ponto, a perfuração é iniciada, porém com uma rotação muito baixa até que os ajustes na ferramenta sejam completados. O tempo entre o envio dos ajustes pelo DD até que a ferramenta esteja completamente ajustada nos parâmetros e

direção demora em torno de 3 a 6 minutos. Durante este tempo, não há envio de dados reais para a sonda. Eles ficam retidos no fundo do poço, na memória.

16. Após a realização completa do *downlink*, ou seja, ferramenta de RSS totalmente ajustada para as condições determinadas, pode-se aplicar peso na broca e retornar a perfurar com a rotação total.

Após a visualização do fluxo de processos para esta operação, é possível dividir as análises em tarefas realizadas antes da conexão e tarefas realizadas após a conexão, visando obter oportunidades de melhorar a eficiência e rapidez do processo.

Os pontos principais a serem melhor estudados para verificar sua importância real no processo são as razões de realizar *backreaming*, e a avaliação de qual é a altura de *backreaming* necessária. O tempo de *backreaming* médio para o processo anterior à implementação do método *Lean Six Sigma* é de 10 minutos. O tempo de realização de conexão, de 3 a 4 minutos, não representa atraso significativo e, por isso, não fará parte do projeto. O trabalho de direcional realizado logo após a conexão de *drill pipes* também possui um tempo médio de 10 min, completando assim, a média total do tempo de conexão de *drill pipes* de 24 minutos, calculado para o processo anterior à aplicação do *Lean Six Sigma*.

Com o problema principal identificado e mensurado, é necessária fazer uma revisão do COPQ determinado na fase de definição. O estudo do mapa de processos permitiu a reavaliação do objetivo final de redução de tempos. Avaliando-se as operações a serem otimizadas, foi possível aumentar a estimativa de redução de tempos de conexão de 15% para 40%, ou seja, este projeto salvaria quase a metade dos gastos com aluguel de sonda, serviços e equipamentos despendidos com conexão de tubos por dia. Com esta

medida, os ganhos com a aplicação do Projeto *Lean Six Sigma* por um período de um ano chegariam perto de US\$5.000.000,00. O novo cálculo do COPQ se torna:

$103 \text{ conexões/poço} \times 24 \text{ minutos/conexão} \times 1 \text{ hora}/60 \text{ minutos} \times 40\% \text{ melhoria} \times$
 $\text{US\$480.429}/24 \text{ horas de aluguel de sonda} \times 15 \text{ trabalhos} = \text{US\$4.948.418.70}.$

5.1.4 Fase Analisar

Identificados os desperdícios principais, o próximo passo é identificar as suas causas e classificá-las de acordo com o grau de magnitude que cada uma delas representa para a o acréscimo de tempo não produtivo no processo.

O primeiro passo para identificar estas causas é a avaliação das etapas destacadas no mapa de processos, determinado na fase anterior. Através dele, foram identificadas as etapas que estão durando mais tempo que o esperado e não agregam valor ao processo, assim como as áreas onde podem estar ocorrendo desperdício, conhecidas como “armadilhas” que acrescentam tempo ao processo. Na figura 5.4 é possível visualizar as possíveis etapas identificadas por possuir algum tipo de desperdício de tempo.

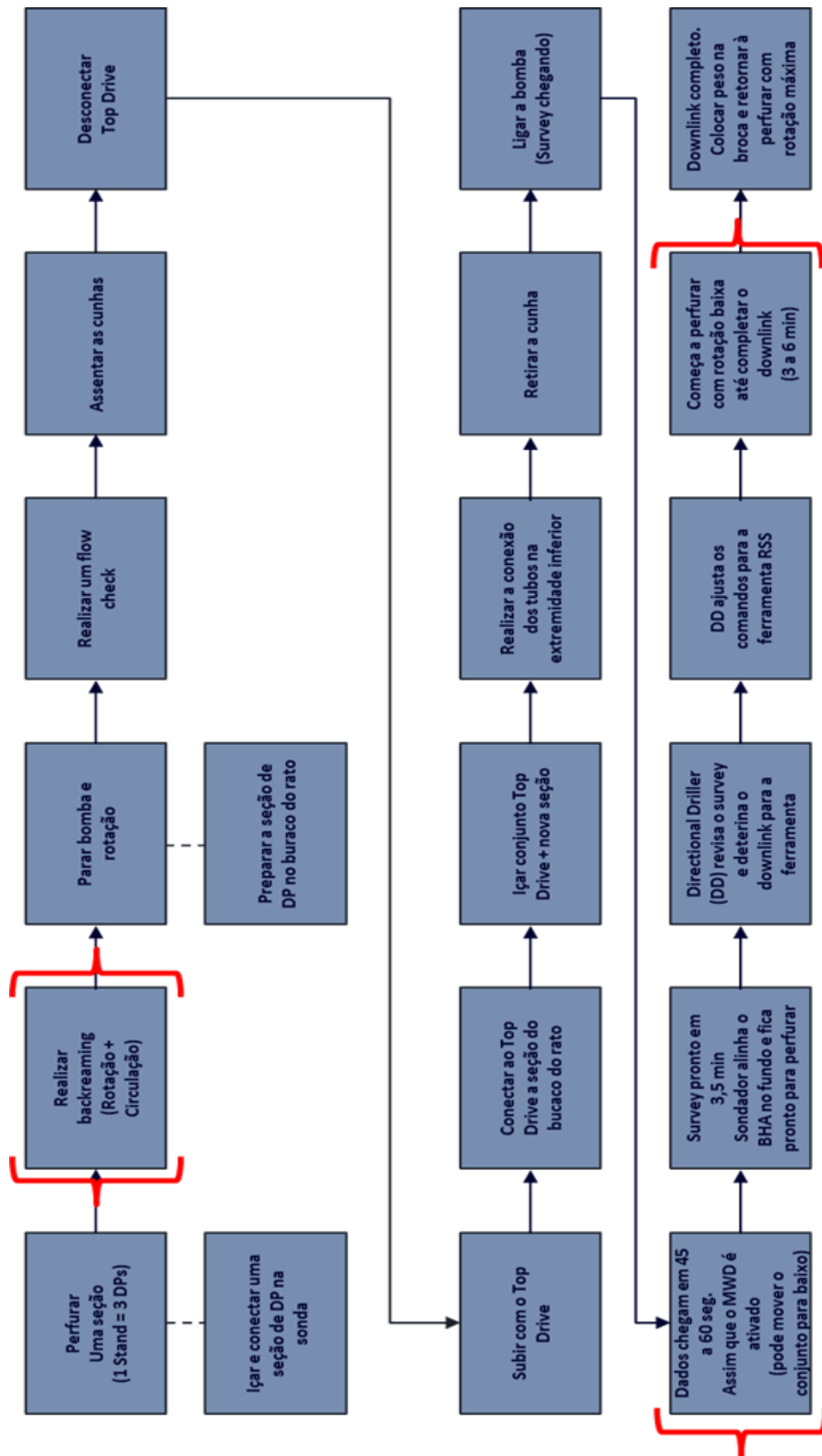


Figura 5.4: Mapa de processos de conexão de drill pipes com etapas de desperdício identificadas.

Os dados das etapas do processo e seus tempos de execução, podem ser comprovados ao se fazer uma análise do painel do mud logging, que representa um gráfico dos tempos de cada operação realizada na sonda.

Como pode ser visto na figura 5.5, a linha preta tracejada representa as descidas e subidas de coluna e a linha lilás, a pressão na bomba. Os pontos destacados entre 1 ao 2, representam a realização da perfuração do poço, com bombeio constante da bomba. Os pontos entre 2 e 3, representam a realização do backreaming, onde pode ser destacado que a pressão na bomba de lama se manteve constante, e a altura da coluna diminui (quando a coluna é puxada bombeando) e aumenta (quando a coluna é posicionada no fundo para realizar a conexão). Os pontos entre 3 e 4 representam a realização da conexão. Pode-se atentar ao fato da curva de pressão de comba retornar ao ponto zero, o que evidencia a parada da mesma. Após este intervalo, dá-se início ao downlink, entre os pontos 4 e 5. Nota-se que no início, enquanto o DD revisa o survey e envia os comandos à ferramenta de RSS, a pressão da bomba continua a nível zero e, a partir de um ponto, sofre um aumento até que fica constante.

Na curva de profundidade também é possível reparar que logo após o ponto 4, há uma pequena inclinação na reta, que aumenta junto ao aumento da pressão na bomba. Isto representa o período final do downlink, onde se inicia uma perfuração com baixa rotação, até que o downlink esteja completo e a perfuração em ritmo normal possa retornar.

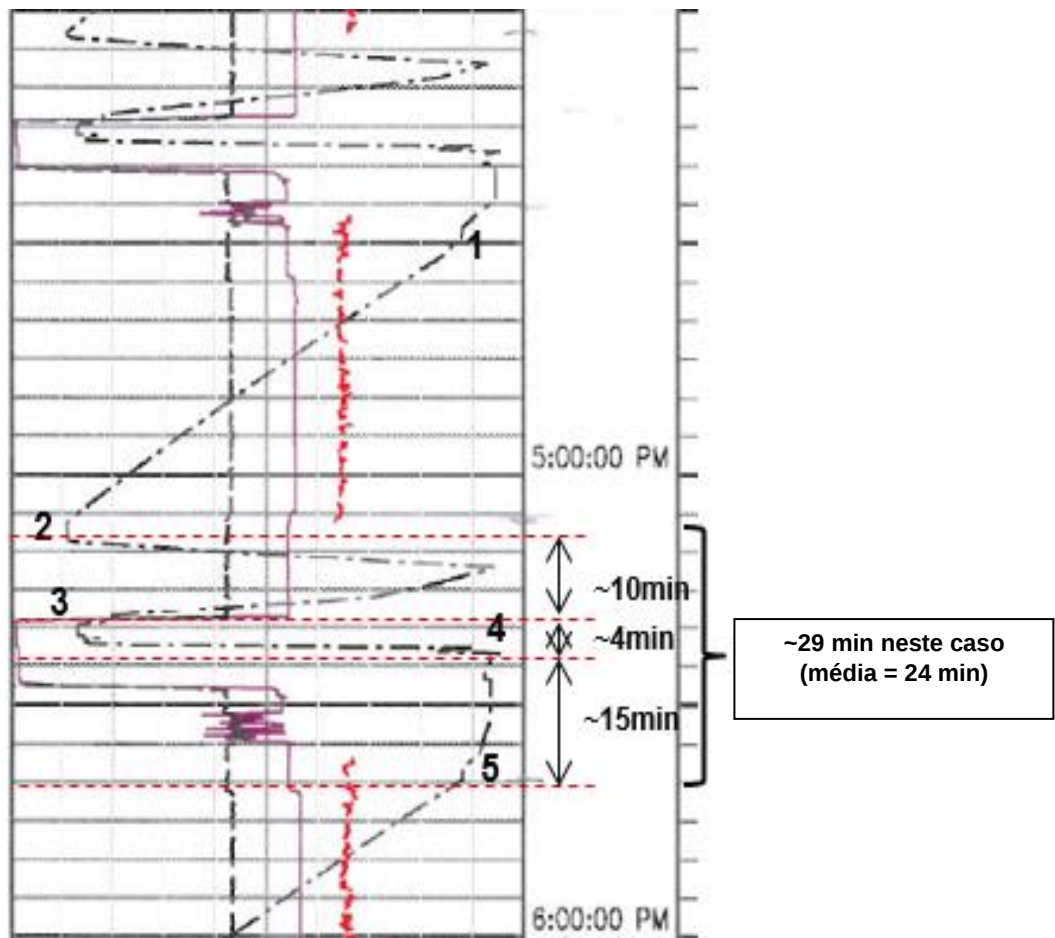


Figura 5.5: Painel do mud logging enviado pela sonda.

O próximo importante passo na fase de análise está na identificação das causas raízes para os desperdícios de tempo destacados no mapa de processos.

