



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DÁRIO CONCEIÇÃO SOARES FILHO

ANÁLISE DE PROJETOS DE MONTAGEM DE TURBINAS EÓLICAS

FORTALEZA

2017

DÁRIO CONCEIÇÃO SOARES FILHO

ANÁLISE DE PROJETOS DE MONTAGEM DE TURBINAS EÓLICAS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Alysson Andrade Amorim

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S653a Soares Filho, Dário Conceição.
Análise de projetos de montagem de turbinas eólicas / Dário Conceição Soares Filho. – 2017.
79 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Dr. Alysson Andrade Amorim.

1. Turbina eólica. 2. Montagem mecânica. 3. Gerenciamento de projetos. I. Título.

CDD 620.1

DÁRIO CONCEIÇÃO SOARES FILHO

ANÁLISE DE PROJETOS DE MONTAGEM DE TURBINAS EÓLICAS

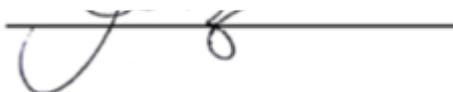
Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em 08/01/2018.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Alysson Andrade Amorim (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)



Prof. Dr. Luiz Soares Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)



Prof. Dr. Francisco Elicivaldo Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À Deus.
Aos meus pais, Dário e Náide.

AGRADECIMENTOS

À minha família e, especialmente, ao meu bem, pelo incentivo e ânimo nos momentos difíceis.

RESUMO

Com o expressivo crescimento da energia eólica no Brasil desde 2011, a execução de projetos de montagem de turbinas eólicas, que é uma etapa da implantação de usina eólica, que congrega fundamentos de projeto de máquinas e operações com guindastes, tem se apresentado como uma atividade complexa e de difícil execução. No acompanhamento realizado em 2017 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), nos projetos em construção contratados pelo ACR (Ambiente de Contratação Regulado), apenas 36% estão com as obras de acordo com o cronograma planejado. Neste contexto, buscar excelência em projetos de montagem de turbinas eólicas é uma questão de sobrevivência para os empreendedores deste mercado. Este trabalho tem como objetivo analisar a fase de execução de projetos de montagem de turbinas eólicas, considerando o planejamento realizado segundo o PMBOK (*Project Management Body of Knowledge*). O estudo analisou um projeto de montagem de 15 turbinas eólicas, considerando o transporte e a montagem mecânica de componentes. A metodologia utilizada compreende uma pesquisa exploratória e descritiva, por envolver levantamento bibliográfico e observação sistemática; documental e estudo de campo, caracterizando-se como um estudo de caso. Planejado e realizado em quatro etapas. Como resultado, apenas 82% do escopo foi executado dentro do tempo planejado. O custo final de execução do projeto ficou 5,5 vezes maior que o planejado. E, foi necessário mais tempo para terminar o projeto, com cerca de 21% a mais em relação ao cronograma planejado.

Palavras-chave: Turbina eólica. Montagem mecânica. Gerenciamento de projetos.

ABSTRACT

With the expressive growth of wind energy in Brazil since 2011, the execution of wind turbine assembly projects, which is a stage of the wind farm implantation, which brings together fundamentals of machine design and operations with cranes, has been presented as an activity complex and difficult to execute. In the monitoring carried out in 2017 by the National Electricity Agency (ANEEL), in the projects under construction contracted by the ACR (Regulated Contracting Environment), only 36% are with the works according to the planned schedule. In this context, seeking excellence in wind turbine assembly projects is a matter of survival for the entrepreneurs in this market. This work aims to analyze the implementation phase of wind turbine assembly projects, considering the planning carried out according to the PMBOK (Project Management Body of Knowledge). The study analyzed a project of assembly of 15 wind turbines, considering the transportation and mechanical assembly of components. The methodology used includes exploratory and descriptive research, since it involves a bibliographical survey and systematic observation; documentary and field study, characterizing itself as a case study. Planned and accomplished in four steps. As a result, only 82% of the scope was executed within the planned time. The final cost of running the project was 5.5 times higher than planned. And, it took more time to finish the project, about 21% more than the planned schedule.

Keywords: *Wind turbine. Mechanical assembly. Project management.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxo de geração de energia eólica.....	20
Figura 2 – Os grupos de processos de gerenciamento de projetos	26
Figura 3 - Comparação entre torque e tensionamento	33
Figura 4 - Tipos de uniões de uma turbina eólica.....	34
Figura 5 - Sentido de torque de uniões de segmentos de torre	35
Figura 6 - Sequência de montagem dos componentes de uma turbina.....	35
Figura 7 - Detalhes da estrutura da torre de uma turbina eólica.....	37
Figura 8 - Recebimento e preparação de segmentos de torre	38
Figura 9 - Exemplo das fases da construção da fundação da turbina eólica.....	38
Figura 10 - Preparação e limpeza de segmentos de torre antes do içamento.....	39
Figura 11 - Colocação de acessórios de içamento para segmentos de torre	40
Figura 12 - Exemplos de içamento, com a verticalização de segmento	40
Figura 13 - Montagem do segmento da base T1.....	41
Figura 14 - Exemplo de preparação do flange superior de um segmento de torre	41
Figura 15 - Sequência de içamentos de segmentos de torre	42
Figura 16 - Exemplo de procedimento de tensionamento	43
Figura 17 - Exemplo de indicação de torque realizado numa união de segmentos.....	44
Figura 18 - Principais componentes internos de uma <i>Nacelle</i>	45
Figura 19 - Principais componentes da <i>Nacelle</i> vista de cima	46
Figura 20 - Principais componentes de uma <i>Nacelle</i> vista de baixo	47
Figura 21 - Exemplo de recebimento e preparação da <i>Nacelle</i>	48
Figura 22 - Sistema hidráulico de freios e bloqueio do Rotor.....	49
Figura 23 - Preparação da <i>Nacelle</i> para o içamento	50
Figura 24 - Montagem da <i>Nacelle</i> no segmento do topo T3	50
Figura 25 - Exemplo do processo de aperto da união T3/ <i>Nacelle</i>	51
Figura 26 - Exemplo de acoplamento do eixo do gerador.....	52
Figura 27 - Montagem do acoplamento do lado do disco de freio	52
Figura 28 - Montagem do acoplamento do lado do gerador.....	53
Figura 29 - Montagem do espaçador com flanges.....	53
Figura 30 - Ajuste da face do flange do eixo principal com a do eixo do gerador.....	54
Figura 31 - Inspeção de recebimento de Pás.....	55

Figura 32 - Inspeção de recebimento de <i>hub</i>	56
Figura 33 - Indicação de locais específicos de içamento numa pá	56
Figura 34 - Pré-montagem do Rotor	57
Figura 35 - Ilustração do torqueamento de pás	57
Figura 36 - Içamento do Rotor	58
Figura 37 - Encaixe e torque do Rotor	59
Figura 38 - Guindaste LTM 1500	66
Figura 39 - Guindaste LR 1600	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Previsões da Supervisão de Implantação para 2016.....	14
Gráfico 2 - Exemplo de janelas de vento para montagem de turbinas eólicas	36
Gráfico 3 - Fluxograma do Estudo de Caso	60
Gráfico 4 - Cronograma de montagem planejado para 15 turbinas eólicas.....	68
Gráfico 5 - Visão geral do escopo de montagem.....	69
Gráfico 6 – Custo planejado de montagem	70
Gráfico 7 - Média das velocidades de vento nos dias de montagem	71
Gráfico 8 - Cronograma de montagem executado para 15 turbinas eólicas	71
Gráfico 9 – Acompanhamento do tempo em função da linha de base do cronograma	72
Gráfico 10 – Acompanhamento do custo em função da linha de base do cronograma.....	73
Gráfico 11 - Valor agregado ao longo do tempo atualizado na data de acompanhamento	73
Gráfico 12 - Variação do custo ao longo do tempo atualizado na data de acompanhamento	74
Gráfico 13 - Índices ao longo do tempo atualizado na data de acompanhamento.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACR	Ambiente de Contratação Regulado
ACL	Ambiente de Contratação Livre
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
CR	Custo Real
COTA	Valor Planejado
DOF	<i>Degree Of Freedom</i>
EAP	Estrutura Analítica do Projeto
EHD	Elasto-hidrodinâmica
ENT	Estimativa no Término
EOL	Usina Eólica
EPT	Estimativa de Prazo para Término
GVA	Gerenciamento do Valor Agregado
IDC	Índice de Desempenho de Custos
IDP	Índice de Desempenho de Prazos
LR	<i>Crawler crane</i>
LTM	<i>Mobile crane</i>
MDP	Método do Diagrama de Precedência
ONT	Orçamento no Término
PMBOK	<i>Project Management Body of Knowledge</i>
SEMACE	Superintendência Estadual do Meio Ambiente
VA	Valor Agregado
VC	Variação de Custos
VP	Valor Planejado
VPR	Variação de Prazos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Contextualização.....	15
1.2 Objetivos.....	15
1.2.1 Objetivo Geral	16
1.2.2 Objetivos Específicos	16
1.3 Justificativa	16
1.4 Metodologia.....	17
1.5 Estrutura do Trabalho.....	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 Energia Eólica.....	19
2.2 Tecnologia de Montagem Mecânica.....	20
2.2.1 Eixos.....	22
2.2.2 Lubrificação.....	23
2.2.4 Parafusos e Uniões	24
2.4 Gerenciamento de Projetos.....	25
2.4.1 Processos de Iniciação	27
2.4.2 Processos de planejamento	27
2.4.3 Processos de Execução	28
2.4.4 Processos de Monitoramento e Controle.....	29
2.4.5 Processos de Encerramento	30
3 ESTUDO DE CASO	32
3.1 Caracterização do Setor de Energia Eólica.....	32
3.2 Projeto de Montagem de Turbinas Eólicas	33
3.2.1 Montagem de Segmentos de Torre.....	36
3.2.2 Montagem de <i>Nacelle</i>	44
3.2.3 Montagem de Rotor.....	54
3.3 Etapas do Estudo de Caso.....	60
3.3.1 Seleção do Projeto de Montagem	60
3.3.2 Caracterização do Projeto Selecionado	62
3.3.3 Pesquisa de Campo.....	63
3.3.4 Análise dos Resultados.....	63

3.4 Desenvolvimento do Estudo de Caso	63
3.4.1 Seleção do Projeto de Montagem	64
3.4.2 Caracterização do Projeto Selecionado	65
3.4.3 Pesquisa de Campo	70
3.4.4 Análise dos Resultados	75
3.5 Recomendações	76
3.6 Considerações Finais	77
4 CONCLUSÃO.....	79
REFERÊNCIAS	80

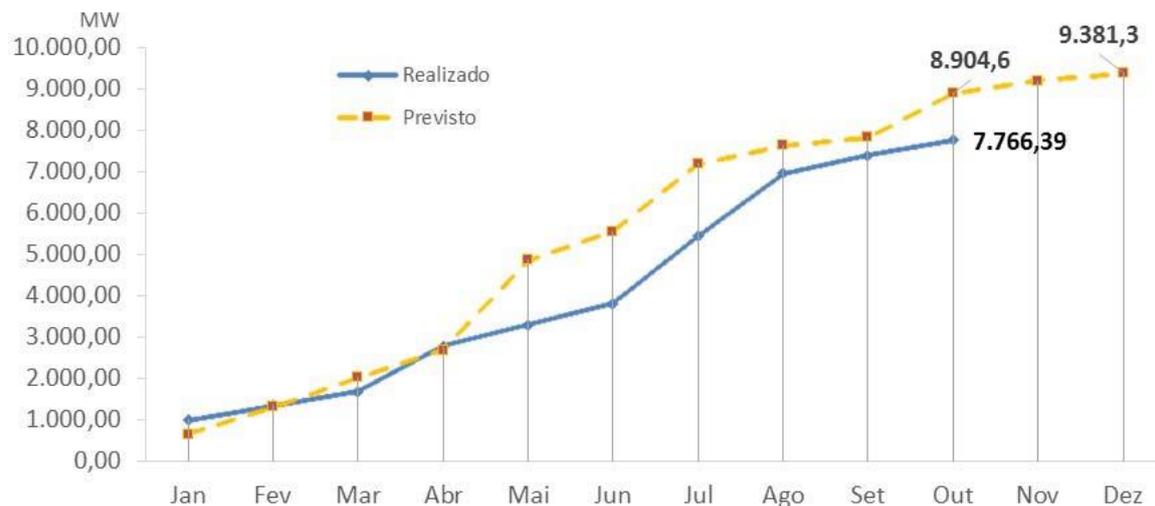
1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Relatório de Acompanhamento de Implantação de Empreendimentos de Geração N° 9, ANEEL (2016), até outubro deste ano mais de 2.000 MW de potência instalada de Usinas Eólicas (EOL) entraram em operação comercial¹. Cerca de 350 empreendimentos estão em implantação, sendo previstos aproximadamente 350 MW para entrada em operação ainda em 2016, e mais 8.000 MW entre 2017 e 2021.