Para ajudar nesta tarefa, uma importante ferramenta a ser utilizada é o diagrama espinha de peixe, responsável por ajudar a identificar as causas raízes para os principais problemas ocorridos em um processo, sob uma perspectiva de causa e efeito. Para este caso utilizou-se dois diagramas espinha de peixe, com foco nas duas áreas de atuação do mapa de processo da figura 5.4, conforme podem ser vistos nas figuras 5.6 e 5.7.

Diagrama de Causa e Efeito – Espinha de Peixe

Antes da Conexão

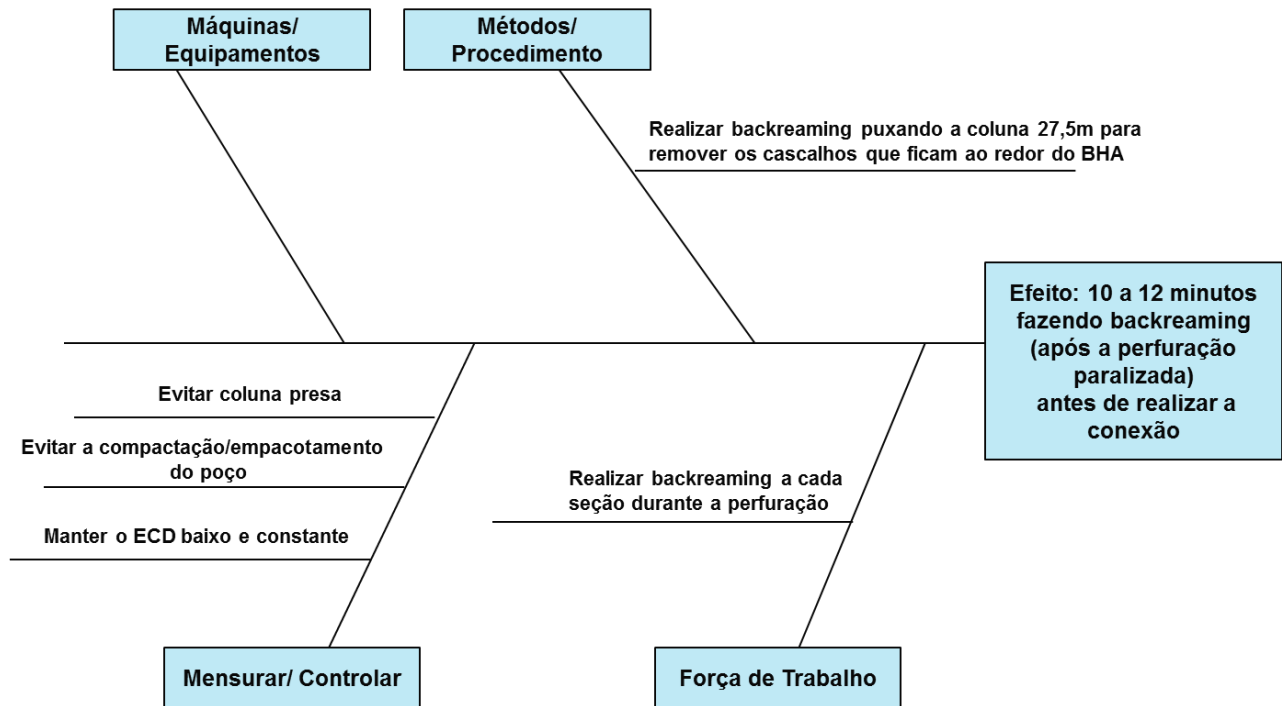


Figura 5.6: Diagrama espinha de peixe para desperdício anterior à conexão.

Para o problema identificado antes da realização da conexão, o diagrama espinha de peixe evidencia as principais relações de causa e efeito sobre o tempo necessário para retirar os cascalhos por *backreaming*. Com estas relações feitas, o trabalho de determinação das causas raízes que geram este acréscimo de tempo é facilitado e pode ser obtido com o seguinte questionamento: Porque deve-se realizar o *backreaming* antes de fazer a conexão durante a perfuração com *rotary steerable*? Os motivos principais que justificam esta necessidade são mostrados a seguir:

- A realização do *backreaming* durante a perfuração é feita devido às questões de segurança, visto que, para manter a integridade do poço e evitar problemas como coluna presa, é importante que os cascalhos das rochas perfuradas sejam retirados do fundo do poço.

- Ele deve ser realizado antes da conexão, pois durante a mesma, a coluna ficará parada por alguns minutos (sem rotação ou bombeio) e, dessa forma, deve-se evitar danos ao BHA retirando-se os cascalhos do fundo.
- A limpeza do poço, ajuda na manutenção de um ECD abaixo do gradiente de fratura.
- Verificar as condições de poço, entre elas a estabilidade, limpeza e taxas de circulação.

Diagrama de Causa e Efeito – Espinha de Peixe Após a Conexão

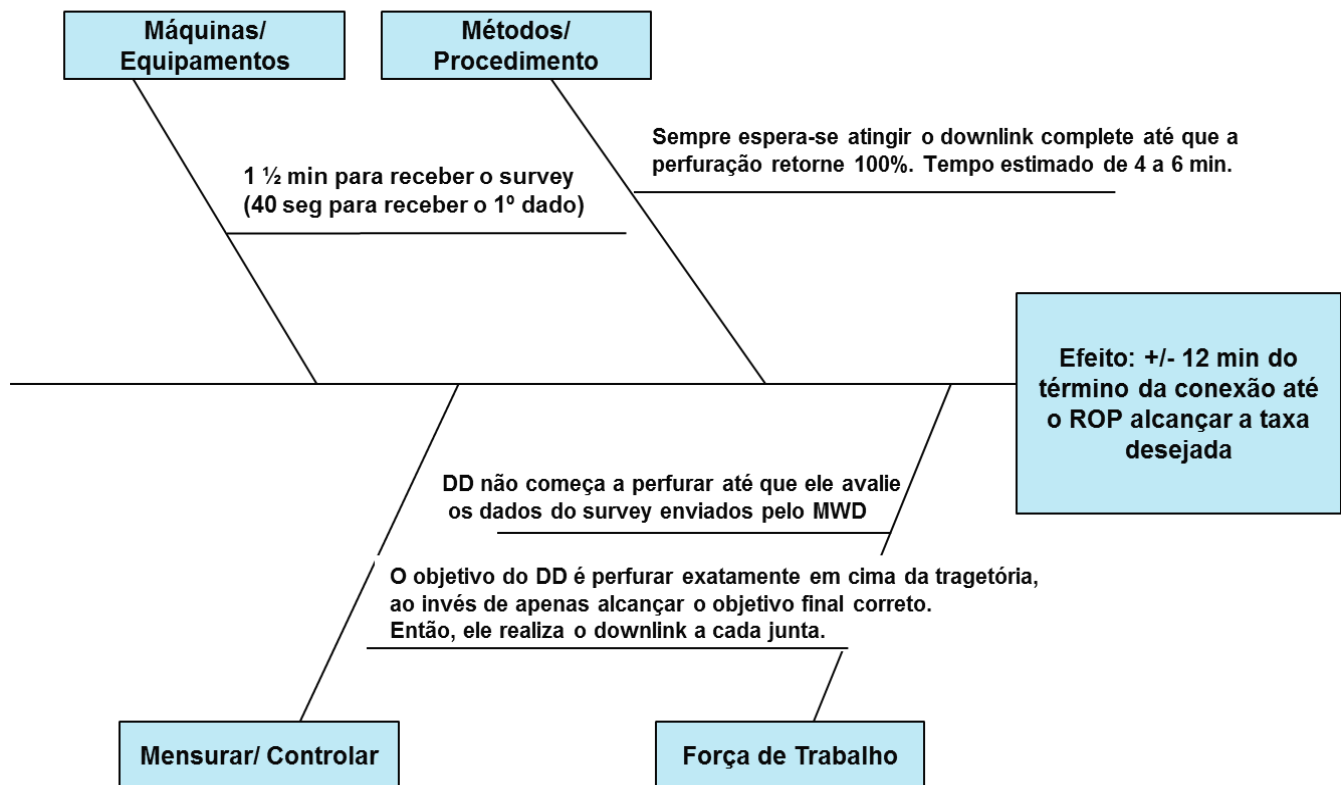


Figura 5.7: Diagrama espinha de peixe para desperdício posterior à conexão.

Para o problema identificado após a realização da conexão, o diagrama espinha de peixe evidencia as relações de causa e efeito sobre o tempo até o retorno a perfuração. De acordo com o diagrama, foi possível identificar etapas que não podem ser alteradas, como o tempo de espera do *survey*, pois este depende do envio de dados do MWD e do tempo de transito dos mesmos. As etapas modificáveis do processo pós-conexão são baseadas em procedimentos definidos pela empresa a fim de realizar o *downlink* corretamente e manter o poço na trajetória prevista.

5.1.5 Fase Melhorar

Feita a análise detalhada do problema, com as causas para cada problema identificadas, o próximo passo está na elaboração de soluções. Na fase de melhoria ou *improve* de acordo com a sigla DMAIC, etapas no processo devem ser alteradas ou cortadas e sistemas a prova de erro, implementados, buscando-se ao máximo a redução da variação em cada importante causa que influencia o efeito tempo de conexão.

Foram obtidos dados de uma modelagem hidráulica virtual para medir o tempo estimado para limpeza de 150m de BHA, em uma seção de 9-5/8" com ângulo de 45° e peso de lama sintética de 10.6 ppg, como mostrado na figura 5.8 a seguir. O fluxo normal para este poço era de 650 gpm e os resultados obtidos foram de um tempo médio de limpeza de 150m de BHA entre 3 a 4 minutos.

GPM	ROP	RPM	Minutos para limpeza de 150m
550	75	120	4.5
550	100	120	4.5
550	140	120	4.5
550	160	120	4.5
550	180	120	4.5
600	75	120	4.2
600	100	120	4.3
600	140	120	4.4
600	160	120	4.5
600	180	120	4.6
650	75	120	3.8
650	100	120	3.8
650	140	120	3.8
650	160	120	3.8
650	180	120	3.8

Figura 5.8: Modelagem hidráulica de tempo estimado de limpeza de BHA

Esta modelagem ajudou no suporte para chegar às soluções para o problema anterior à conexão, ou seja, de realização de backreaming.

Para todas as geometrias de poço consideradas, as recomendações a seguir foram baseadas nas modelagens feitas para BHAs sem deposição de cascalhos ao entorno,

com o RPM recomendado para as funções do drill pipe em cada largura de seção e bombeio de grande volume de fluido e alta rotação, características de uma limpeza eficiente.

Um guia de melhorias previstas para o projeto de *Lean Six Sigma* pôde ser traçado, baseado em uma nova sequência operacional para cada seção que otimizem a máxima remoção de cascalhos durante a perfuração.

- De 0° a 30° (poços quase verticais):
 - Perfurar uma seção;
 - Realizar a conexão (3,5 min);
 - Com a chegada do primeiro resultado do *survey* (45 a 60 segundos), retornar a perfuração com máxima rotação.

- De 30° a 60° e de 60° a 90°:
 - Perfurar a seção;
 - Realizar *backreaming* de aproximadamente 10 m (2 min puxando e 2 min descendo a coluna), para mover os cascalhos 150 m acima (longe do BHA);
 - Realizar a conexão (3,5 min);
 - Com a chegada do primeiro resultado do *survey* (45 a 60 segundos), retornar a perfuração com máxima rotação.

Uma sequência operacional para o caso após a conexão também foi definido e é mostrado a seguir:

- Realizar a conexão;
- Ligar as bombas na capacidade máxima;

- Após 40 a 60 segundos, o primeiro pulso do MWD será recebido. Notificar ao sondador para retornar com a coluna para o fundo e recomeçar a perfurar no ritmo normal, sem esperar pelo resultado inteiro do *survey*.
- Após 1,5 minutos o *survey* estará completo. O DD irá revisá-lo e fazer os ajustes na ferramenta, enviando os comandos para a ferramenta de *downlink* em 2,5 a 6 minutos. Portanto, o *downlink* será realizado durante a perfuração.

A sequência operacional completa pode ser resumida abaixo:

- Perfurar uma seção;
- Realizar *backreaming* suficiente para mover os cascalhos 150m acima (aproximadamente 3,5 min no total, acima e abaixo);
- Realizar conexão (3,5 a 4 min);
- Ligar as bombas;
- Após um minuto, com o primeiro pulso do MWD recebido, retornar a perfuração;
- Realizar *downlink* do fundo, enquanto perfura.

Após a implementação das soluções propostas, as mesmas análises devem ser feitas a fim de confirmar a efetividade do projeto de *Lean Six Sigma* e comprovar seus resultados.

Abaixo são mostradas algumas estatísticas feitas baseando-se na média de poços já perfurados, porém, com a implementação do novo sistema proposto para as operações.

Pela análise do *run chart* (gráfico 5.5), é possível verificar que os tempos de conexão agora possuem uma variação e média menor. Através do histograma, nota-se que a média pós-projeto é de 13,1 minutos, ou seja, houve uma diminuição de 10,9 minutos no tempo de conexão total, representando uma redução de 45,4% e o desvio padrão foi de 2.6 minutos, visto no gráfico 5.4.

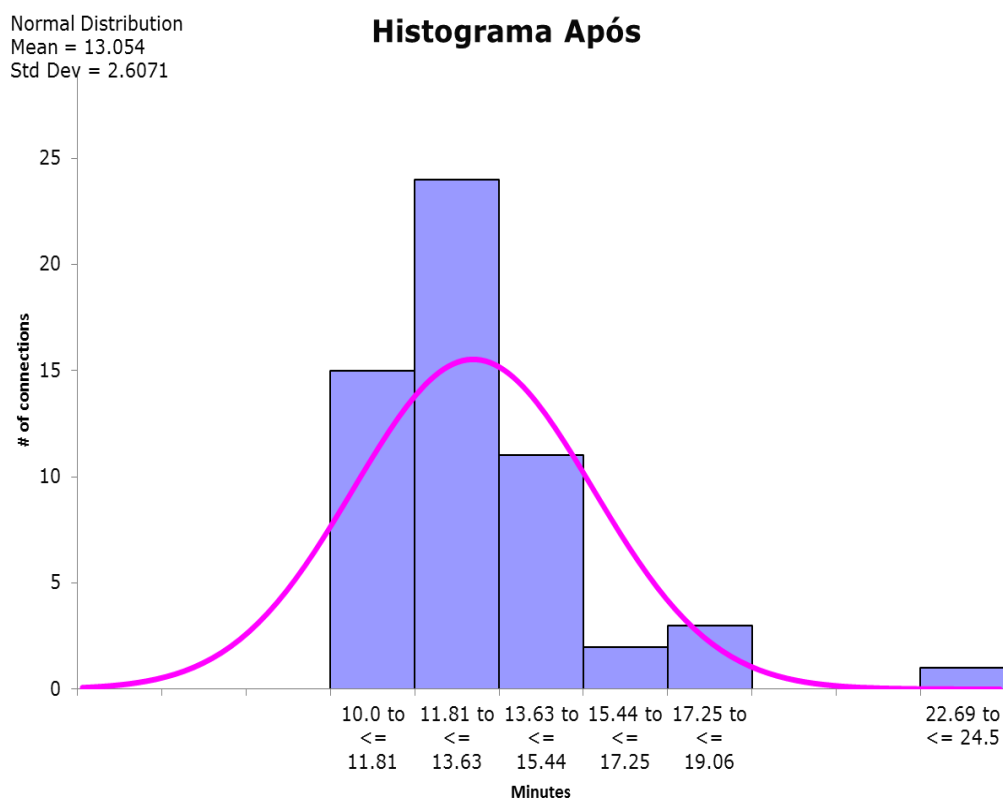


Gráfico 5.4: Histograma das médias após a implementação do projeto.

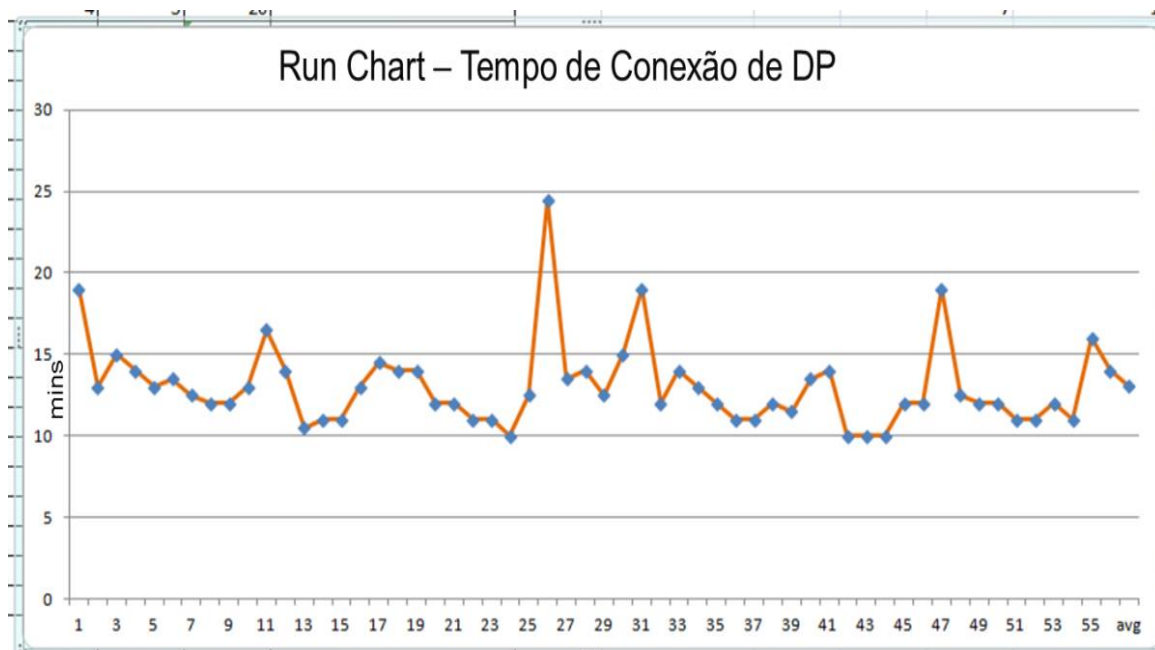


Gráfico 5.5: Run Chart para tempos de conexão após projeto Lean Six Sigma.

A fim de comprovar estatisticamente a melhora deve-se executar testes estatísticos ou de hipóteses, comparando-se antes e depois do projeto como mostrado na figura 5.9.

O Teste t consiste em formular uma hipótese nula e, conseqüentemente, uma hipótese alternativa, calcular o valor de t e aplicá-lo à função densidade de probabilidade da distribuição t medindo o tamanho da área abaixo dessa função para valores maiores ou iguais a t. Essa área representa a probabilidade da média dessa amostra em questão, neste caso os tempos de conexão, ter apresentado o valor observado ou algo mais extremo.

Seguindo a mesma corrente, o Teste F representa uma análise de variância com um teste estatístico que visa fundamentalmente verificar se existe uma diferença significativa entre

as variâncias e se os fatores de melhora feitos pelo projeto exercem influência significativa.

Se a probabilidade dos resultados obtidos for muito pequena, podemos concluir que o resultado observado é estatisticamente relevante e, sendo assim, o Projeto Lean Six Sigma foi efetivo. Essa probabilidade também é chamada de p-value ou valor p. Consequentemente, o nível de confiança é igual a $1 - p\text{-value}$.

Para confirmar a efetividade deste projeto Lean Six Sigma, foi obtido um p-value de 0.0 em ambos os testes, o que representa um nível de confiança acima de 95% na mudança da média e na variância dos tempos de conexão de 24 minutos para 13 minutos, antes e após a aplicação do projeto. Como os tempos foram estatisticamente melhorados, pode-se considerar que o projeto foi eficiente e pode avançar para a fase controle.

F Test Analysis (Std Dev)		
	Before	After
Before	1.0	0.0
After		1.0
Summary		
Mean	24.052	13.054
StDev	5.4366	2.6071
Count	120	56

t Test Analysis (Mean)		
	Before	After
Before	1.0	0.0
After		1.0
Summary		
Mean	24.052	13.054
StDev	5.4366	2.6071
Count	120	56

Figura 5.9: Resultados do Teste-T e Teste-F.

5.1.6 Fase Controlar

Depois que as soluções foram definidas e os resultados comprovados, deve-se assegurar que este bom desempenho será mantido até o final do projeto, ou seja, até que se perfurem os 15 poços restantes. Para isso, algumas medidas de controle devem ser tomadas. Entre elas estão a preparação de cartas de controle de tempo nos processos críticos (backreaming e downlink), realização de relatórios de revisões semanais com os

dados de conexão de cada operação, controle financeiro semanal de cada poço, visando não exceder os custos reajustados e, ao final de cada operação, documentar as lições aprendidas.

Além disso, deve ser feito um relatório financeiro do projeto para estimar o quanto será economizado ao final da implementação do projeto para todos os poços e verificar se a meta foi atingida. O benefício financeiro para este projeto é baseado na redução de tempos de conexão de uma média de 24 minutos para 13,1 minutos, resultando em uma melhoria de 45,4% no processo, maior que a meta de 40% estipulada anteriormente.

Se os 15 próximos poços a serem perfurados em um ano com Rotary Steerable utilizarem as mudanças propostas pelo projeto de *Lean Six Sigma*, os ganhos anuais com o projeto podem ultrapassar US\$5.000.000,00. Considerando gastos diários de operação de aproximadamente US\$480.429, tem-se:

$103 \text{ conexões/poço} \times (24 - 13,1) \text{ minutos/conexão} \times 1 \text{ hora}/60 \text{ minutos} \times \$480.429/24 \text{ horas}$
de aluguel de sonda, serviços e equipamentos $\times 15 \text{ trabalhos} = \text{US\$}5.618.517,07$.

5.2 2º Estudo de Caso: Tempos Perdidos

No segundo estudo de caso, será dado o enfoque à diminuição de defeitos de um processo produtivo baseado na redução dos tempos perdidos que podem ocorrer em uma operação de perfuração, ou seja, àqueles tempos que apenas agregam custos não planejados ao escopo do projeto inicial. Este estudo de caso foi retirado da literatura, assim como suas análises e resultados.

Este primeiro caso tem como foco a redução de falhas de equipamentos em sondas de perfuração.

5.2.1 Contextualização

Sondas de perfuração são as responsáveis por permitir que a perfuração de um poço aconteça. Nela, estão os equipamentos essenciais para a realização das operações, garantindo sua eficiência produtiva e de segurança. Entretanto, assim como qualquer sistema, equipamentos de sonda também estão sujeitos a falhas que, na perfuração de poços podem representar, além da interrupção das operações, enormes custos causados pelo desperdício do aluguel de sonda e equipamentos e com reparos.

5.2.2 Fase Definir

- Declaração do Problema

Em uma campanha de perfuração, o cronograma consistia na perfuração de 42 poços em águas profundas com uma mesma sonda de perfuração do tipo semi-submersível, chamada neste caso de S1. A análise de dados do histórico de operações durante o ano anterior para esta sonda S1 específica mostrou que o desperdício de tempo causado por tempos perdidos devido à falha de equipamentos de sonda foi de 32,5 horas por mês. Isso representava o equivalente a 19% do tempo perdido total desta sonda.

Com isso, verificou-se a oportunidade de aplicação de um projeto de *Lean Six Sigma* cujo objetivo principal seria encontrar soluções capazes de reduzir o tempo perdido de sonda por falha de equipamentos.

Com o problema identificado e a oportunidade registrada, o objetivo principal do projeto foi definido como a redução de tempo perdido por falhas de equipamentos. Sendo assim, definiu-se como meta a redução dos tempos perdidos pela metade do que foi registrado anteriormente, ou seja, de 32,5 horas/mês para 16 horas/mês e, além disso, aumentar a operabilidade da sonda tornando mais eficiente, reduzindo os custos de operação em US\$4.070.777.45 ao ano e aumentando o capital da empresa estudada.

Com esta meta para o projeto *Lean Six Sigma*, a participação das falhas de equipamentos no cálculo do tempo perdido total da sonda poderia ser reduzido de 19% para 5% ao ano, através da implementação de manutenções preventivas.