A maioria dos empreendimentos em implantação tem energia comprometida no ACR (Ambiente de Contratação Regulada) e representa 82% da capacidade outorgada em processo de implantação. Os demais empreendimentos têm energia comprometida em autoprodução ou no Ambiente de Contratação Livre (ACL).

O gráfico 1 ilustra a entrada em operação comercial dos novos empreendimentos de geração de energia elétrica em capacidade instalada (MW) prevista e realizada para o ano de 2016.

Gráfico 1- Previsões da Supervisão de Implantação para 2016



Fonte: Relatório de Acompanhamento de Implantação de Empreendimentos de Geração, ANEEL (2016)

A linha de previsão foi fundamentada com base nos dados coletados pela fiscalização até janeiro de 2016, e a linha de realização representa a capacidade instalada que entrou em operação até outubro de 2016. A defasagem acumulada entre a previsão e o

¹ Operação comercial é a situação operacional em que a energia produzida pela unidade geradora está disponibilizada ao sistema, podendo atender aos compromissos mercantis do Agente ou para o seu uso exclusivo. (Resolução ANEEL nº 583/2013)

realizado se dá principalmente em função de cerca de 900 MW de potência que seriam promovidos pela entrada em operação de unidades geradoras das UHE's (Belo Monte, Jirau e Santo Antônio), além de cerca de 300 MW de eólicas que ainda não entraram em operação.

1.1 Contextualização

De acordo com a ANEEL (2017), do total de 257 empreendimentos fiscalizados em 2017, com relação a usinas outorgadas e em fase de construção no país, apenas 36% estão de acordo com o planejamento. Outras 36% estão com as obras atrasadas e 28 ainda nem começaram, e nem apresentam previsão de início das obras. As razões podem ser desde atrasos no início das obras civis das estruturas da usina, ou de eventual paralização forçosa, tais como, ações judiciais, embargos e perda de eficácia de licenças.

De acordo com a SEMACE (2017), o licenciamento ambiental, considerado instrumento preventivo, que consiste em um procedimento dividido em tres fases distintas: a licença prévia, que avalia a localização e concepção do projeto; a licença de instalação, que avalia as especificações e o projetos aprovados; e, a licença de operação, que avalia o que consta nas licenças anteriores, e as condições determinadas para a operação. O prazo mínimo de análise de cada licença é de 60 dias. Ou seja, fazer planejamento, realizar controles na execução, e estabelecer metas de cumprimentos das especificações técnicas e de prazos é fundamental para garantir a viabilidade do empreendimento.

As usinas que irão operar conectadas à rede elétrica, além de precisar atender aos critérios de obtenção e manutenção das licenças ambientais, o alto custo do investimento e a necessidade de faturamento o quanto antes, requer o cumprimento do marco de início de operação com a máxima precisão com relação a data planejada. Neste contexto, buscar excelência em projetos de montagem de turbinas eólicas é uma questão de sobrevivência para os empreendedores deste mercado. Então, surge o questionamento: as práticas de gerenciamento de projetos de montagem de turbinas eólicas têm mantido os desvios entre o planejado e o executado dentro dos limites aceitáveis?

1.2 Objetivos

Para este Estudo de caso, foram estabelecidos objetivos geral e específicos.

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a fase de execução de projetos de montagem de turbinas eólicas, considerando o planejamento realizado segundo o PMBOK.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Descrever as práticas e procedimentos técnicos utilizados na montagem de turbinas;
- Levantar informações da fase de planejamento de um projeto de montagem de turbinas eólicas;
- Identificar desvios e suas causas, observados entre o planejado e o executado em um projeto de montagem de turbinas eólicas;
- Recomendar boas práticas que possam contribuir para diminuir os desvios observados nos projetos de montagem de turbinas eólicas.

1.3 Justificativa

A demanda para montar turbinas eólicas no Brasil é cada vez mais crescente. A maioria das empresas especializadas são de origem estrangeiras, motivadas pela experiência pioneira na Europa e nos Estados Unidos. Entretanto, geograficamente, o Brasil é um país continental. As turbinas precisam ser transportadas a grandes distâncias antes da montagem. As usinas, normalmente, estão localizadas em regiões com grande carência de recursos e de mão de obra especializada. E, ainda, no período de montagem, a incidência de ventos fortes nem sempre são consideradas como risco na garantia dos prazos de entregas. O que pode ocasionar desvios no tempo de execução das atividades e aumentar os custos planejados para o projeto.

A motivação para a realização deste trabalho foi observações de atrasos na conclusão das atividades, com orçamento sempre além do planejado e práticas de gerenciamento de projetos passíveis de melhoria, na montagem de turbinas eólicas.

Com as informações, mesmo que resumidas, apresentadas neste trabalho, com relação ao processo de montagem de turbinas eólicas, ferramentas de planejamento e

gerenciamento, além de fundamentos de análise de resultados, espera-se contribuir para despertar interesses pelo conhecimento ou aperfeiçoamentos para o mercado de energia eólica.

1.4 Metodologia

A elaboração de um projeto de pesquisa e o desenvolvimento da própria pesquisa, necessita, para que seus resultados sejam satisfatórios, estar baseados em planejamento cuidadoso, reflexões conceituais sólidas e alicerçados em conhecimentos já existentes (SILVA & MENEZES, 2005). Já para MARCONI & LAKATOS (2002), os critérios para classificação dos tipos de pesquisa variam de acordo com o enfoque dado pelo autor. A divisão obedece a interesses, condições, campos, metodologia, situações, objetivos, objetos de estudo, etc.

De acordo com GIL (2008), os tipos de pesquisa podem ser classificados em dois grandes grupos: quanto aos objetivos e quanto procedimentos técnicos.

Quanto aos objetivos, pode ser classificada como: pesquisa exploratória, cujo objetivo é proporcionar maior familiaridade com o problema, podendo envolver levantamento bibliográfico; pesquisa descritiva, cujo objetivo é descrever as características de determinados fenômenos, com coleta de dados e observação sistemática; e, pesquisa explicativa, cujo objetivo é identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos, que é o tipo que mais aprofunda o conhecimento da realidade, porque explica a razão, o porquê das coisas.

Quanto aos procedimentos técnicos, pode ser classificada como pesquisa bibliográfica, quando é desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos. Na pesquisa documental, que é muito parecida com a bibliográfica. Cujas diferenças estão na natureza das fontes, pois esta forma vale-se de materiais que não receberam ainda um tratamento analítico. Além de analisar os documentos de “primeira mão” (documentos de arquivos, instituições etc.). Procedem-se à solicitação de informações acerca do problema estudado para, em seguida, mediante análise quantitativa, obterem-se as conclusões correspondentes aos dados coletados. No estudo de campo procura-se o aprofundamento de uma realidade específica. É basicamente realizada por meio da observação direta das atividades, para captar as explicações e interpretações que ocorrem naquela realidade. No estudo de caso, o procedimento técnico consiste no estudo profundo e

exaustivo de um ou poucos objetos, de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento.

Assim sendo, este trabalho pode ser classificado, quanto aos objetivos, como exploratória e descritiva, por envolver levantamento bibliográfico e observação sistemática, respectivamente. Quanto aos procedimentos técnicos, pode ser classificada como pesquisa documental e estudo de campo de um evento específico, caracterizando-se como um estudo de caso, por envolver um estudo profundo e exaustivo, de maneira que permitiu seu amplo e detalhado conhecimento.

De acordo com YIN (2001), o estudo de caso é apenas uma das muitas maneiras de se fazer pesquisa. Experimentos, levantamentos, pesquisas históricas e análises de informações em arquivos são alguns exemplos de outras maneiras de se realizar pesquisa. Cada estratégia apresenta vantagens e desvantagens próprias, dependendo, basicamente de três condições: o tipo de questão da pesquisa; o controle que o pesquisador possui sobre os eventos comportamentais efetivos; o foco em fenômenos históricos, em oposição a fenômenos contemporâneos.

1.5 Estrutura do Trabalho

A estrutura deste presente trabalho será dividida em quatro capítulos. O primeiro será a introdução. Este iniciará com uma breve contextualização do tema, apresentando os objetivos gerais e específicos, sua justificativa e a metodologia utilizada na construção do trabalho.

O segundo capítulo trará a referencial teórico. Neste capítulo são apresentadas as fundamentações teóricas com a ajuda de autores consagrados que embasam os assuntos estudados no trabalho, sendo o objetivo do capítulo introduzir o leitor sobre o assunto abordado para que o mesmo disponha de um melhor entendimento no estudo de caso.

O terceiro capítulo é do estudo de caso e nele serão apresentados a caracterização do empreendimento, seu processo produtivo, a descrição e os resultados obtidos com o estudo.

O quarto e último capítulo trará a conclusão do trabalho realizado, com todas as suas considerações e sugestões para trabalhos futuros, sendo seguido das referências bibliográficas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

De acordo com BURTON, SHARPE, JENKINS, & BOSSANYI (2001), a performance de uma turbina eólica pode ser caracterizada pela forma como os três indicadores principais – potência, torque e rotação – variam com a velocidade do vento. A potência determina a quantidade de energia captada pelo rotor, o torque desenvolvido determina o tamanho da caixa de velocidades, que transmite rotação ao gerador a partir do Rotor. A rotação do rotor tem grande influência no projeto estrutural da torre.

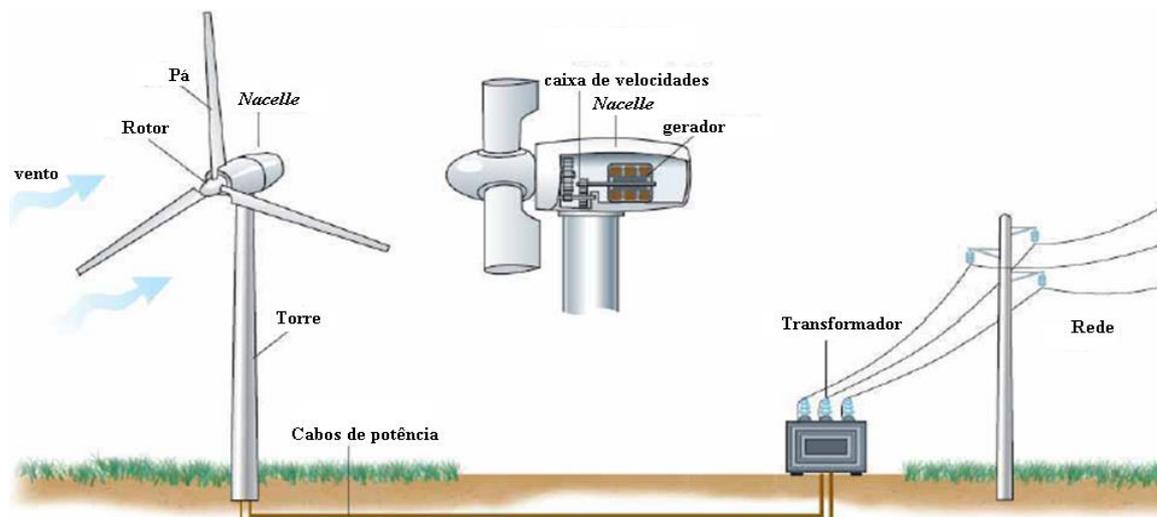
Para BUDYNAS & NISBETT (2011), transmitir potência a partir de uma fonte através de uma máquina com uma atuação de saída é uma das tarefas mais comuns das máquinas. Um modo eficiente de transmitir potência é por meio do movimento rotativo de um eixo que é suportado por mancais. Engrenagens e acoplamentos podem ser incorporados para proporcionar o torque e mudanças de velocidades entre eixos.

2.1 Energia Eólica

De acordo com REZENDE (2015), a demanda de energia cresce 4% ao ano e o Brasil precisa agregar novas usinas. No horizonte de 2030 o País já não terá mais tantas usinas hidrelétricas para construir, que atualmente, são responsáveis por cerca de 70% da matriz brasileira. A previsão de demanda até 2022 é de crescimento de 4,2% ao ano, e a saída é diversificar a matriz energética. É uma das fontes alternativas com maior potencial de expansão é a energia eólica. De acordo com a EPE (2016), no ano de 2015 a energia eólica cresceu 77,1% em relação a 2014, atingindo 3,5% da matriz elétrica.

De acordo com a ANEEL (2008), denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também, denominadas Aero geradores, para a geração de eletricidade. Basicamente, o fluxo de geração consiste em captação da energia de movimento do vento, a partir de um rotor, que transmite movimento de rotação através de um eixo ao gerador. A eletricidade gerada é transmitida, por meio de cabos elétricos e um transformador conectado à Rede elétrica, conforme ilustrado na FIGURA 1.

Figura 1 - Fluxo de geração de energia eólica



Fonte: elaboração própria do autor.

Normalmente, o processo de montagem de turbinas nos parques eólicos² consiste na união de componentes pré-fabricado e pré-montados ainda na fábrica. A torre é fabricada em seções ou segmentos, dimensionados de acordo com as condições de transporte. A *Nacelle* é a parte da turbina que abriga componentes importantes, tais como o gerador e a caixa de velocidades; depois de colocada no topo da torre, a montagem da *Nacelle* requer alguns ajustes finais, como o alinhamento do gerador e lubrificação. O Rotor que é transportado desmembrado em três pás e um hub, pode ser pré-montado em solo e depois içado como uma peça única.

2.2 Tecnologia de Montagem Mecânica

A montagem mecânica é um processo da mecânica industrial, que é uma área da engenharia, que dentre os objetivos, pode-se afirmar que é cuidar do desenvolvimento do projeto e da construção de máquinas.

De acordo com NORTON (2004), uma máquina pode ser definida de muitas formas. Das principais, estão estas duas: um aparato que consiste em unidades inter-relacionadas, ou um dispositivo que modifica a força ou o movimento.

² De acordo com CARVALHO (2003), os custos do projeto eólico estão divididos da seguinte forma: estudo de viabilidade, desenvolvimento do projeto, engenharia de construção, aquisição de equipamentos, balanço de planta e outros.

Na definição, as peças inter-relacionadas também são chamadas, às vezes de elementos de máquinas. A noção de trabalho útil é básica para a função de uma máquina, existindo quase sempre alguma transferência de energia envolvida.

A menção a força e movimento também é crucial ao nosso interesse, uma vez que, ao converter uma forma de energia em outra, as máquinas criam movimentos e desenvolvem forças.

Ainda, de acordo com NORTON (2004), no projeto de máquina, depois de definida a metodologia, formulado e calculado o problema, a partir de coeficientes de segurança e normas do projeto, é preciso escolher o material de fabricação, considerando, suas propriedades e natureza estatística; homogeneidade e isotropia; dureza; revestimentos e tratamentos superficiais, para metais e não-metais.

Na determinação das solicitações, primeiro depende da classe, que são os tipos de solicitações que agem sobre um sistema, baseadas na característica das cargas aplicadas e na presença ou não de movimento; em seguida, a análise do carregamento, se estático ou dinâmico, se estará sujeito à solicitação vibratória, considerando a frequência natural do conjunto e de seus subconjuntos, para prever e evitar problemas de ressonância durante a operação. Se haverá carregamento de impacto, com a variação do tempo, com todas as partes envolvidas continuamente em contato.

Além disso, a teoria de falha³ deve ser considerada. A maioria das falhas acontecem devido a cargas que variam com o tempo, e não a esforços estáticos. Essas falhas ocorrem, tipicamente, em níveis de tensão significativamente inferiores aos valores da resistência ao escoamento dos materiais.

Para BUDYNAS & NISBETT, (2011) um projeto de engenharia mecânica envolve todas as disciplinas da engenharia mecânica. Um simples mancal de deslizamento envolve fluxo de fluido, transferência de calor, transporte de energia, descrições estatísticas e assim por diante.

³ Em 1870, o engenheiro alemão August Wöhler publicou um estudo, realizado durante um período de 12 anos, testando eixos até a falha sob carregamento alternado, sobre o que foi chamado de falha por fadiga. As falhas por fadiga sempre têm início com uma pequena trinca, que pode estar presente no material desde a sua manufatura ou desenvolver-se ao longo do tempo devido às deformações ao redor das concentrações de tensões. Muitos dados de resistência se encontram disponíveis a partir de ensaios com corpos de prova, que podem ser usados como ponto de partida para estimar a resistência de uma peça em particular, porém os melhores dados são obtidos por meio de ensaios com conjuntos reais.

2.2.1 Eixos

Para BUDYNAS & NISBETT (2011), deve-se considerar o método de montar os componentes no eixo e a montagem do eixo na estrutura. Isso geralmente requer o maior diâmetro no centro do eixo, com diâmetros progressivamente menores em direção às extremidades para permitir que os componentes deslizem pelas extremidades. Se um ressalto for necessário em ambos os lados de um componente, um deles deve ser criado por meios tais como um anel de retenção ou por um espaçador entre dois componentes. A caixa de engrenagens necessitará meios para posicionar fisicamente o eixo e seus mancais, e os mancais na estrutura. Isso em geral é alcançado fornecendo acesso através da caixa ao mancal em uma extremidade do eixo.

Eixos de transmissão ou simplesmente eixos, são usados em praticamente todas as partes de máquinas rotativas para transmissão de movimento de rotação ou torque.

Segundo NORTON (2004), no mínimo, um eixo tipicamente transmite torque de um dispositivo de comando (motor elétrico ou de combustão interna) através da máquina. Às vezes, os eixos incluem engrenagens, polias ou catracas, que transmitem o movimento rotativo via engrenagens acoplantes, correias ou correntes de eixo a eixo. Os eixos são montados em mancais, em uma configuração biapoada ou em balanço, dependendo da configuração da máquina.

A carga em eixo de transmissão de rotação é predominantemente de dois tipos: de torção devido ao torque transmitido ou de flexão devido as cargas transversais em engrenagens, polias e catracas. Chavetas, anéis retentores ou pinos transversais são frequentemente usados para segurar elementos fixados ao eixo a fim de transmitir o torque requerido ou para prender a parte axialmente. As chavetas requerem uma ranhura tanto no eixo quanto na peça e podem precisar de um sistema de parafusos para prevenir o movimento axial. Anéis retentores descavam o eixo e pinos transversais criam um furo através do eixo. Cada uma dessas mudanças no contorno contribuirá para alguma concentração de tensão.

Ainda, segundo NORTON (2004), um eixo como um corpo rígido tem potencialmente seis graus de liberdade (DOF – *degree of freedom*) com respeito a um segundo eixo. Contudo, devido à simetria, somente quatro desses DOF são de interesse. Eles são o desalinhamento axial, angular, paralelo e torcional.

2.2.2 Lubrificação

De acordo com BUDYNAS & NISBETT (2011), as superfícies em contato nos mancais possuem movimento relativo que é ao mesmo tempo de rolamento e de deslizamento, portanto é difícil entender exatamente o que acontece. Se a velocidade relativa das superfícies em deslizamento é alta o suficiente, a ação lubrificante é hidrodinâmica⁴. Lubrificação elasto-hidrodinâmica (EHD) é o fenômeno que ocorre quando um lubrificante é introduzido entre superfícies que estão sob contato de rolamento puro. O contato de dentes de uma engrenagem e aquele encontrado em mancais de rolamento e em superfícies camo-e-seguidor são exemplos típicos. Quando um lubrificante é aprisionado entre duas superfícies em contato rolante, um tremendo aumento na pressão dentro do filme de lubrificante ocorre. Porém a viscosidade⁵ está relacionada de forma exponencial à pressão, portanto um aumento muito grande de viscosidade ocorre no lubrificante que está aprisionado entre as superfícies.

Segundo NORTON (2004), três tipos gerais de lubrificação podem ocorrer em um mancal: filme completo, filme misturado e lubrificação de contorno. Três mecanismos podem criar a lubrificação de filme completo: lubrificação hidrostática, hidrodinâmica e elasto-hidrodinâmica. A lubrificação hidrostática refere-se ao suprimento contínuo de um fluxo de lubrificante (tipicamente um óleo) para a interface de deslizamento a uma pressão hidrostática elevada ($\approx 10^2$ - 10^4 psi).

A lubrificação de contorno refere-se a situações nas quais alguma combinação da geometria da interface, nível de cargas elevadas, baixa velocidade ou quantidade insuficiente de lubrificante excluem a iniciação de uma condição hidrodinâmica. A lubrificação de contorno implica que sempre existe algum contato metal com metal na interface. Mancais de rolos e esferas podem operar no modo de lubrificação de contorno se a combinação de velocidades e cargas não permitir que a condição de EHD ocorra. A lubrificação de contorno é uma condição menos desejável que as outras descritas acima porque ela permite que as asperezas superficiais entrem em contato e as superfícies se desgastem rapidamente.

O lubrificante é uma mistura de hidrocarbonetos que reagem ao aumento de temperatura por evaporação de componentes mais leves, deixando para trás os mais pesados.

⁴ Para MOLYKOTE (1995), se entende como lubrificação hidrodinâmica o estado de lubrificação que garante uma separação total dos pares de contato do sistema tribológico. É responsável pela transmissão de força através do lubrificante é a viscosidade efetiva que existe no ponto de trabalho.

⁵ A viscosidade lubrificante mostra a maior dependência em modificações de temperatura. Em geral, a viscosidade dos lubrificantes se reduz com o aumento da temperatura, isto é, o lubrificante aumenta a sua fluidez e reduz a sua tenacidade.

Esse processo aumenta vagarosamente a viscosidade do lubrificante remanescente, que aumenta a razão de geração de calor e eleva a temperatura do lubrificante. Isso estabelece o cenário para falha futura.

O objetivo da lubrificação é reduzir a fricção, o desgaste e aquecimento de partes de máquinas que se movem em relação umas às outras. Em um mancal de deslocamento (manga), um eixo, ou munhão, roda ou oscila dentro da manga, ou bucha, e o movimento relativo é de deslizamento. Em um mancal antifricção, o movimento relativo principal é de rolamento. Um seguidor pode rolar ou deslizar no came. Os dentes de engrenagem unem-se entre si por uma combinação de rolamento e deslizamento. Pistões deslizam dentro de seus cilindros. Todas essas aplicações requerem lubrificação para reduzir a fricção, o desgaste e aquecimento.