- Escopo

Os materiais e equipamentos da sonda, além de recursos e processos envolvidos na manutenção da mesma. Por outro lado, estariam fora do escopo deste projeto qualquer outra sonda de perfuração que não seja a S1 e outros problemas causados por falhas geológicas de subsuperfície, incluindo pressões de poros e fratura.

- COPQ

O COPQ para este projeto é definido somando-se os custos diários de aluguel de sonda, equipamentos e materiais multiplicado pelo tempo perdido de produção. Para os custos diários, deve-se somar o aluguel de sonda (como visto na seção 4.3 deste trabalho), com os principais materiais necessários para realizar reparos e manutenções. Para a sonda S1, os seguintes custos foram considerados:

- Aluguel diário de sonda, equipamentos e materiais = US\$480.428,57/dia
- Despesas Gerais (incluindo peças de equipamentos, fluidos lubrificantes, mão de obra, entre outros) =US\$12.999/dia
- Custo diário total: US\$493.427,57

Para a sonda P1, sendo o tempo de desperdício verificado de 32,5 horas/mês e, com a aplicação do projeto Lean Sigma estima-se um valor aceitável de 16 horas/mês, o cálculo do COPQ se torna:

$$((32,5 - 16) \text{ horas/mês} \times 12 \text{ meses/ano} \div 24 \text{ horas/dia}) \times \text{US\$493.427,57/dia} = \text{US\$4.070.777.45/ano.}$$

- VOC

O VOC ou *voice of the customer* para este projeto pode ser definido pela intenção do gerente do projeto da campanha de perfuração em alugar esta sonda S1 para realizar o trabalho, sabendo que o histórico de performance desta sonda revela muitas falhas de equipamento. Sendo assim, seria necessário à diminuição destas falhas de equipamentos pela metade dentro de um prazo de um ano após a implementação do projeto de Lean Sigma.

- IPO

Pelo Diagrama IPO, ou Diagrama de Entradas e Saídas, mostrado na figura 5.10 abaixo, é possível identificar as principais características envolvidas nesse processo. Segundo o Diagrama IPO, foi possível identificar as pessoas e processos envolvidos em todas as operações realizadas na sonda, como a tripulação e o time de manutenção, maior envolvido no problema de falha de equipamentos; a disponibilidade de materiais para reposição, essencial para que a falha de determinado equipamento seja consertada e a sonda possa voltar a operar normalmente; QA/QC, um termo em inglês que se refere à *Quality Assurance*, ou seja, Garantia de Qualidade, um processo orientado e focado na prevenção de defeitos e *Quality Control*, ou seja, Controle de Qualidade, uma série de atividades que garantam a qualidade dos produtos, identificando possíveis defeitos; os procedimentos padrões de inspeção de sonda, que já são pré-definidos e não permitem atividades fora do plano e talvez precisem ser revisados e atualizados.

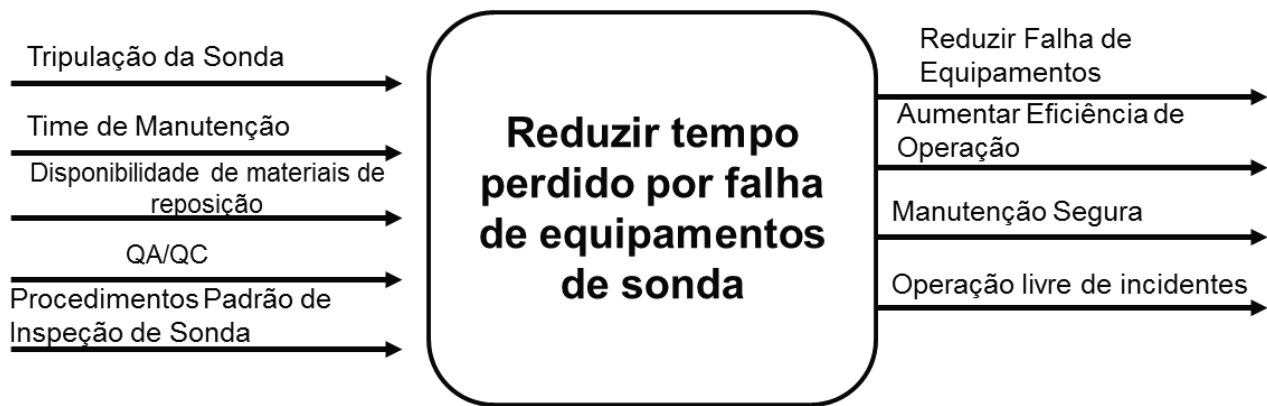


Figura 5.10: Diagrama IPO para processo de redução de tempo perdido por falha de equipamentos de sonda.

Os objetivos do processo em questão, de redução de tempo perdido por falha de equipamentos, estão nas saídas do Diagrama IPO, identificados como essenciais para que o projeto Lean Sigma atinja seus objetivos. Entre eles, está a redução do tempo o aumento de eficiência nas operações, a realização das operações de manutenção preocupadas com a segurança dos funcionários e do meio ambiente e assegurar que as operações de perfuração serão livres de incidentes.

5.2.3 Fase Medir

Nesta fase serão analisadas as estatísticas feitas durante a fase de definição baseadas no histórico de dados da sonda S1 em questão. Através da medição de alguns parâmetros será possível determinar os focos de aplicação do projeto.

O histograma para os tempos perdidos por falha de equipamentos pode ser visualizado no gráfico 5.6, mostrando a média de 32,5 horas e a variação do processo indo de 4 horas a 172,5 horas com desvio padrão de 41,72 horas. Além disso, pelo histograma é possível perceber que a grande maioria dos problemas de falha de equipamentos são resolvidos de forma relativamente rápida, de 4 horas a 32,1 horas, porém, são muito recorrentes.

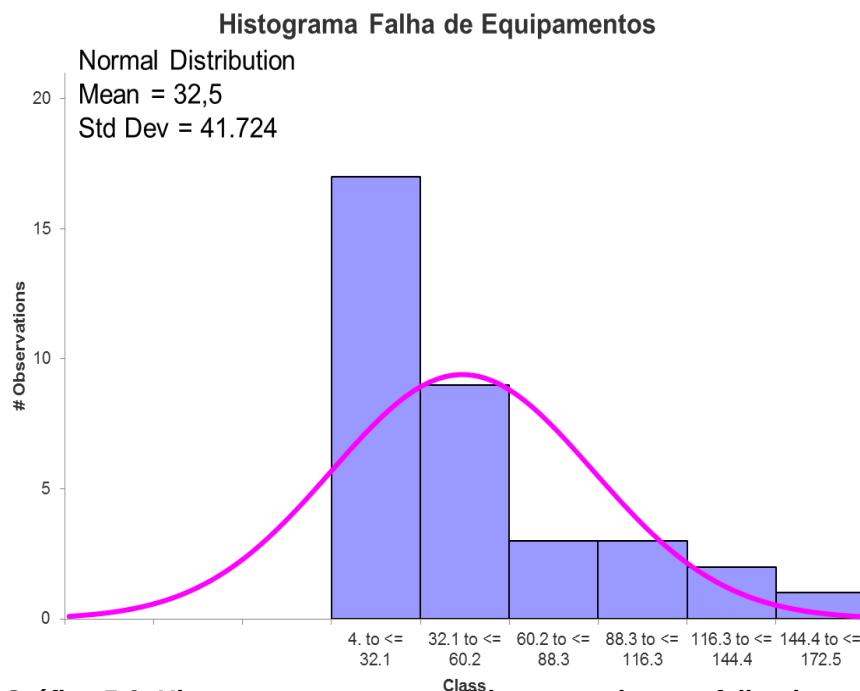


Gráfico 5.6: Histograma tempos perdidos causados por falha de equipamentos.

O *Run Chart* para este problema, mostrado no gráfico 5.7 evidencia qualitativamente como processo está se comportando com relação à média e variação. Isso mostra que determinadas falhas podem ser muito complicadas de serem resolvidas, gerando aumento nos tempos perdidos que prejudicam o desempenho e encarecem os custos associados à operação de perfuração de um poço.

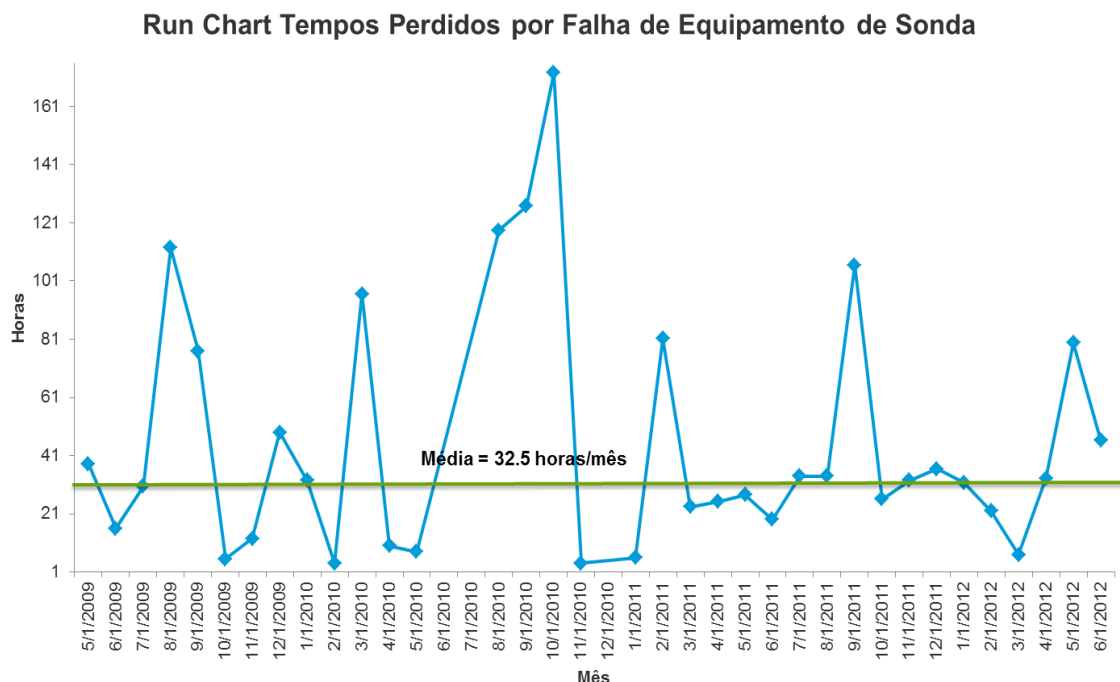


Gráfico 5.7: Run Chart Tempos Perdidos por Falha de Equipamento de Sonda.

A análise do gráfico Pareto permite traçar rotas de atuação para o projeto *Lean Six Sigma* mais bem definidas e restritas. Como pode ser visto no gráfico 5.8, o gráfico Pareto feito com os tempos perdidos por falhas para cada equipamento presente na sonda relaciona um percentual de atuação no desperdício de tempo mais alto para quatro deles. São eles, a bomba de lama, o gerador de energia, o *Top Drive* e o BOP, cuja soma dos tempos perdidos é equivalente a 56,8% do total de todo o problema com tempo perdido.