2.2.4 Parafusos e Uniões

Para BUDYNAS & NISBETT (2011), o comprimento ideal de parafusos de porca é aquele no qual somente uma ou duas roscas se projetam da porca depois que ela é apertada. Furos de parafusos de porca podem ter rebarbas ou extremidades afiadas após o processo. Elas podem cortar no filete e aumentar a concentração de tensão. Desse modo, arruelas sempre devem ser usadas sob a cabeça do parafuso.

De acordo com NORTON (2004), as “porcas e parafusos” presentes em um projeto podem parecer um de seus aspectos menos interessantes, mas são, na verdade, um dos mais fascinantes. O sucesso ou falha de um projeto pode depender da seleção apropriada e uso de uniões.

Há uma imensa variedade de fixadores disponíveis comercialmente, desde pares parafuso-porca comuns até dispositivos múltiplos para rápida liberação de painéis ou para aplicações envolvendo junções escondidas. O mesmo parafuso pode receber um nome diferente quando utilizado de uma maneira particular. Por exemplo, um parafuso de porca é um fixador com uma cabeça e um corpo reto, com filetes de rosca cujo uso pretendido prevê utilização de uma porca para sujeitar e manter as partes de um conjunto de juntas. Contudo, o mesmo parafuso é chamado de um parafuso de máquina ou parafuso de cabeça quando é rosqueado a um fuso em vez de ser engajado a uma porca. O padrão ANSI distingue um parafuso com porca de um parafuso sem porca estabelecendo que um parafuso de porca se

supõe fixo e parado enquanto uma porca é torquada ao mesmo para montar uma junta roscada, ao passo que um parafuso sem porca deve ser girado em seu receptáculo, seja este em um furo com rosca ou não, por meio de aplicação de um torque à sua cabeça. Um parafuso prisioneiro é um parafuso sem cabeça, com roscas em ambas as extremidades e que se pretende utilizar de maneira semipermanente como metade de uma junta.

Uma das situações primárias de parafusos e porcas é a de juntar peças em situações tais que as cargas aplicadas colocam o parafuso ou os parafusos em tração. É prática comum pré-carregar a junta apertando os parafusos com suficiente torque para criar cargas de tração que se aproximam às respectivas resistências de prova. Para montagens carregadas de forma estática, uma pré-carga que gera uma tensão no parafuso de até 90% da resistência de prova é utilizada algumas vezes. Para juntas carregadas dinamicamente (carga de fadiga), uma pré-carga de 75% ou mais da resistência de prova é comumente utilizada. Assumindo que os parafusos sejam adequadamente dimensionados para resistir às cargas aplicadas, essas altas pré-cargas tornam pouco provável que os parafusos rompam em serviço se eles não quebrarem enquanto estão sendo tracionados (apertados). As razões para isso são sutis e requerem entendimento de como as elasticidades do parafusos e membros sendo unidos interagem quando o parafuso é apertado e quando a carga externa é aplicada mais tarde.

2.4 Gerenciamento de Projetos

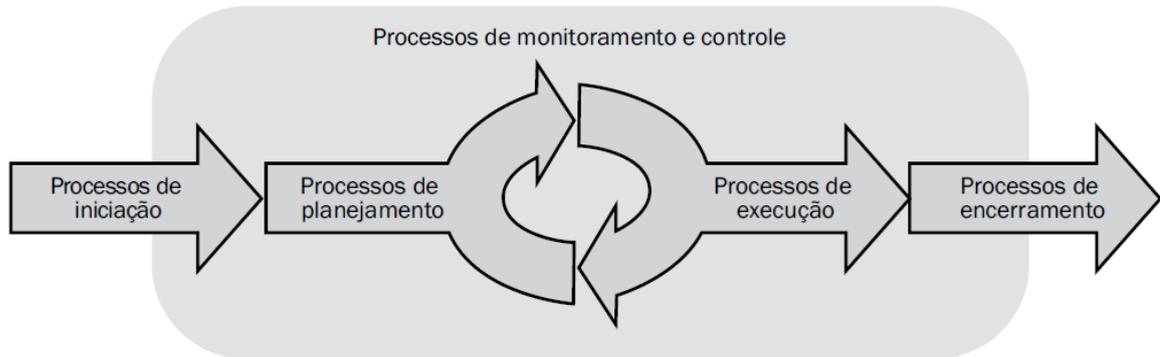
As revoluções industriais dos últimos 300 anos criaram novas tecnologias que resolveram problemas no campo do transporte, comunicação e produção. Muitas vezes, essas soluções demandaram projetos cada vez mais complexos. Por volta da segunda metade do século XIX, a revolução industrial provocou o aumento da complexidade das relações de produção, e o início de uma cadeia de transformações fez com que os gestores se deparassem com a necessidade de organizar a produção, melhorando a racionalidade da forma de administrar, evoluindo com o tempo.

De acordo com KERZNER & SALADIS (2014) o sucesso do projeto não é fruto da sorte e do acaso, é alcançado por meio de um processo estruturado que envolve fases de iniciação, planejamento, execução, acompanhamento, controle e, finalmente, conclusão.

Para XAVIER (2008), processo é uma sequência repetitiva de operações, com o objetivo de produzir resultados padronizados.

A FIGURA 2 ilustra os processos de gerenciamento de projetos

Figura 2 – Os grupos de processos de gerenciamento de projetos



Fonte: PMBOK (2013).

As saídas de um processo são, em geral, entradas para outro processo de gerenciamento. Ao focarmos nessas ligações, podemos descrever cada processo em termos de:

- Entradas: informações ou documentos que sofrerão algum tipo de ação no processo;
- Técnicas e ferramentas: mecanismos aplicados às entradas responsáveis pela geração das saídas;
- Saídas: documentos ou itens documentáveis que são o resultado do processo.

Por exemplo, o processo de “Desenvolvimento do Cronograma do Projeto” é responsável por estabelecer as datas de início e de conclusão das atividades. Uma das entradas para esse processo é o calendário, com os períodos em que o trabalho estará autorizado. Uma ferramenta é o uso de *software* de gerenciamento de projetos (*Microsoft Project, Primavera*, etc.). Uma das saídas desse processo é o próprio cronograma do projeto.

Os processos de gerenciamento não ocorrem somente uma vez durante o projeto, podendo ocorrer em todas as fases. Por exemplo, durante a montagem de turbinas eólicas é necessário autorizar o início da fase (iniciação), atualizar eventualmente o escopo, o cronograma e o orçamento (planejamento) em função da fase anterior, executar o trabalho planejado (execução), monitorar o trabalho em andamento e empreender ações corretivas (monitoramento e controle), além de formalizar o fim da montagem (fechamento).

2.4.1 Processos de Iniciação

Os processos de iniciação são realizados para definir um novo projeto ou uma nova fase de um projeto obtendo autorização para iniciar. Nesses processos, o escopo é definido e os recursos financeiros são comprometidos. As partes interessadas internas e externas que vão interagir e influenciar o resultado geral são identificadas. Um gerente do projeto será selecionado. Quando o termo de abertura é aprovado, o projeto é oficialmente autorizado.

O envolvimento do cliente e de outras partes interessadas durante a iniciação gera uma compreensão compartilhada dos critérios, reduz as despesas indiretas e geralmente melhora o nível de aceitação das entregas.

As entradas para o processo de desenvolver o termo de abertura do projeto, inclui a declaração do trabalho do projeto, que é uma descrição dos produtos e serviços que serão fornecidos pelo projeto; e o contrato, que apresenta as premissas e restrições para o desenvolvimento do trabalho do projeto.

Com a emissão do termo de abertura do projeto, a empresa divulga internamente que um projeto existe e qual a sua finalidade. O termo de abertura do projeto deve conter a justificativa do projeto, com as necessidades do negócio, a que o projeto está incumbido de atender; o escopo (visão cliente), onde devem ser relacionados todos os produtos e serviços que o projeto deve entregar ao cliente; a designação do gerente de projeto e sua autoridade; e as restrições, que são fatores que limitam as opções da equipe de gerenciamento do projeto, tais como, o tempo e o custo, como fatores para fins de planejamento.

2.4.2 Processos de planejamento

Os processos de planejamento desenvolvem o plano de gerenciamento e os documentos do projeto que serão usados para executá-lo. São processos de criação e manutenção do plano do projeto, selecionando o melhor caminho para que sejam alcançados os objetivos propostos.

De acordo com SOTILLE, MENEZES, XAVIER, & PREIRA (2014), o gerenciamento do escopo é o processo que garante que o projeto inclui todo o trabalho requerido, para completa-lo com sucesso. Já para o PMBOK (2013), o gerenciamento do escopo do projeto está relacionado com a definição e controle das atividades que compõem o

projeto. O que inclui: planejar, coletar os requisitos e criar a EAP (Estrutura Analítica do Projeto).

Segundo o PMBOK (2013), a EAP é uma decomposição hierárquica do escopo a ser executado, a fim de alcançar os objetivos do projeto. Na mesma linha, para CLEMENTS & GIDO (2013), subdividir o escopo do projeto em pedaços ou pacotes de trabalho, é uma forma de visualizar melhor.

Ainda, de acordo com PMBOK (2013), o gerenciamento dos custos do projeto também inclui os processos envolvidos em planejamento. Onde preocupa-se, principalmente, com o custo dos recursos necessários para completar as atividades do projeto. No planejamento dos custos são estabelecidas as políticas, os procedimentos e a documentação necessária para o controle. Na determinação do orçamento os custos são agregados, estimados para atividades individuais ou pacotes de trabalho, de modo a estabelecer uma Linha de Base.

2.4.3 Processos de Execução

Para XAVIER (2008), os processo de execução são processos de coordenação de recursos físicos (pessoas, materiais e equipamentos) executando o que foi planejado de forma a atender às especificações do projeto.

Durante a execução do projeto, os resultados poderão requerer atualizações no planejamento e mudanças nas linhas de base. Isso pode incluir mudanças nas durações esperadas para as atividades, mudanças na produtividade e na disponibilidade dos recursos e riscos imprevistos. Essas variações podem afetar o plano de gerenciamento do projeto ou os documentos do projeto, e exigir uma análise detalhada e o desenvolvimento de respostas apropriadas de gerenciamento de projetos.

Os resultados da análise podem acionar solicitações de mudanças que, se forem aprovadas, poderão modificar o plano de gerenciamento ou outros documentos do projeto e talvez exigir a definição de novas linhas de base. Uma grande parte do orçamento do projeto será gasto na execução dos processos do grupo de processos de execução.

2.4.4 Processos de Monitoramento e Controle

Os processos de monitoramento e controle são necessários para acompanhar, analisar e organizar o progresso e o desempenho do projeto; identificar quaisquer áreas nas quais serão necessárias mudanças no plano; e, iniciar as respectivas mudanças.

O principal benefício deste grupo de processos é a medição e análise do desempenho do projeto a intervalos regulares, em ocorrências apropriadas ou em condições excepcionais, a fim de identificar as variações no plano de gerenciamento do projeto.

O grupo de processos de monitoramento e controle também envolve:

- Controlar as mudanças e recomendar ações corretivas ou preventivas em antecipação a possíveis problemas;
- Monitorar as atividades contínuas do projeto em relação ao plano de gerenciamento do projeto e a linha de base de desempenho do mesmo;
- Influenciar os fatores que poderiam impedir o controle integrado de mudanças ou de gerenciamento de configurações para que somente as mudanças aprovadas sejam implementadas.

O grupo de processos de monitoramento e controle não apenas monitora e controla o trabalho, mas também monitora e controla todo o esforço do projeto.

De acordo com VARGAS (2013), em todo projeto, uma das principais dificuldades está na medição e na avaliação dos resultados obtidos, seja eles resultados finais ou parciais dos prazos, custos, qualidade, escopo e outros.

A necessidade do estabelecimento de previsões confiáveis faz com que diversos estudos a respeito de medição de desempenho e resultados de projetos sejam realizados. Uma dessas ferramentas é denominada análise de valor agregado. Que tem como foco a relação entre os custos reais consumidos e o produto físico obtido através de uma quantidade específica de trabalho.

O conceito de Valor Agregado (VA) requer que as medidas de despesa-produto sejam estabelecidas dentro de um cronograma físico. Então através da relação entre o valor agregado e o valor planejado do trabalho no tempo, pode-se ter uma maior precisão no controle, de que o tratamento isolado desses fatores.

O valor agregado funciona como um tipo de “alarme”, permitindo ao gerente de projeto avaliar se está consumindo mais dinheiro para realizar uma determinada tarefa ou se está apenas gastando mais naquele momento porque o desenrolar do projeto está indo

acelerado, permitindo que sejam tomadas decisões corretivas e preventivas com a devida antecedência.

O GVA (Gerenciamento do Valor Agregado) desenvolve e monitora três dimensões chave para cada pacote de trabalho:

- O Valor Planejado (VP), que é o orçamento autorizado designado ao trabalho agendado.
- O Valor Agregado (VA), que é a medida do trabalho executado expresso em termo do orçamento autorizado para tal trabalho.
- O Custo Real (CR), que é o custo realizado incorrido no trabalho executado que o VA mediu.

As variações a partir da Linha de Base aprovada também poderão ser monitoradas, o que inclui:

- A Variação de Prazos (VPR), que é uma medida de desempenho do cronograma expressa como a diferença entre o valor agregado e o valor planejado.
- As Variações de Custo (VC), que é a quantidade de déficit ou excedente orçamentário em um determinado momento, expressa como a diferença entre o valor agregado e o custo real.
- O Índice de Desempenho dos Prazos (IDP), que é uma medida de eficiência do cronograma expressa como a relação valor agregado/valor planejado. Para um valor de IDP menor que 1.0 indica que menos trabalho foi executado com relação ao planejamento. Para um IDP maior que 1.0 indica que mais trabalho foi executado do que o planejado.
- O Índice de Desempenho de Custo (IDC), que é uma medida da eficiência de custo dos recursos orçados expressa como a relação valor agregado/custo real. Para um valor de IDC menor que 1.0 indica um excesso de custo para o trabalho executado. Para um IDC maior que 1.0 indica um desempenho de custo abaixo do limite até a data de acompanhamento.

2.4.5 Processos de Encerramento

Os processos de encerramento são executados para finalizar todas as atividades de processos de gerenciamento do projeto, visando concluir formalmente o projeto, a fase, ou as

obrigações contratuais. Este grupo de processos, quando concluído, verifica se os processos definidos estão completos, a fim de encerrar o projeto ou uma fase do projeto, da forma apropriada.

Os processos de formalização do fim do projeto ou de uma fase, inclui a comunicação de tais eventos às partes interessadas, arquivamento e aceitação final da fase ou do projeto. No encerramento do projeto ou da fase, podem ocorrer as seguintes atividades:

- Obter a aceitação pelo cliente para encerrar formalmente o projeto ou fase;
- Fazer a revisão pós-projeto ou de final de fase;
- Registrar os impactos de adequação de qualquer processo;
- Documentar as lições aprendidas;
- Aplicar as atualizações apropriadas aos ativos de processos organizacionais;
- Arquivar todos os documentos relevantes do projeto, para serem usados como dados históricos;
- Encerrar todas as atividades de aquisições, assegurando a rescisão de todos os acordos relevantes;
- E, executar a avaliação dos membros da equipe e liberar os recursos do projeto.

3 ESTUDO DE CASO

Este estudo de caso trata da implantação de um parque eólico, com a montagem mecânica de 15 turbinas, cada uma com potência de 1,8 megawatts e 80 metros de altura. O projeto foi planejado para ser executado no período de agosto a outubro de 2014, no Município de Pindaí, cerca de 700 km de distância da Capital Salvador, no Estado da Bahia, Brasil.

O Cliente Final (proprietário do parque eólico) terceirizou as principais atividades de execução, ficando responsável apenas pelo gerenciamento. A mão de obra especializada foi contratada consorciada com o serviço de transporte e operações com guindastes.

3.1 Caracterização do Setor de Energia Eólica

Do ponto de vista de engenharia, considerando projeto básico e projeto executivo, instalar uma usina eólica talvez seja a forma mais rápida de se obter energia elétrica, se comparado a projetos de hidrelétricas, termelétricas ou solar, por exemplo.

Sem considerar as obras civis, que além da construção da fundação, são necessárias para executar o transporte dos componentes e as operações com guindastes, executar um projeto de montagem de turbinas eólicas requer basicamente duas especialidades de serviços: operações com guindastes e mão de obra especializada.

As operações com guindastes, que incluem além do aluguel de guindastes, o transporte, com carregamentos e descarregamentos, representam a maior parte do custo de montagem, com cerca de 75%. A mão de obra especializada, com conhecimentos em tecnologia mecânica aplicada e gerenciamento de projetos, executa a montagem dos componentes da turbina, de acordo com as especificações técnicas do projeto e em conformidade com as Normas Regulamentadoras de segurança do trabalho e de meio ambiente vigentes.

A mão de obra especializada geralmente inclui, como recurso direto: técnicos com apurado conhecimento na montagem do modelo de turbina do projeto; experiência na comunicação com a operação dos guindastes, durante o içamento dos componentes da turbina; execução de torques, tensionamento e alinhamento de gerador, na montagem mecânica dos

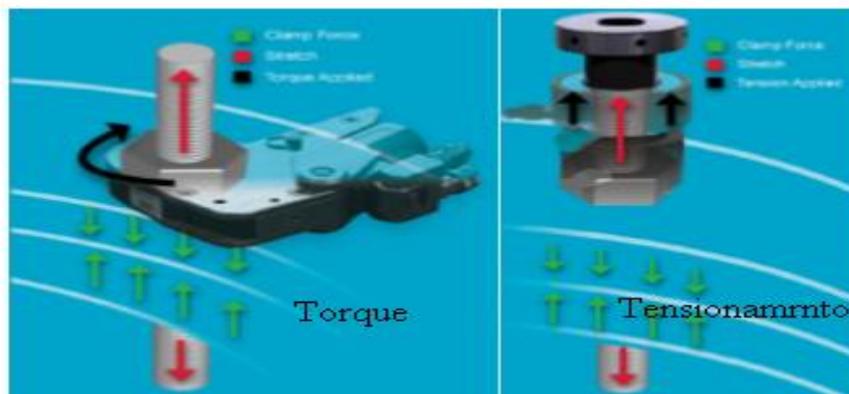
componentes. Como recurso indireto: uma equipe responsável pelo gerenciamento do cronograma, do custo e da qualidade do projeto.

Montar uma turbina eólica é muito rápido. Primeiro acontece a montagem mecânica da torre, normalmente dividida em segmentos; em seguida a *Nacelle* e o Rotor. Se o planejamento considerar a execução do transporte com bastante antecedência do início de montagem, o risco de não atingir a data de início de operação comercial, na data programada, fica bem reduzido.

3.2 Projeto de Montagem de Turbinas Eólicas

A montagem mecânica de turbinas eólicas consiste basicamente no içamento e junção dos componentes. Cada peça é posicionada, as juntas são aparafusadas e depois apertadas. Na junção do segmento de torre⁶ T1 com a fundação, o aperto é realizado por meio de tensionamento. Situação em que a carga de aperto é gerada a partir da aplicação uma força de tração axial, sem que para isto seja necessário a aplicação de carregamento tangencial, de modo a obter um alongamento suficiente para o aperto necessário da união. Conforme ilustrado na FIGURA 3.

Figura 3 - Comparação entre torque e tensionamento



Fonte: Elaboração própria do autor.

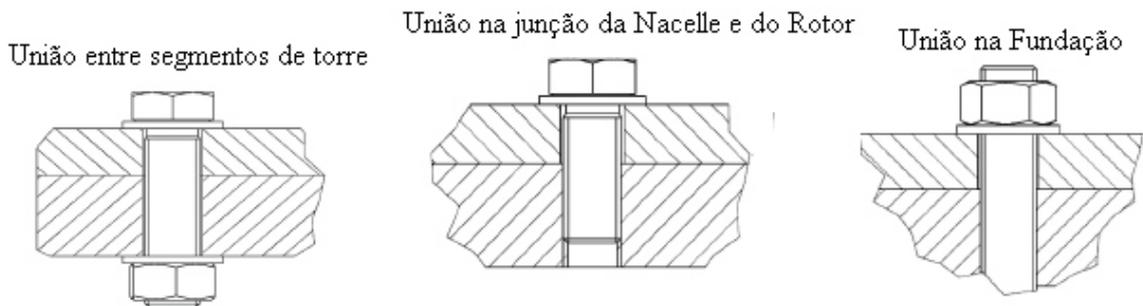
⁶ No Brasil geralmente são fabricadas dois tipos de torres eólicas: metálicas e de concreto. A torre metálica é construída no formato de tronco de cone, com flanges soldados nas duas extremidades. As torres de concreto são normalmente fabricadas no próprio site de montagem, em concreto pré-moldado em aduelas semicirculares, limitadas pelo diâmetro máximo da base da torre. Na torre de concreto a operação com guindastes é muito mais trabalhosa, com a montagem muito mais demorada.

Na junção das demais partes é aplicado torque. Onde este mesmo aperto é conseguido aplicando potência na porca ou na cabeça do parafuso a partir de um momento torçor.

Existem basicamente três tipos de uniões numa turbina eólica: quando utilizado um par parafuso-porca, aplicada para unir os flanges dos segmentos da torre, neste caso a porca é rosqueada no parafuso; quando utilizado somente o parafuso, aplicada na união T3-*Nacelle* e *Nacelle*-Rotor, neste tipo de união o parafuso é rosqueado diretamente numa das partes do flange para realizar o aperto; e do tipo, usando parafusos prisioneiros, aqui chamados parafusos de ancoragem, para união fundação-T1, é um tipo de união com parafusos sem cabeça, onde uma das extremidades do parafuso está engastada no bloco de concreto da fundação e na outra é rosqueada uma porca para unir as partes. Neste caso, se aplicado um torque para o aperto, o parafuso tenderia a torcer e poderia se soltar do engaste, então ao invés de torque é aplicado o tensionamento como solução de aperto da união.

A FIGURA 4 ilustra os tipos de uniões utilizadas numa turbina eólica.

Figura 4 - Tipos de uniões de uma turbina eólica

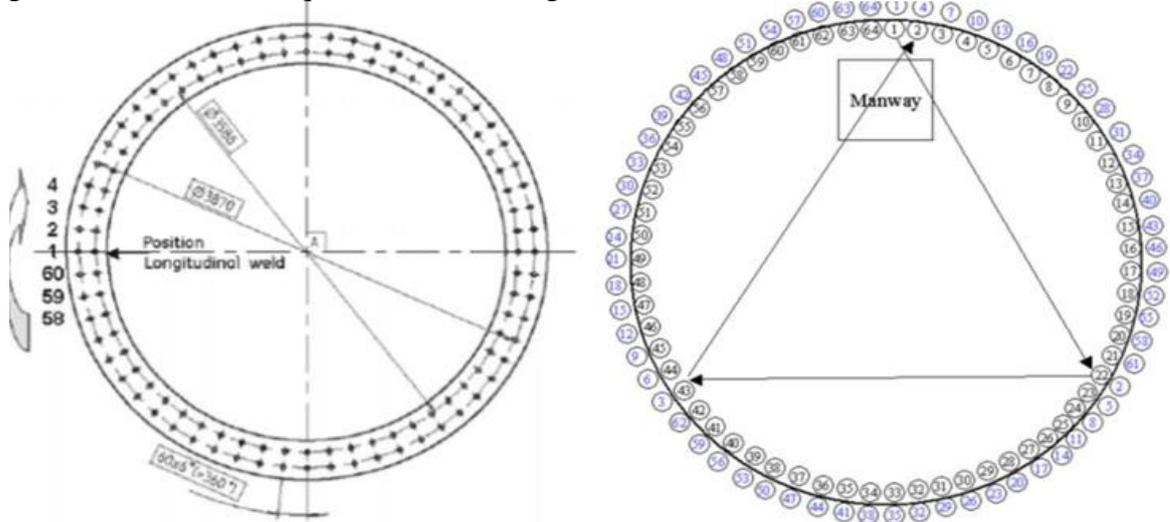


Fonte: Elaboração própria do autor.