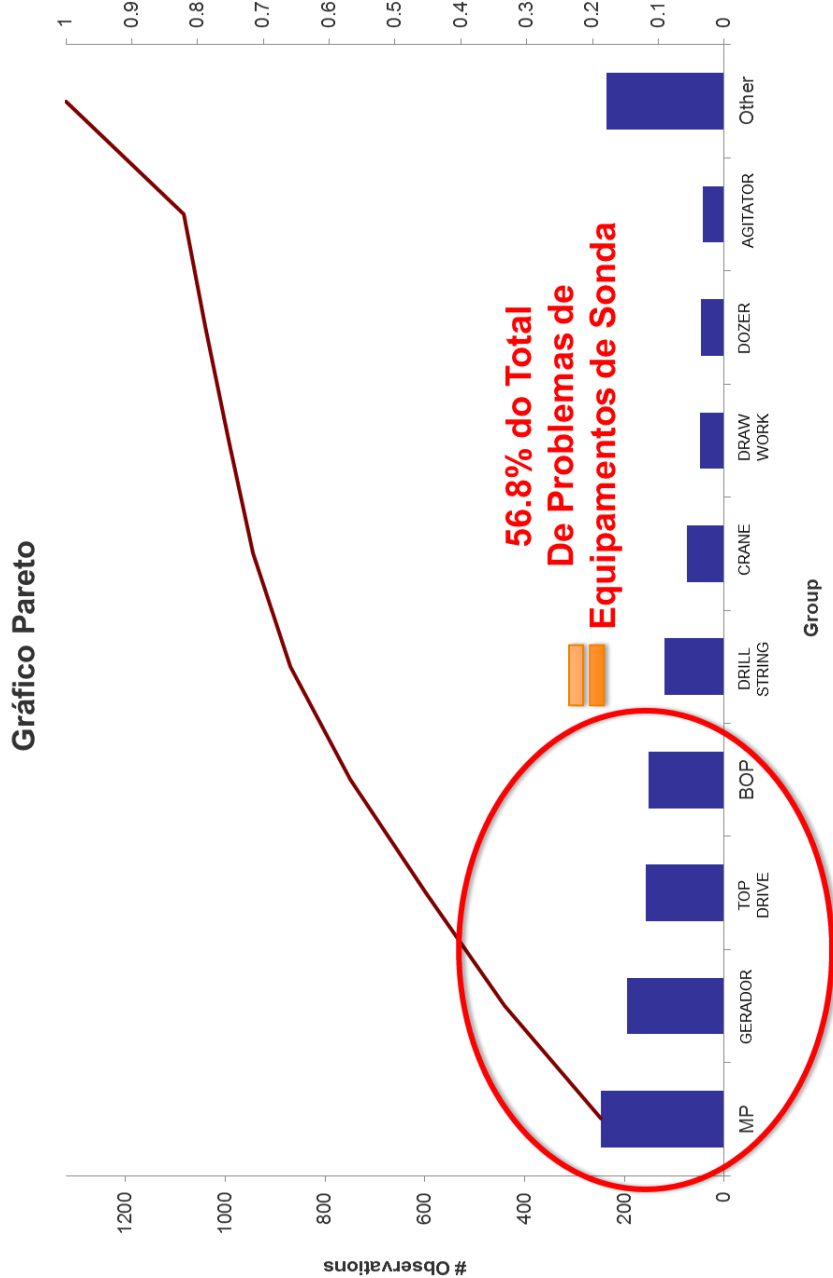


Gráfico 5.8: Gráfico Pareto para falha de equipamentos de sonda.

Sendo assim, como visto na tabela 5.1, pode ser determinado que apenas 17,3% dos equipamentos causam 56,8% dos problemas e, assim, o foco do Projeto *Lean Six Sigma* será baseado em solucionar problemas que atinjam estes equipamentos principais a fim de obter resultados eficazes com menos esforços possíveis.

Sonda	Equipamento	Duração (h)	% Total	Nº Incidentes
S1	Bomba de Lama	247	18,7%	39
S1	Genset	194	14,7%	19
S1	Top Drive	157,25	11,9%	18
S1	BOP	151,5	11,5%	18
S1	Drill String	95,5	7,2%	15
S1	Crane	86,5	6,6%	23
S1	Draw Work	58	4,4%	15
S1	Dozer	55	4,2%	6
S1	Agitator	46	3,5%	3
S1	SCE	43,5	3,3%	8
S1	Handling Tools	39	3,0%	7
S1	Rig Instruments	33	2,5%	2
S1	Unknown	33	2,5%	1
S1	Bit	18,75	1,4%	3
S1	Electrical	18	1,4%	1
S1	Weight Indicator	16	1,2%	3
S1	ROV	7,5	0,6%	3
S1	Connection	4,5	0,3%	1
S1	Driller Console	4,5	0,3%	5
S1	Air Pump	4	0,3%	2
S1	Surface Line	3	0,2%	1
S1	Traveling Block	2,5	0,2%	1
S1	Test Pump	1,5	0,1%	1
Total		1319,5		195

Tabela 5.1: Equipamentos da sonda S1 com histórico de falhas.

Para este caso, não há uma sequência operacional pré-estabelecida. Quando há falha de algum equipamento, a equipe de manutenção é acionada e realiza a mesma seguindo seus próprios parâmetros e julgando as atividades necessárias. Portanto, não há como estimar um Mapa de Processo anterior à implementação das melhoras trazidas pelo projeto *Lean Six Sigma*. Na próxima fase, serão identificadas as causas raízes para cada tipo de problema e, assim, será mais fácil planejar soluções para cada um deles.

5.2.4 Fase Analisar

Nesta fase ocorre a identificação das principais causas responsáveis pela ocorrência dos problemas com os equipamentos identificados. Através dela, será possível obter uma melhor visualização dos problemas como um todo, facilitando a obtenção de um plano de ações a serem tomadas buscando a melhoria do processo.

Um melhor entendimento sobre os equipamentos abordados neste projeto pode ser visto na seção 3.1 deste trabalho.

Identificados os principais equipamentos responsáveis pelo desperdício de tempo, devem-se traçar Diagramas Espinhas de Peixe (figuras 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14) focalizados em cada um deles, com o intuito de identificar as áreas dos problemas chave que representem causas para este excesso de tempo perdido. Este trabalho permitirá que sejam avaliadas e determinadas as causas raízes para cada problema posteriormente.

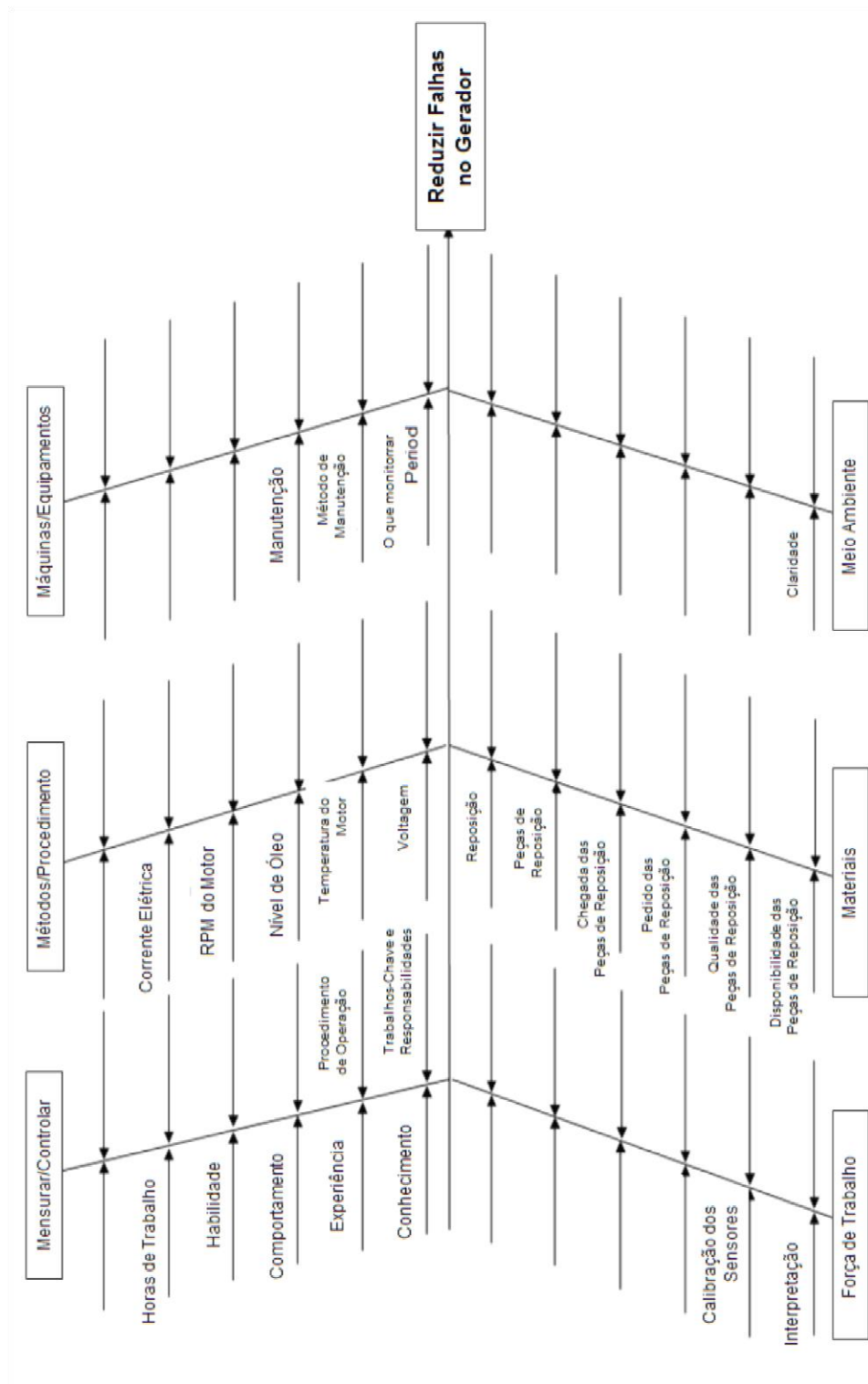


Figura 5.11: Diagrama espinha de peixe para o gerador.

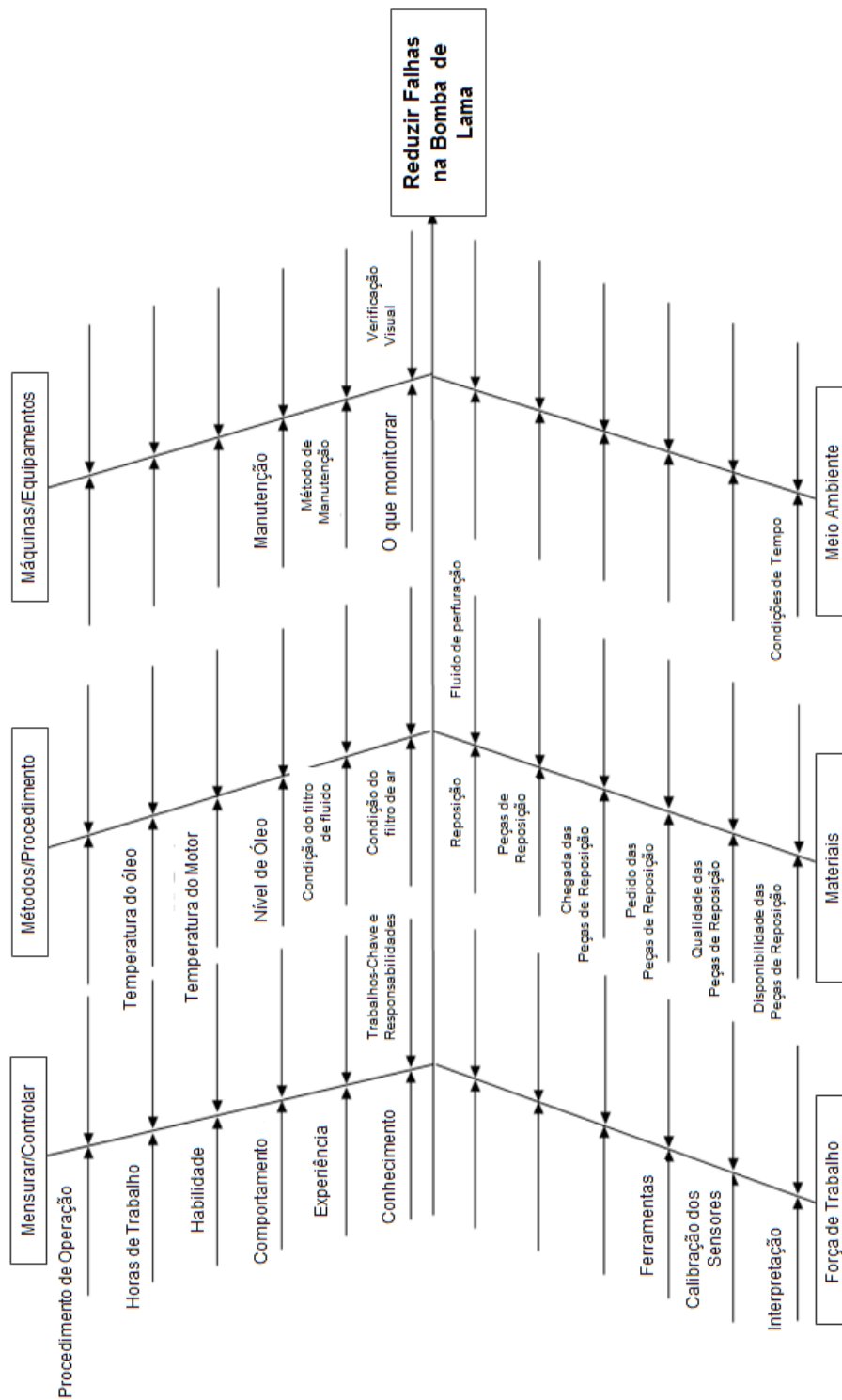


Figura 5.12: Diagrama espinha de peixe para a bomba de lama.