Os valores, a sequência e o sentido de aperto podem ser preestabelecidos, pelo fabricante da turbina, para um ajuste sem folga, com a carga uniformemente distribuída, garantindo a precisão da união.

A FIGURA 5 ilustra um exemplo de aperto em uniões de segmentos de torre de uma turbina eólica.

Figura 5 - Sentido de torque de uniões de segmentos de torre

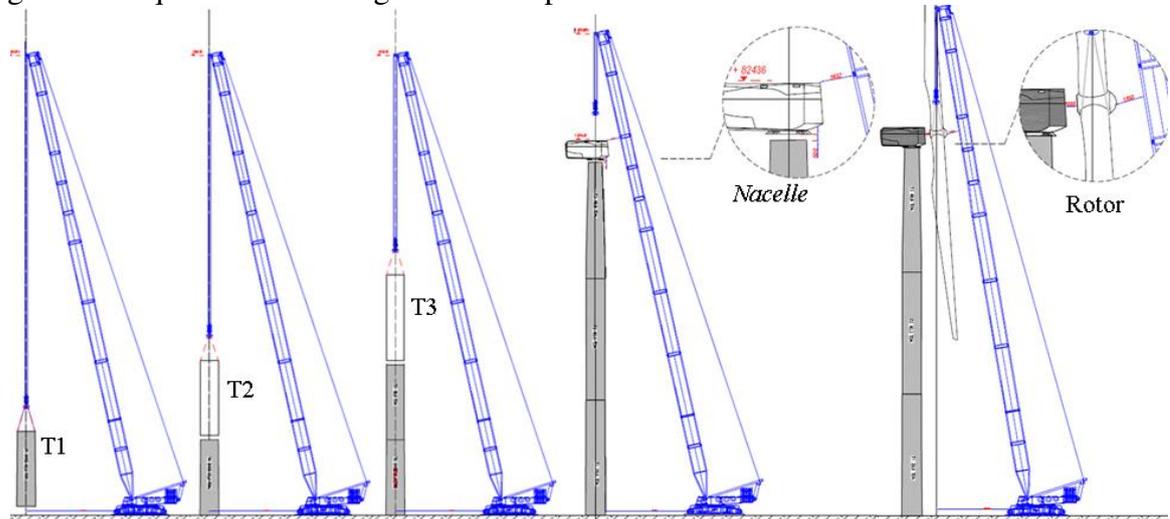


Fonte: Elaboração própria do autor.

No caso de flanges dos segmentos de torre, onde os parafusos são dispostos numa circunferência, o critério mais aplicado é de formato estrela, a partir de uma referência inicial.

Para a sequência de içamento dos componentes de uma turbina eólica, conforme ilustrada na FIGURA 6.

Figura 6 - Sequência de montagem dos componentes de uma turbina



Fonte: Elaboração própria do autor.

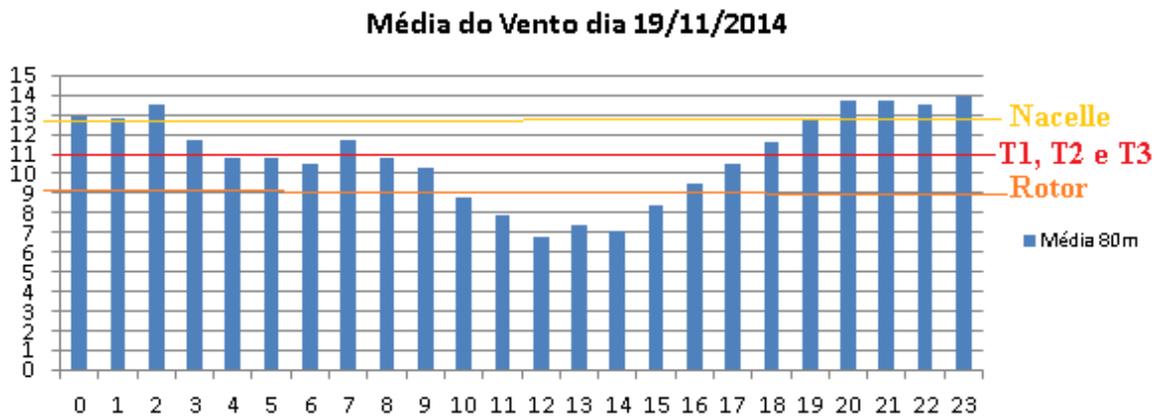
No segmento da base T1, a união possui como interface a própria fundação. Os parafusos são prisioneiros ancorados no próprio bloco de concreto da fundação (chamados parafusos de ancoragem). Para o segmento do meio T2, na união T1-T2, assim como na união T2-T3, o aperto é realizado por meio de pares parafusos-porcas; na união T3/Nacelle e

Nacelle/Rotor, os parafusos são do tipo máquina, rosqueados na própria estrutura de flange, sem a necessidade de porcas.

Na operação com guindastes, durante o içamento dos componentes, é importante considerar provável de incidência de ventos fortes como fator de interrupção dos trabalhos. Os guindastes ficam limitados a operar sob determinados valores de velocidades, em função do tipo de carga que será içada. Neste caso, a montagem será reprogramada em função das janelas de vento.

O gráfico 2 mostra um exemplo de um gráfico da média de velocidades de vento durante um dia com programação de montagem de turbinas eólicas.

Gráfico 2 - Exemplo de janelas de vento para montagem de turbinas eólicas



Fonte: Elaboração própria do autor.

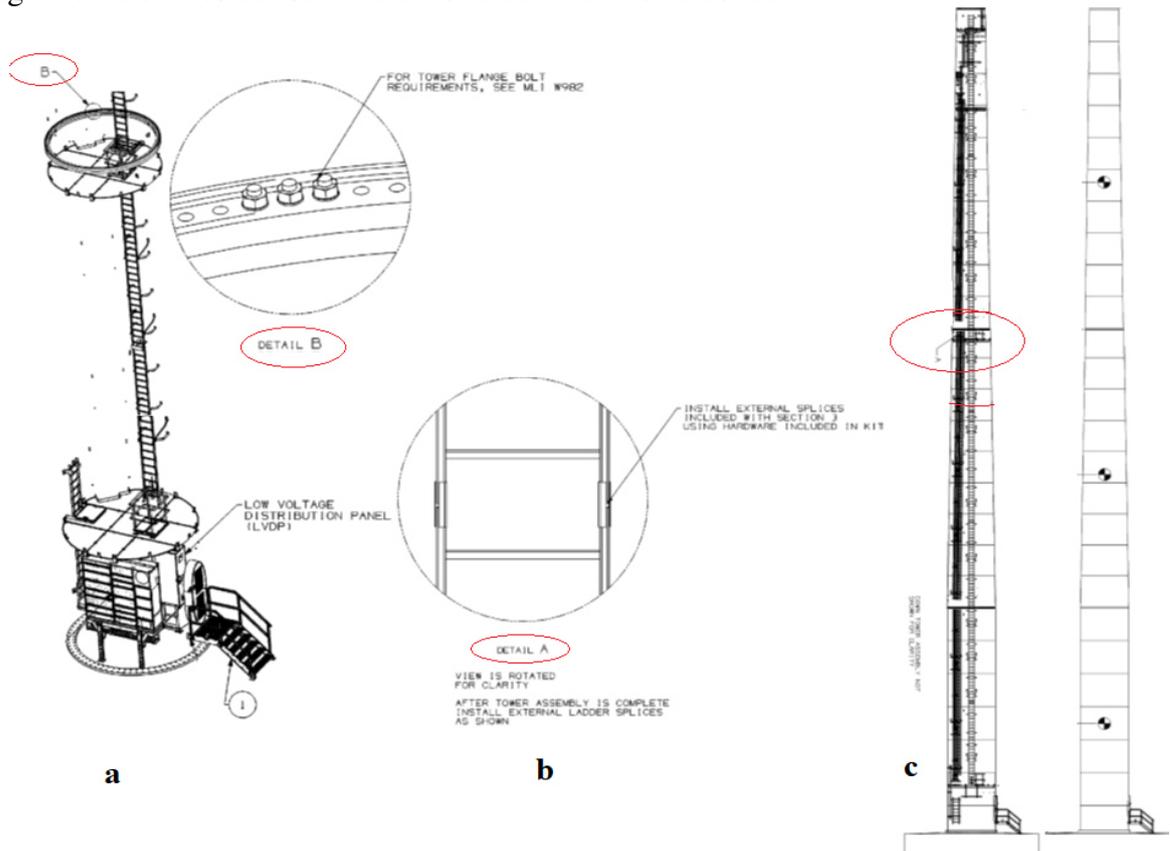
De acordo com o gráfico, considerando que o período útil planejado para a montagem foi para o intervalo entre 7:00 e 17:00 horas, é possível concluir que neste dia, a janela de vento permitiu montar todos os segmentos de torre e *Nacelle*. Entretanto, restringiu a montagem do Rotor entre 9:00 e 16:00 horas.

3.2.1 Montagem de Segmentos de Torre

O procedimento de montagem de segmentos de torre, inclui a inspeção de recebimento e preparação, onde são verificados possíveis danos de transporte, como defeitos de pintura, deformações no flange que possa impedir a união de componentes, e ainda se falta algum interno, de acordo com a relação de transporte, etc.

A FIGURA 7 ilustra a estrutura da torre de uma torre de turbina.

Figura 7 - Detalhes da estrutura da torre de uma turbina eólica



Fonte: Elaboração própria do autor.

Numa visão geral dos internos de torre (a), é no segmento da base T1 onde se localiza a maior parte dos dispositivos de comando da turbina e a interface de interligação na rede elétrica. No interior da torre, a subida até a Nacelle, passando pelas plataformas dos segmentos, é realizada por meio de uma escada vertical. Os detalhes de união da escada (b) e dos segmentos da torre (c) obedecem aos critérios de aperto controlado e podem ser consultados no manual de montagem da turbina.

Na inspeção de recebimento são verificados os procedimentos de descarregamentos, se a relação de internos está completa, e, se necessário, são feitos reparos de pintura. A descarga do segmento de torre é realizada utilizando dois guindastes.

A FIGURA 8 ilustra uma sequência de preparação de um segmento antes da montagem.

Figura 8 - Recebimento e preparação de segmentos de torre

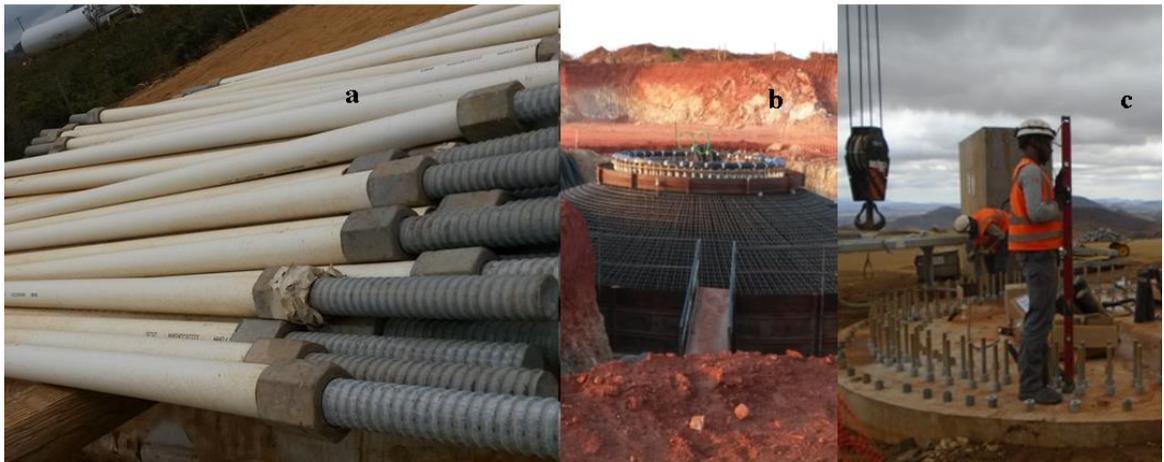


Fonte: Elaboração própria do autor.

O segmento de torre vem equipado com um suporte que permite a estocagem numa área próxima, dentro do raio de alcance do guindaste montador (a). O pessoal de qualidade deve inspecionar o segmento da torre externa e internamente, em busca de defeitos, e, conferir, de acordo com a relação de transporte, a quantidade e as condições de utilização dos acessórios internos, como, escada, cabos de segurança definitivo, por exemplo (b). Qualquer irregularidade encontrada precisa ser corrigida antes do início da montagem, como, reparos de pintura, por exemplo (c).

A fundação não faz parte do escopo da montagem mecânica. Entretanto, possui os parafusos de ancoragem, que servem para fixar o segmento da base T1 na fundação da turbina. A FIGURA 9 ilustra fases da construção de uma fundação, como parte do processo de instalação da turbina.

Figura 9 - Exemplo das fases da construção da fundação da turbina eólica



Fonte: elaboração própria do autor.

O projeto da fundação é definido em função das cargas da turbina. E os parafusos de ancoragem (a), são fornecidos de acordo com a especificação técnica do modelo da turbina. A fundação normalmente é construída no formato de um bloco de concreto armado, com os parafusos de ancoragem engastados e dispostos de acordo com um gabarito, cuja a posição coincide com a furação do flange, distanciados o suficiente para acomodar a interface do segmento da base T1 durante a montagem (c).

Na preparação para a montagem, os segmentos precisam passar por uma limpeza completa, interna e externamente. Conforme ilustra a FIGURA 10.

Figura 10 - Preparação e limpeza de segmentos de torre antes do içamento



Fonte: Elaboração própria do autor.

Na limpeza interna, com o segmento ainda estacionado em solo, a preocupação maior é não direcionar o jato d'água para os componentes elétricos. Também, é uma oportunidade de identificar possíveis peças soltas e corrigir não conformidades antes do içamento (a). Para completar a limpeza externa, na parte por baixo do segmento, é necessário, para isto o segmento é ligeiramente suspenso do solo (b). Para todos os processos de suspensão de carga, existem procedimentos obrigatórios de segurança, onde o montador precisa guardar distâncias seguras devido aos riscos de quedas dos componentes, em caso de falha de algum dispositivo dos guindastes. Antes do içamento, ainda, precisam ser retirados os suportes de transporte. Algumas ferramentas, que serão usadas para montagem do componente seguinte, precisam ser colocadas presas na plataforma de montagem (c).

Os acessórios de içamento, inclui suportes articulados (olhais) e cabos de aço com capacidade de carga certificada pelo fabricante. Os acessórios são instalados em pontos pré-definidos, na furação do flange. Conforme ilustra a FIGURA 11.

Figura 11 - Colocação de acessórios de içamento para segmentos de torre

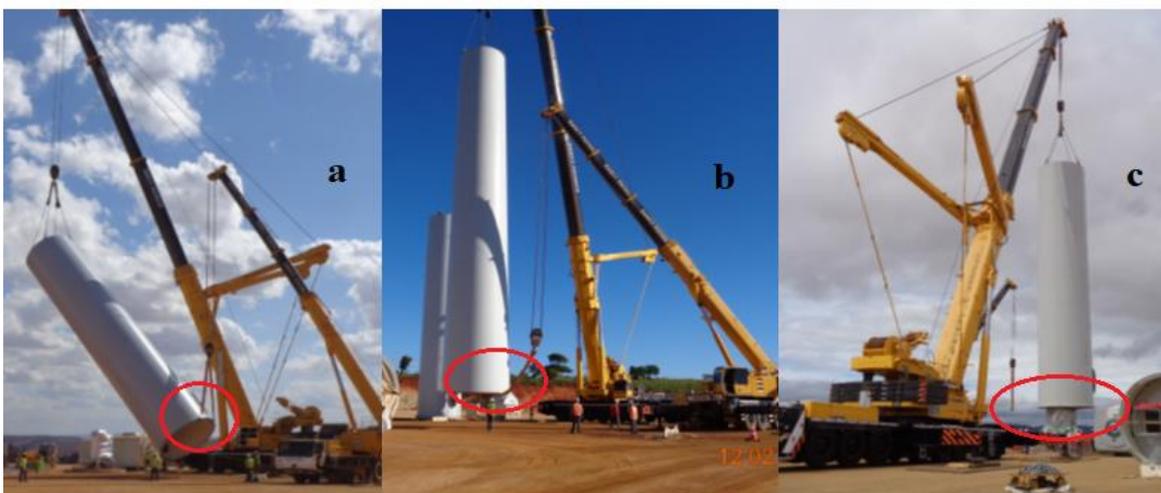


Fonte: Elaboração própria do autor.

É importante que os olhais sejam equipados com pino articulado, para permitir movimentos de acordo com a mudança de direção da carga no momento do içamento (a). O olhal é montado diretamente no furo do flange, de acordo com procedimento específico recomendado pelo fabricante da torre (b). Como, normalmente, os olhais são montados na região mais alta do flange, uma maneira de acessar ao local é a utilização de uma cesta aérea (c).

No içamento dos segmentos, o guindaste principal começa a levantar o segmento em direção da posição vertical, enquanto o guindaste auxiliar o mantém fora de contato com o solo. Conforme ilustra a FIGURA 12.

Figura 12 - Exemplos de içamento, com a verticalização de segmento



Fonte: Elaboração própria do autor.

O guindaste auxiliar é necessário para o içamento de todos os segmentos da torre da turbina (a). Depois de completada a verticalização, o guindaste auxiliar deixa de ter função

(b), os olhais são removidos e a montagem é concluída somente com o guinaste principal (c). A remoção dos olhais do guindaste principal, no caso do segmento da base T1, só ocorre depois que o segmento é devidamente posicionado, quando as arruelas e porcas são montadas, e uma pré-carga é aplicada.

A FIGURA 13 ilustra a montagem do segmento da base T1.

Figura 13 - Montagem do segmento da base T1



Fonte: Elaboração própria do autor.

Na descida, o segmento é rotacionado em busca da posição adequada, guiado pela marcação da porta (a). Para garantir que a torre fique firmemente presa à fundação, precisa ser aplicada uma pré-carga (b). Os olhais do flange superior do segmento, que liga o guindaste principal, só serão retirados quando terminada a aplicação do pré-carga (c).

Com o içamento do segmento do meio T2 e do segmento do topo T3, as superfícies de contato dos flanges precisam ser preparadas, conforme ilustrado na FIGURA 14.

Figura 14 - Exemplo de preparação do flange superior de um segmento de torre



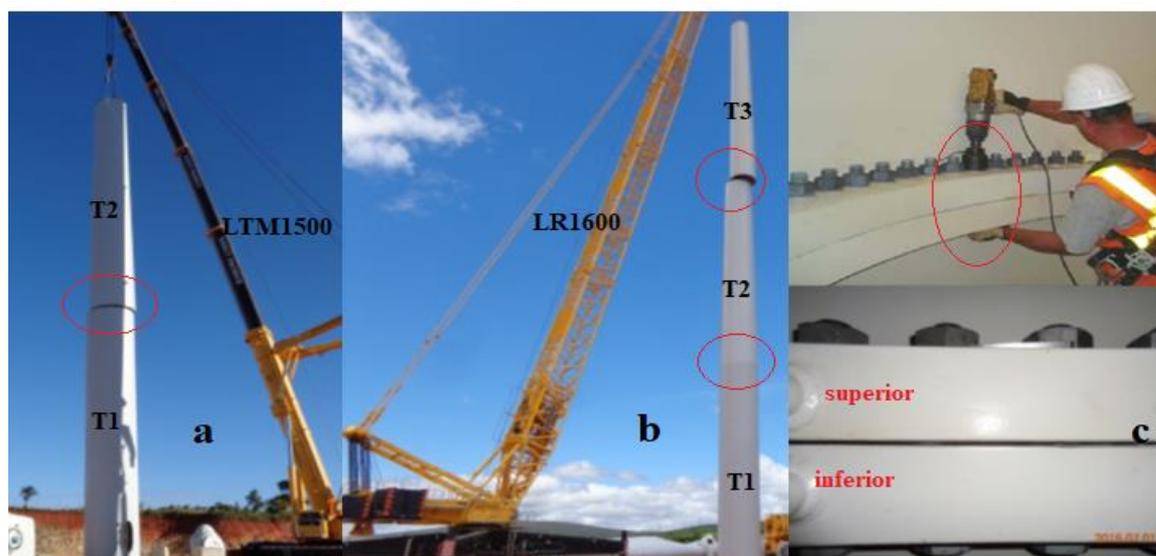
Fonte: Elaboração própria do autor.

Ainda durante a fixação do flange inferior do segmento da base T1, verificar se o flange superior está devidamente nivelado⁷ (a). Como parte da vedação da união entre segmentos de torre, o flange deve ser devidamente preparado, com a superfície de contato limpa e sem danos, e com aplicação de selante de silicone a redor do perímetro inteiro (b). O selante deve ser aplicado na parte externa, em relação a furação dos parafusos, como um filme fino e contínuo (c).

Na sequência, os segmentos são içados, unidos e torquados. No caso da fundação é aplicado um procedimento de tensionamento para fazer a união fundação-T1.

A FIGURA 15 mostra uma sequência de içamento dos segmentos de torre de uma turbina.

Figura 15 - Sequência de içamentos de segmentos de torre



Fonte: Elaboração própria do autor.

Com o segmento do meio T2 e o segmento da base T1 alinhados corretamente (a), colocar cada parafuso através da arruela e rosquear na porca. Depois da instalação de todos os parafusos na união do segmento, apertar todos os parafusos com uma chave de impacto, alternadamente em lados opostos, no formato estrela, de 5 em 5 parafusos, até que todos sejam apertados. Todos os parafusos devem ser segurados por baixo para garantir um aperto uniforme (c). Antes de remover os acessórios de içamento do flange superior do segmento,

⁷ A diferença em nível para a torre inteira não pode exceder 1mm/m, por exemplo (medido diagonalmente de um dos lados do flange a um ponto diretamente oposto – dando um desvio máximo geral de mais ou menos 2mm, para uma turbina S88-2.1 MW SUZLON).

fazer a emenda da escada e instalar cabo de segurança. Em seguida aplicar o mesmo procedimento, para o segmento do topo T3 (b).

Para o tensionamento⁸ da união fundação-T1, a carga final é aplicada conforme exemplo da FIGURA 16.

Figura 16 - Exemplo de procedimento de tensionamento



Fonte: Elaboração própria do autor.