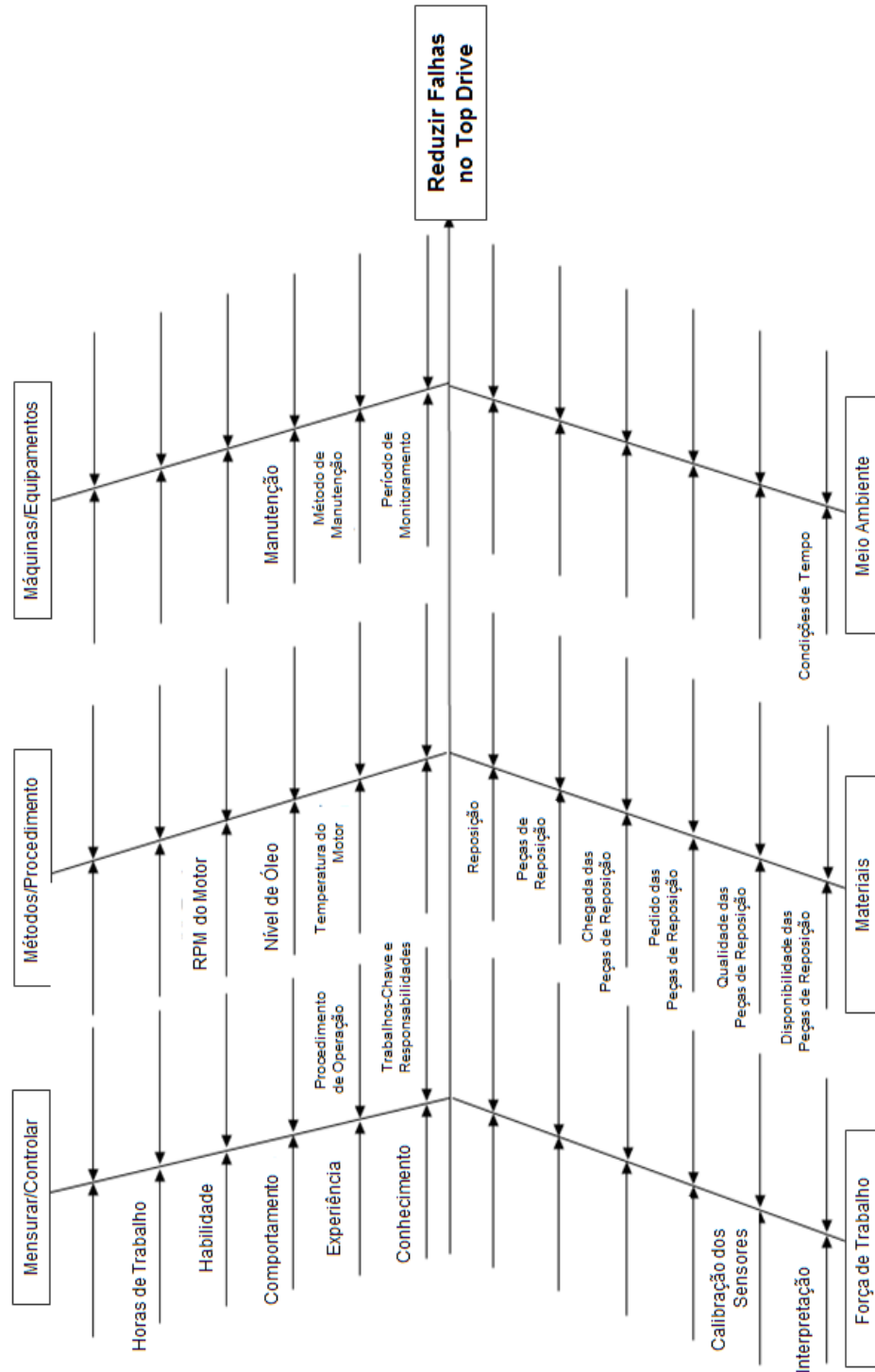


Figura 5.13: Diagrama espinha de peixe para o Top Drive.

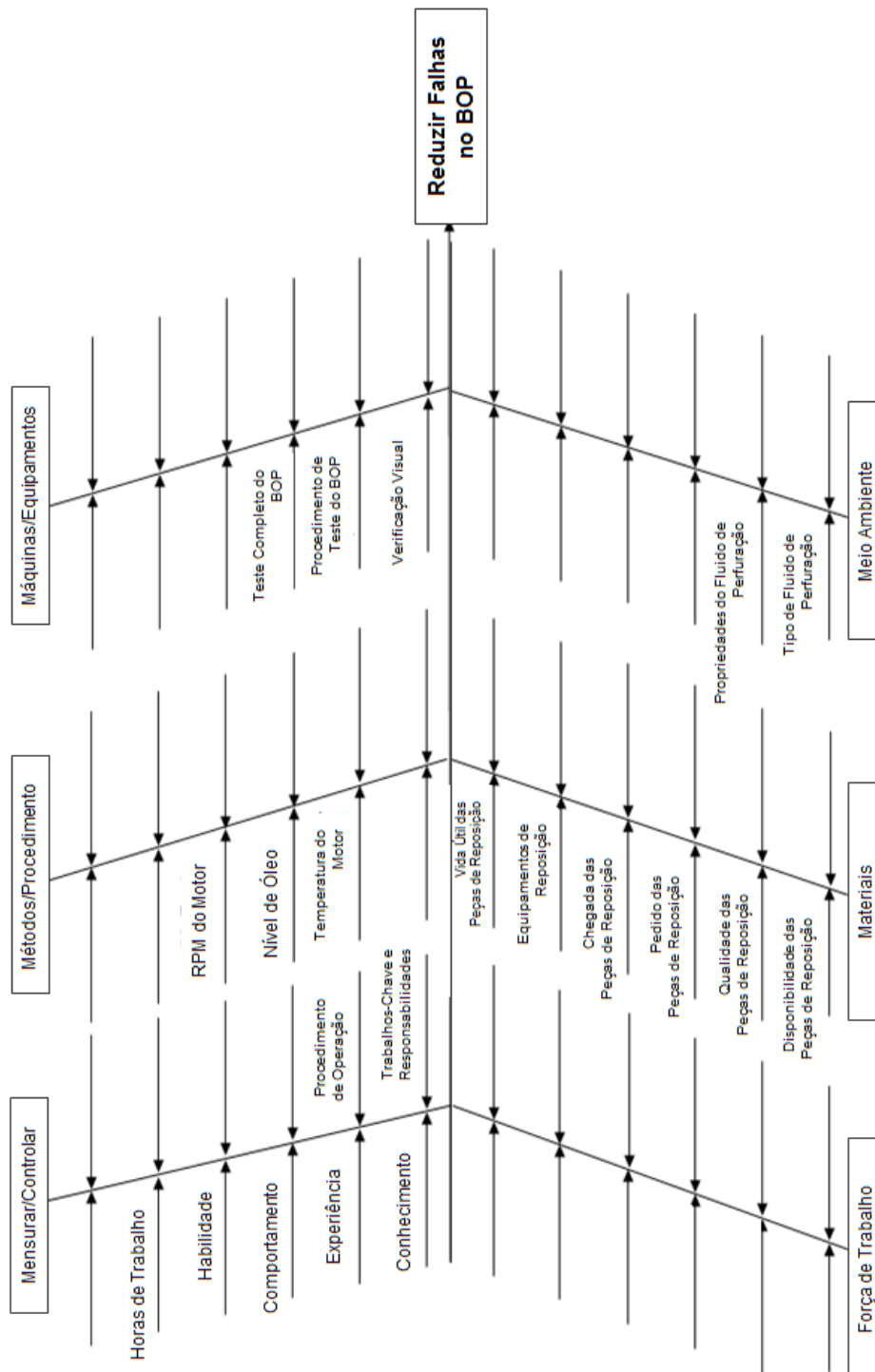


Figura 5.14: Diagrama espinha de peixe para o BOP.

Após o brainstorming com o time do projeto, foram identificadas as principais causas raízes de falhas em cada equipamento e endereçadas ações para eliminar ou prevenir que estas causas ocorram novamente.

5.2.5 Fase Melhoria

Nesta fase será feito um plano de ação visando realizar a melhoria do processo. As causas raízes identificadas na fase anterior, assim como as soluções potenciais serão executadas nesta fase, priorizando-se itens de baixo esforço e alto impacto no efeito desejado.

As ações para cada equipamento são mostradas na tabela 5.2 a seguir.

Bomba de Lama	Causa Raiz	Ação
1	Procedimento de Operação	Realizar um procedimento padrão de operação com as bombas de lama, possuindo uma sequência operacional e fiscalizando a fim de que todos se comprometam a cumpri-lo.
		Mostrar aos funcionários da sonda, um mapa de processos para melhor visualização dos procedimentos.
		Realizar treinamentos na sonda sobre o procedimento operacional.
2	Plano de Manutenção	Premiar as operações de poço que obtiverem um nível de falha de equipamentos mínimo, abaixo do máximo de 16 horas/ mês definifo pelo projeto de Lean Sigma.
		Antes de perfurar o poço, realizar uma inspeção e manutenção visando assegurar que as não haja vazamento nas linhas e que o motor esteja em boas condições de operação.
		Determinar o tempo médio entre falhas na válvula e nas linhas de sucção e descarga e tentar diminuí-lo com o acompanhamento dos parâmetros e realização de ações corretivas mais rapidamente.
3	Qualidade e disponibilidade de peças de reposição	Realizar o monitoramento de parâmetros em horários pré-definidos.
		Assegurar o preenchimento e controle de uma lista de itens que necessitam de manutenção regularmente.
		Determinar e assegurar um estoque mínimo de peças principais, tais como válvulas, pistões e peneiras.
Assegurar que as peças sejam originais do fabricante do equipamento.		
Gerador	Causa Raiz	Ação
1	Manutenção Preventiva/ Monitoramento	Desenvolver uma lista de itens para ser monitorados diariamente.
		Realizar os serviços gerais como descrito no manual do fabricante.
2	Qualidade e disponibilidade de peças de reposição	Assegurar a disponibilidade de peças principais do fabricante na sonda para prevenir grandes tempos perdidos por espera de material.
		Assegurar que as peças sejam originais do fabricante do equipamento.
Realizar a reposição do gerador em casos que a falha ocorra durante operações críticas.		
Top Drive	Causa Raiz	Ação
1	Manutenção Preventiva/ Monitoramento	Desenvolver uma lista de itens para ser monitorados diariamente.
		Assegurar a disponibilidade de peças principais do fabricante na sonda para prevenir grandes tempos perdidos por espera de material.
2	Qualidade e disponibilidade de peças de reposição	Assegurar a disponibilidade de peças principais do fabricante na sonda para prevenir grandes tempos perdidos por espera de material.
		Assegurar que as peças sejam originais do fabricante do equipamento.
BOP	Causa Raiz	Ação
1	Procedimento de Instalação	Fornecer um torque uniforme da chave hidráulica assim que necessário.
		Assegurar a disponibilidade de peças principais do BOP na sonda para prevenir grandes tempos perdidos por espera de material.
2	Qualidade e disponibilidade de peças de reposição	Assegurar a disponibilidade de peças principais do BOP na sonda para prevenir grandes tempos perdidos por espera de material.
		Assegurar que as peças sejam originais do fabricante do equipamento.

Tabela 5.2: Ações para redução de falha de equipamentos.

Além das ações designadas na tabela 5.2, o time desenvolveu uma rede de soluções gerais para o projeto *Lean Six Sigma*, a fim de atingir a meta de redução de 32,5 horas/mês para 16 horas/mês. As soluções gerais são mostradas a seguir:

1. Durante as operações de perfuração, deve haver um monitoramento constante dos equipamentos utilizados. Em caso de qualquer anormalidade, deve-se realizar o reparo durante a operação, sempre que necessário.
2. Deve-se criar um programa de manutenção, a fim de habituar a tripulação da sonda a um cronograma com horários fixos e pré-definidos relacionados a cada equipamento.
3. Distribuir tarefas específicas de monitoramento para cada pessoa da tripulação, dividindo as responsabilidades e tornando cada pessoa responsável por determinado equipamento.
4. Realizar um acompanhamento da gerência sobre as manutenções realizadas, para assegurar que o cronograma traçado permaneça sempre atualizado.
5. Preparar um conjunto de ferramentas de reposição críticas para todos os equipamentos e definir um estoque mínimo para ficarem localizados na sonda S1, como revestimentos de equipamento, filtros de bomba e válvulas de ajuste de vazão.
6. Alertar sobre a importância da manutenção preventiva para toda a tripulação durante as reuniões pré-operacionais.
7. Relembrar para todos os sondadores e tripulação os procedimentos padrões de operação, com sequências operacionais definidos e planos de ações para uma variedade de falhas.
8. Realizar treinamentos periódicos visando o melhor entendimento por parte da tripulação.

9. Procedimentos operacionais determinados para operações padrão como montagem de equipamentos, montagem e descida de coluna, troca de broca, descida de BOP, entre outros.
10. Documentar e reportar resultados dos treinamentos, para assegurar que toda a tripulação seja certificada.

O programa de manutenção previsto para este projeto a fim de definir uma sequência operacional padrão pode ser visto na figura 5.15. Pode-se constatar que há constantes momentos de averiguação e monitoramento de parâmetros neste programa, definidos pela letra A, essenciais para a garantia de bons resultados neste projeto.

Esse plano de ação reflete o caráter comportamental e logístico das soluções previstas para este projeto de *Lean Six Sigma*. Todas foram baseadas em mudanças simples e relacionadas a um melhor aproveitamento do quórum, investindo esforços em qualificação, conscientização, treinamento e um plano organizacional mais bem definido e efetivo, evitando esperas desnecessárias por falta de planejamento anterior. Dessa forma, até que o problema ocorra, as ferramentas de solução já estarão prontas para serem utilizadas.

Este projeto, baseado em dados históricos reais e sigilosos de uma sonda S1 arbitrária, foi implementado e acompanhado por três meses seguintes desde sua aplicação. Os resultados das melhorias implementadas podem ser visualizados através do *run chart*, no gráfico 5.9.

Programa de Manutenção

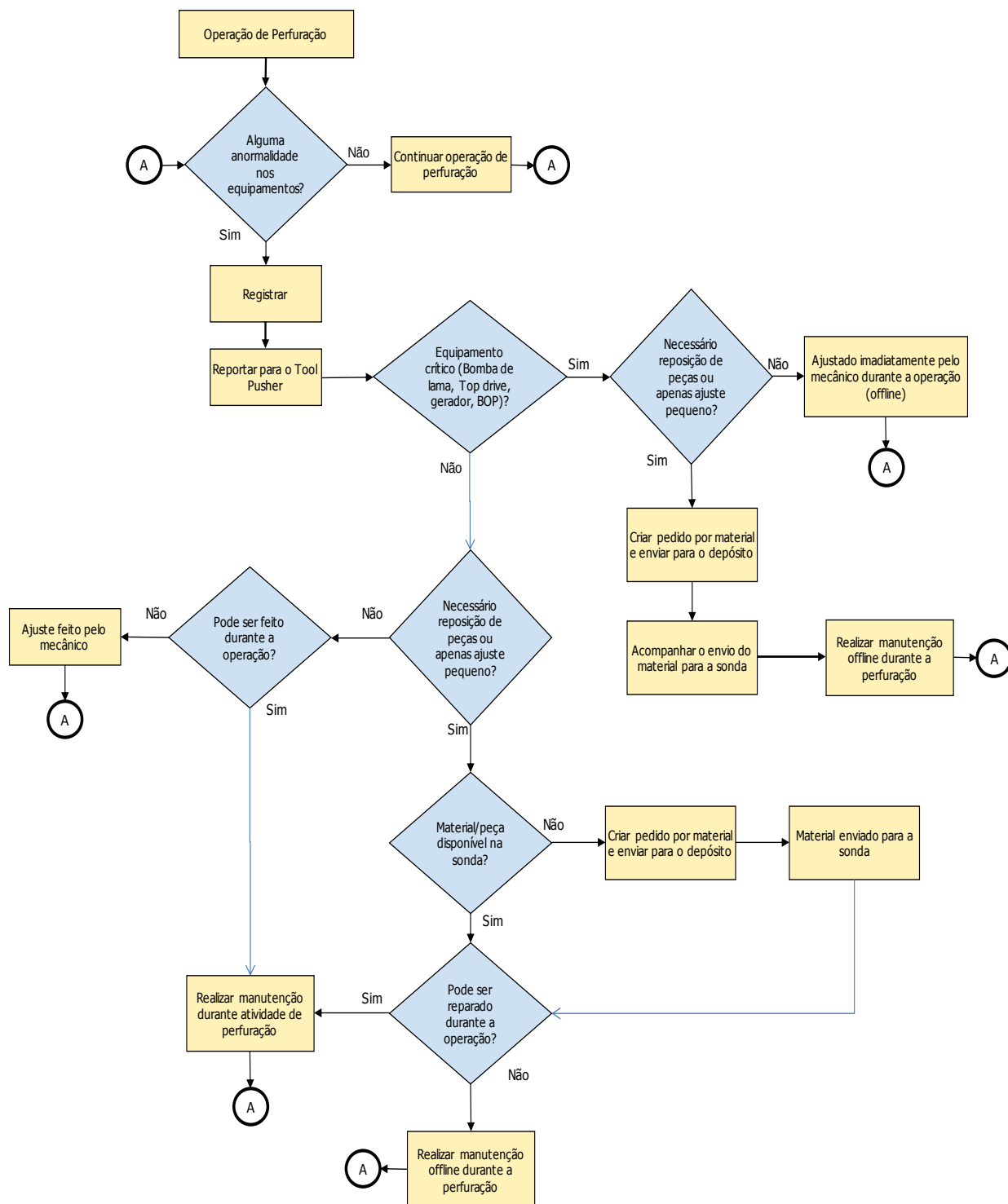


Figura 5.15: Programa de manutenção como solução.

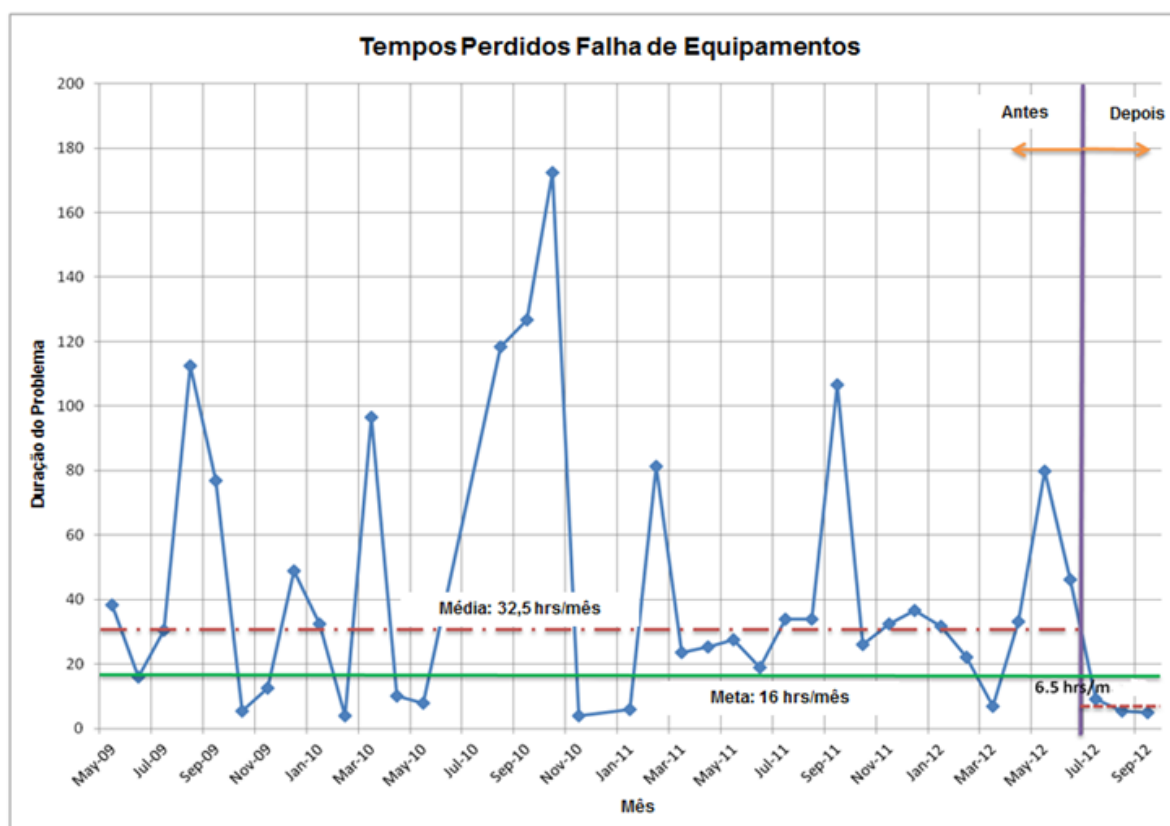


Gráfico 5.9: Run Chart para processo melhorado.

Como podemos visualizar no *run chart*, o objetivo proposto está sendo alcançado, com um resultado abaixo da meta de 16 horas/mês. Através do histograma do gráfico 5.10 pode-se observar uma redução significativa do desvio padrão, de 41,72 horas para 2,18 horas, o que denota uma importante redução da variação no processo.

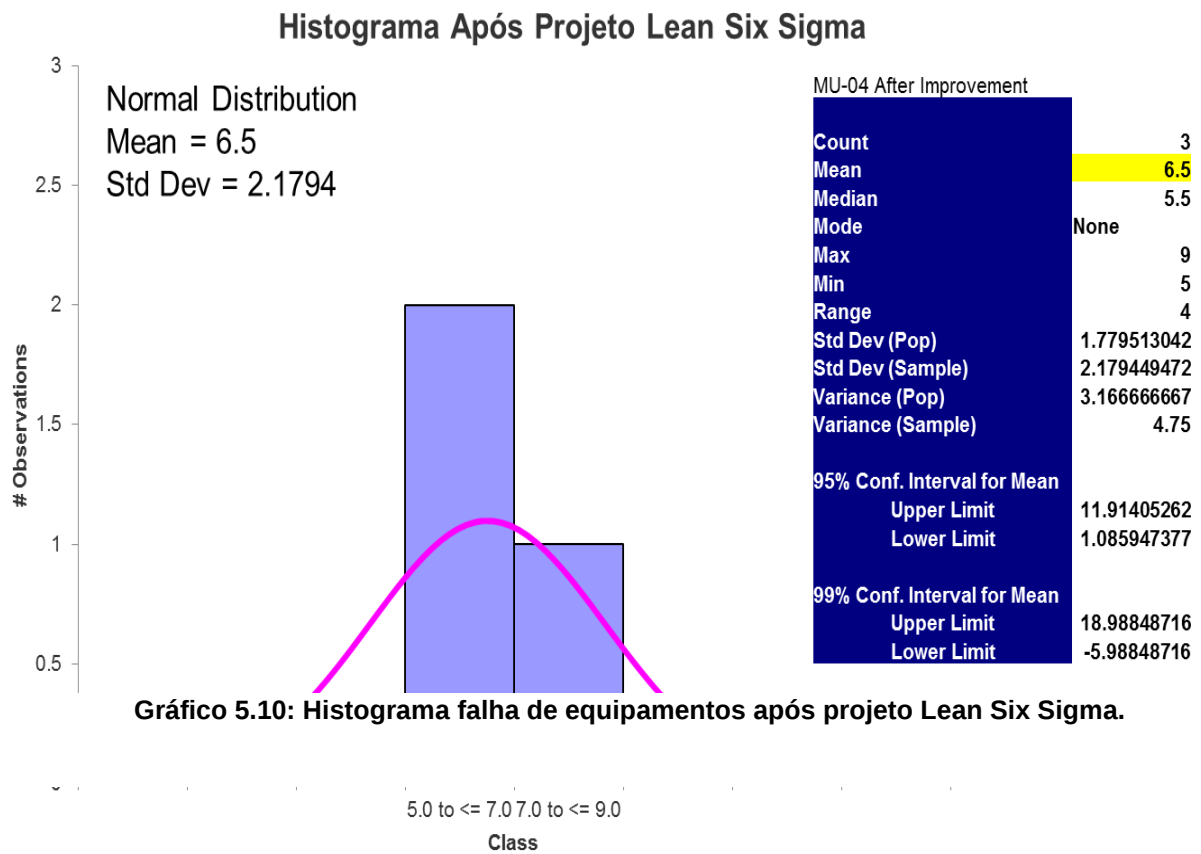


Gráfico 5.10: Histograma falha de equipamentos após projeto Lean Six Sigma.

Após executar os testes estatísticos, pode-se verificar um *p-value* de 0.002 para o teste das médias (Teste T) e um *p-value* de 0.005 para o teste das variâncias (Teste F), o que representa uma confiabilidade nos resultados obtidos acima de 99%, ou seja, o projeto *Lean Six Sigma* alcançou o objetivo com uma redução de 80% nos tempos gastos com falha de equipamentos.

t-Test Result		
Hypothesis Tested:	H0: Before Mean = After Mean H1: Before Mean not equal to After Mean	
	p-value (probability of Type I Error)	0.002
	Confidence that Before Mean not equal to After Mean	99.8%

F-Test Result		
Hypothesis Tested:	H0: Before Variance = After Variance H1: Before Variance not equal to After Variance	
	p-value (probability of Type I Error)	0.005
	Confidence that Before Variance not equal to After Variance	99.5%

Summary Statistics		
	Before	After
Mean	32.5	6.5
StdDev	41.72	2.18
Count	35	3

Figura 5.16: Teste-T e teste-F para comprovação das soluções implementadas.

5.2.6 Fase Controlar

Após a implementação do projeto, como o objetivo foi alcançado, a fase de controle é necessária. Durante essa fase, algumas medidas devem ser tomadas para garantir que o sucesso do projeto perdure por indeterminado período de tempo. Neste período serão

feitas avaliações periódicas dos resultados das operações feitas com a sonda S1, visando gerenciá-los, aplicando novas medidas se necessário.

Além disso, os ganhos financeiros com o projeto devem ser acompanhados por um período de um ano, a fim de garantir os ganhos de redução de custos previstos anteriormente. Baseando-se em cálculos estimativos para os próximos nove meses de implementação, a verificação financeira para este projeto *Lean Six Sigma* é mostrada a seguir:

$$((32,5 - 6,5) \text{ horas/mês} \times 12 \text{ meses/ano} \div 24 \text{ horas/dia}) \times \text{US\$}493.427,57/\text{dia} = \text{US\$}6.414.558.41/\text{ano}.$$

6 CONCLUSÃO

Considerando o panorama global de demanda por novas fontes de reserva de petróleo, buscou-se neste trabalho, a apresentação de estratégias de gestão capazes de oferecer soluções simples aos problemas enfrentados no ramo petrolífero no mundo.

Neste contexto, foram apresentados conceitos e ferramentas principais da metodologia *Lean Six Sigma*, até então, pouco explorada na indústria de petróleo. Sendo assim, decidiu-se focar os estudos na atividade de perfuração de poços, que representa uma das maiores causadoras de riscos e custos ao processo produtivo de óleo.

Foram apresentados os conceitos fundamentais da engenharia de perfuração de poços, assim como algumas definições básicas utilizadas nas operações de perfuração, como a divisão dos tempos em produtivos, não produtivos e perdidos, a fim de melhor entender a aplicabilidade do método nesta atividade.

Buscou-se transmitir um completo entendimento da teoria *Lean Six Sigma*, assim como de suas origens, o Seis Sigma e o *Lean Manufacturing*, pois entende-se neste trabalho, que a correta aplicação do método depende do real entendimento de seus conceitos.

O *Lean Six Sigma* se revelou uma poderosa metodologia, capaz de atingir expressivos resultados de redução de custos nas operações de perfuração através de procedimentos simples e de fácil implementação. Tais resultados, assim como a aplicabilidade do método *Lean Six Sigma* na otimização de operações de perfuração de poços, puderam ser comprovados através da realização de estudos de caso que tinham como foco o aumento de performance e a redução de desperdícios.

O primeiro caso estudado teve como enfoque principal a diminuição dos custos operacionais pela aplicação de técnicas da teoria *Lean Six Sigma* na redução dos tempos

não produtivos, ou seja, aqueles necessários à operação, porém que não geram valor ao objetivo final por não representam um avanço direto no aumento de profundidade do poço. O segundo caso abordou a questão dos desperdícios de tempo e custo pela ocorrência de tempos perdidos no processo, ou seja, aqueles que só geram custos adicionais não planejados ao escopo de operação inicial.

Ambos os estudos de caso foram ajustados à realidade atual do futuro das reservas de óleo e gás brasileiras de exploração de bacias em águas profundas, como o pré-sal. O petróleo encontrado nesta bacia situa-se numa área de 800 quilômetros de extensão entre os estados do Espírito Santo e Santa Catarina, em profundidades que ultrapassam os 7 mil metros em relação ao nível do mar, o que exige um domínio tecnológico nada trivial para que seja extraído e bem aproveitado. Entre os grandes desafios encontrados para sua exploração, está o barateamento do custo de produção e é neste ponto que a teoria *Lean Six Sigma* se insere.

Os estudos de caso revelaram, através de medidas simples, redução de custos na ordem de US\$6.000.000 por ano. As medidas utilizadas nesses estudos focaram a melhoria de problemas específicos ocorridos durante as operações estudadas, porém são inúmeras as possibilidades de aplicação do *Lean Six Sigma* em benefício às atividades de perfuração de poços, revelando a eficácia e abrangência do método.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, N. ***Well Control Problems and Solutions***. Tulsa: The Petroleum Publishing Company, 1980.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Apresenta recursos e atividades desenvolvidas. (Acesso em: 06 de junho de 2014). Disponível em: <www.anp.gov.br>

AGUIAR, S. (2002). **Integração das ferramentas da qualidade ao PDCA e ao Programa Seis Sigma**. Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços Ltda, 2002.

ALDRED W. et al. ***Managing Drilling Risk. Oilfield Review***, v.11, (2), pp. 2-19, Summer 1999.

ALMEIDA, O. P., **Estudo do Efeito de Fronteiras Rígidas sobre a Velocidade Terminal de Partículas Isoméricas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Engenharia Química. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1995.

ANDRIETTA, J. M.; MIGUEL, P. A. C. (2002). **A Importância do Método Seis Sigma na Gestão da Qualidade Analisada sob uma Abordagem Teórica**. 2002. Revista de Ciência & Tecnologia, V. 11, Nº 20, 2002.

BELASKIE, J.P.; McCANN, D.P.; LESHIKAR, J.F. ***A Practical Method To Minimize Stuck Pipe Integrating Surface and MWD Measurements***. In: IADC/SPE Drilling Conference, 1994, Dallas: Paper SPE 27494.

BOURGOYNE, A.T. ***Directional Drilling and Deviation Control***. Applied Drilling Engineering. USA: SPE Textbooks Series, 1986. Ch. 8, p.351-473.

CABRERA, A. J. (2006). **Dificuldade de Implementação de Programa Six Sigma: Estudos de Casos em Empresas com Diferentes Níveis de Maturidade**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

GHINATO, P. (1994). **Elementos para a compreensão de princípios fundamentais do Sistema Toyota de Produção: Automação e Zero Defeitos**. Mestrado PPGE/UFGRS, Porto Alegre, 1994.

GIANNINI, R. (2007). **Aplicação das ferramentas do pensamento enxuto na redução de perdas em operações de serviços**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

GIL, A. C. (2007). **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GOH, T. N. (2002). *The role of statistical design of experiments in six sigma: perspectives of a practitioner*. *Quality Engineering*, v. 14, n. 4, 2002.

International Energy Agency. [Acesso em: 03 de fevereiro de 2014]. < <http://www.iea.org/>>

MARCONDES, V. A. (2012). **Introdução aos conceitos de Six Sigma**. In: **Curso de Formação de Green Belts Lean Six Sigma**, 2012, Lorena.

MEIER, D & LIKER, J. (2006). *The Toyota way Fieldbook*, **McGraw-Hill Education**, p.475, 2006.

Motorola. [Acessado em 15 de março de 2014]. <<http://www.motorola.com/us/About-Motorola/Corporate-About-Motorola.html>>

Ohno, T. (1997). **O Sistema Toyota de Produção: além da produção em larga escala**. Porto Alegre: Bokmann, 1997.

Pacheco, D. A. J. (2012). **Integrando a Estratégia de Produção com a Teoria das Restrições, Lean e Seis Sigma: uma abordagem metodológica**. (Dissertação de mestrado). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2012.

PANDE, S. (2001). **Estratégia Six Sigma: Como a GE, a Motorola e outras grandes empresas estão aguçando seu desempenho**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

PZYDEK, T., *The Six Sigma Handbook*., Mc-Graw Hill, 1 - 16, 2003.

RECHULSKI, D.K. (2004). **Programas de qualidade seis sigma – Características distintas do modelo DMAIC e DFSS**. PIC-EPUSP, n.2, 2004.

RIANE, A. M., (2006). **Estudo de Caso: O Lean Manufacturing Aplicado na Becton Dickinson**. 44p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF, Juiz de Fora, 2006.

Rig Zone. [Acesso em: 22 de julho de 2014]. <<https://www.rigzone.com/data/dayrates/>>

ROTONDARO, R. G. (2002). **Six Sigma: estratégia gerencial para melhoria de processos, produtos e serviços**. São Paulo: Atlas, 2002.

SILVA, N. F. (2007). **Análise do sistema Toyota de produção em duas empresas de ramos industriais distintos.** In: XXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 9 a 11., 2007, Foz do Iguaçu. A energia que move a produção - um diálogo sobre integração, projeto e sustentabilidade: anais. Foz do Iguaçu, Abepro, 2007.

SIQUEIRA, J. (2005). **O Modelo de Maturidade de Processos: como maximizar o retorno dos investimentos em melhoria da qualidade e produtividade.** 2005.

SHOOK, J. & ROTHER, M. (2003). ***Learning to See. Value-Stream Mapping to create Value and Eliminate Muda. The Lean Enterprise Institute. Cambridge, MA USA.*** Version 1.3, 2003.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo.** Rio de Janeiro: Petrobrás/Editora Interciência, 2001.

TOLEDO, J. C. (2001). **Conceitos básicos de qualidade de produto.** In: BATALHA, M.O. Gestão Agroindustrial. v. 1. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2001.

TRAD, S, & MAXIMIANO, A.C (2009). **Seis Sigma: Fatores Críticos de Sucesso para sua Implementação.** Disponível em: <http://www.anpad.org.br/rac>, 2009.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T.; ROOS, D. (1992). **A máquina que mudou o mundo.** 3ª.ed. Rio de Janeiro: Campus, 1992.

WIBISORO, F.A.; (2009). ***Drilling Reducing Rig Equipments Failure.*** Rio de Janeiro. Relatório Interno. **(Acesso Restrito)