Para aplicar a tensão final utiliza-se uma ferramenta hidráulica, que contém um tipo de atuador rosqueado no parafuso de ancoragem, que ao ser acionado provoca o alongamento do parafuso. Um suporte magnético com relógio comparador é usado para medir o alongamento do parafuso (a). Uma pressão é aplicada à ferramenta e simultaneamente é observado no relógio comparador o alongamento do parafuso (b).

Para o aperto das uniões entre segmentos, a sequência é semelhante ao tensionamento. Normalmente, também, é utilizada uma ferramenta hidráulica. Após a aplicação do torque final, todos os parafusos são numerados indicando a sequência de aplicação. As porcas são marcadas⁹, indicando que o torque foi realizado. E, por fim, é feito um registro na parede do segmento, com data e o valor do torque aplicado, conforme mostra o exemplo da FIGURA 17.

⁸ No exemplo, os parafusos podem ser alongados 2,9 +/-0,2 mm. Uma vez que o parafuso se encontra na posição final (2,9 mm de alongamento), a porca do parafuso pode ser apertada usando uma chave manual.

⁹ A marcação nas porcas e as informações escritas na parede do segmento servirão de guia para o controle nas inspeções de qualidade, para manutenções futuras.

Figura 17 - Exemplo de indicação de torque realizado numa união de segmentos



Fonte: Elaboração própria do autor.

A indicação de torque, com marcação e data de realização, é fundamental para o controle da periodicidade de apertos das juntas.

3.2.2 Montagem de *Nacelle*

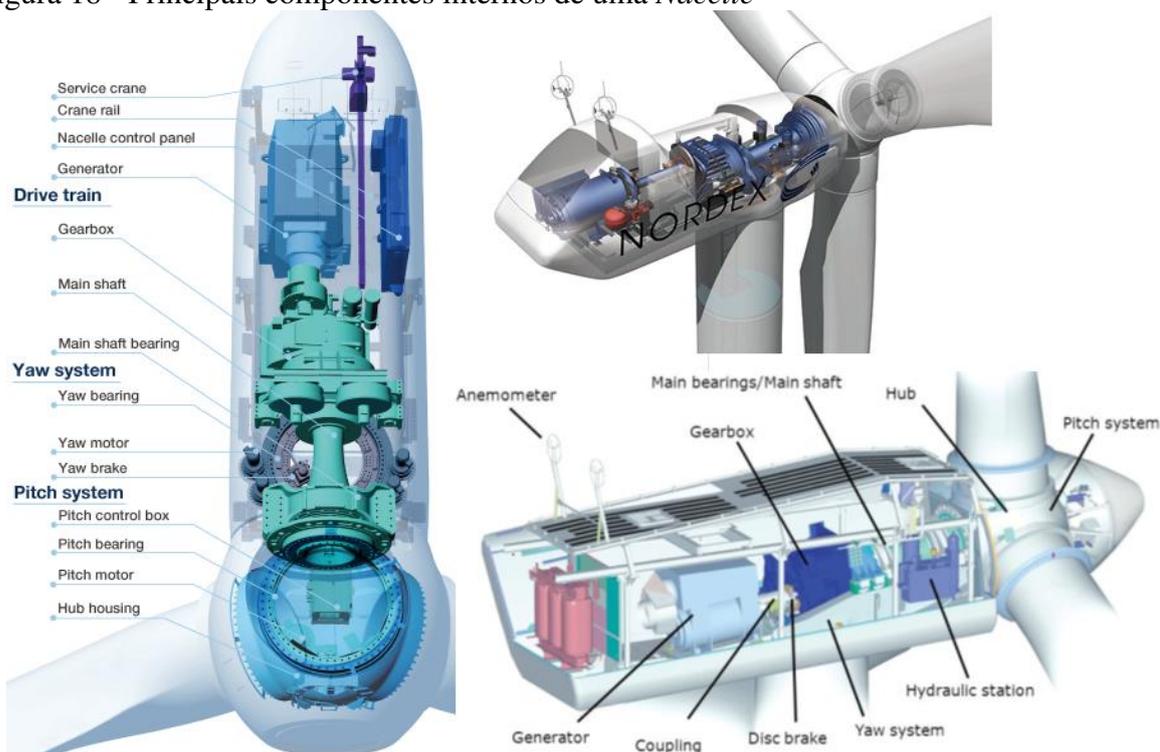
A *Nacelle* é o componente da turbina responsável por abrigar, fundamentalmente, os equipamentos e mecanismos responsáveis pela transformação da energia cinética em energia elétrica. Basicamente, existe dois tipos de *Nacelle*, com e sem caixa de velocidades.

A inspeção no interior da *Nacelle* tem o objetivo de conferir a relação de componentes e seus respectivos estados de conservação. O nível de óleo da caixa de velocidades, normalmente, é controlado no final da montagem, com a *Nacelle* devidamente nivelada, e em posição de serviço. Assim como, o alinhamento do gerador.

Os principais componentes internos da *Nacelle* fazem parte da transmissão da rotação do Rotor, por meio do eixo principal. Além do eixo, com redutor, mancais de suporte e acoplamento, existem ainda os dispositivos de freios do Rotor, com bomba hidráulica; os dispositivos de mudança de posição da *Nacelle*, de acordo com direção do vento, com um mecanismo cremalheira – motorreductores. E, os componentes do sistema de monitoramento e controle, além de um gerador eletromecânico.

A FIGURA 18 apresenta um exemplo de *Nacelle* com seus principais componentes internos.

Figura 18 - Principais componentes internos de uma *Nacelle*



Fonte: Elaboração própria do autor.

Basicamente, os componentes internos de uma *Nacelle*, são:

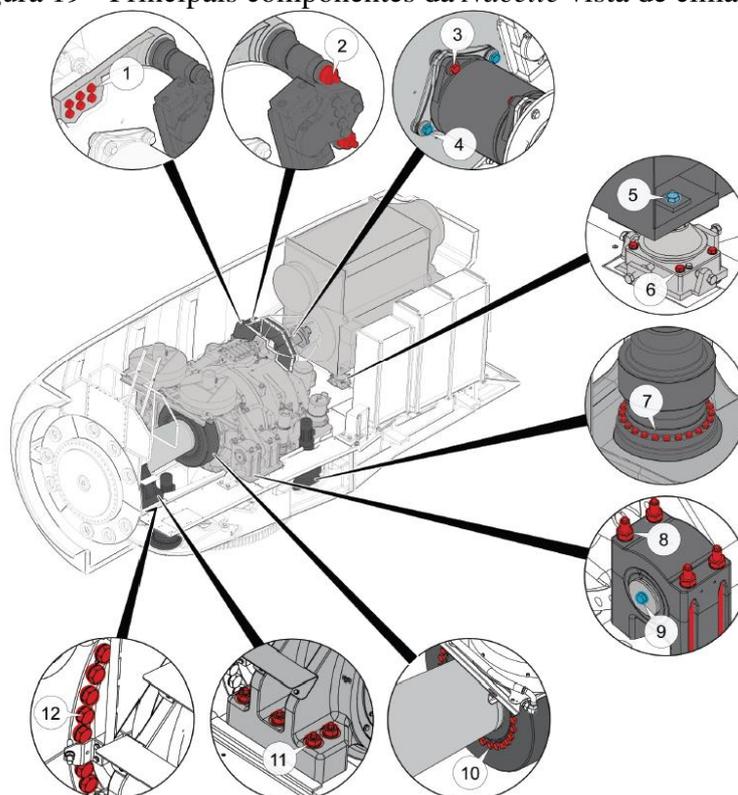
- Sistema mecânico de transmissão de movimento de rotação do rotor até o gerador – o eixo principal (*main shaft*), com a caixa de velocidades (*gearbox*) e os mancais do eixo principal (*main shaft bearing*), são os principais responsáveis pelo acionamento do gerador. A ligação entre o eixo principal e o gerador é feita por meio de um acoplamento flexível. E, o alinhamento das pontas do eixo principal e com a ponta de eixo do gerador, de modo que permita a montagem do acoplamento, em condições mínimas de tolerância de medidas radial e axial, é uma atividade chamada de “alinhamento de gerador.
- Sistema mecânico de giro da *Nacelle* – a turbina eólica busca a posição alinhada com a direção do vento. Em regiões em que o vento muda constantemente de direção, é comum observar a mudança de direção da *Nacelle*. Motorreductores (*Yaw motor*), engrenados numa engrenagem externa, instalada sobre um mancal, permite um giro da *Nacelle* de até 360°.

A *Nacelle* possui, como parte do sistema de monitoramento e controle, sensores de vibração, temperatura e de medição de ventos. Adicionalmente, no *hub* cada pá é acionada

individualmente por um motorreductor, por meio de engrenamento sobre mancais (*pitch system*).

A FIGURA 19 ilustra uma perspectiva de uma *Nacelle* vista de cima.

Figura 19 - Principais componentes da *Nacelle* vista de cima



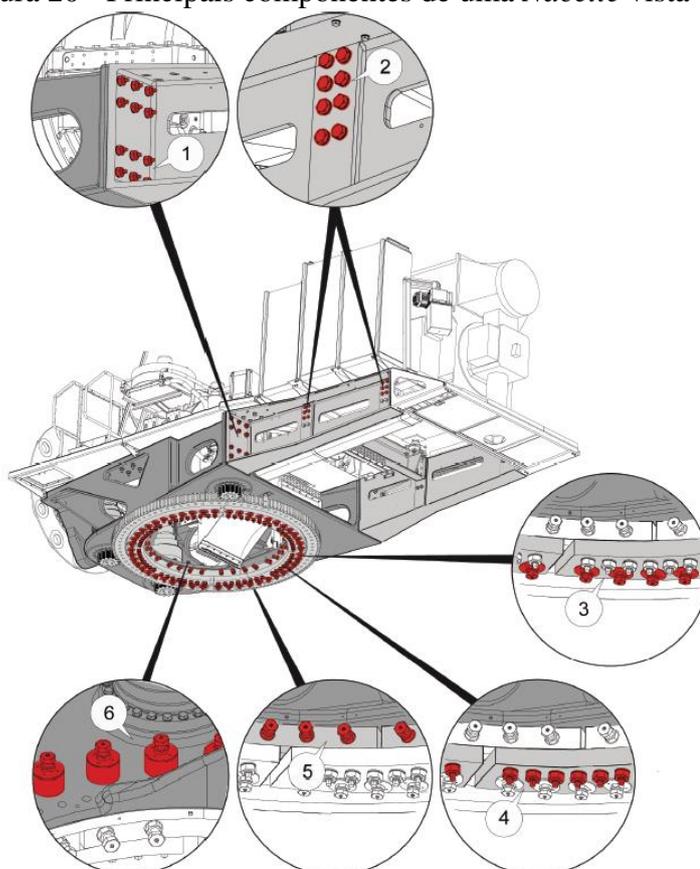
Fonte: Elaboração própria do autor.

Os componentes de uma *Nacelle* com caixa de velocidades, vista de cima, podem incluir:

- 1 e 2 – dispositivo de freio do Rotor;
- 3 e 4 – acoplamento flexível;
- 5 e 6 – dispositivo anti-vibração da base do gerador;
- 7 – Unidade de guinada (giro em função da mudança de direção do vento);
- 8 e 9 – suporte de fixação do quadro de apoio da caixa de velocidades;
- 10 – Mancal do eixo principal, na conexão com a caixa de velocidades;
- 11 – Mancal do eixo principal, na conexão com o Rotor;
- 12 – Flange da união Rotor-*Nacelle*;

Na FIGURA 20 ilustra os principais componentes de uma *Nacelle* com caixa de velocidades, vista de baixo.

Figura 20 - Principais componentes de uma *Nacelle* vista de baixo



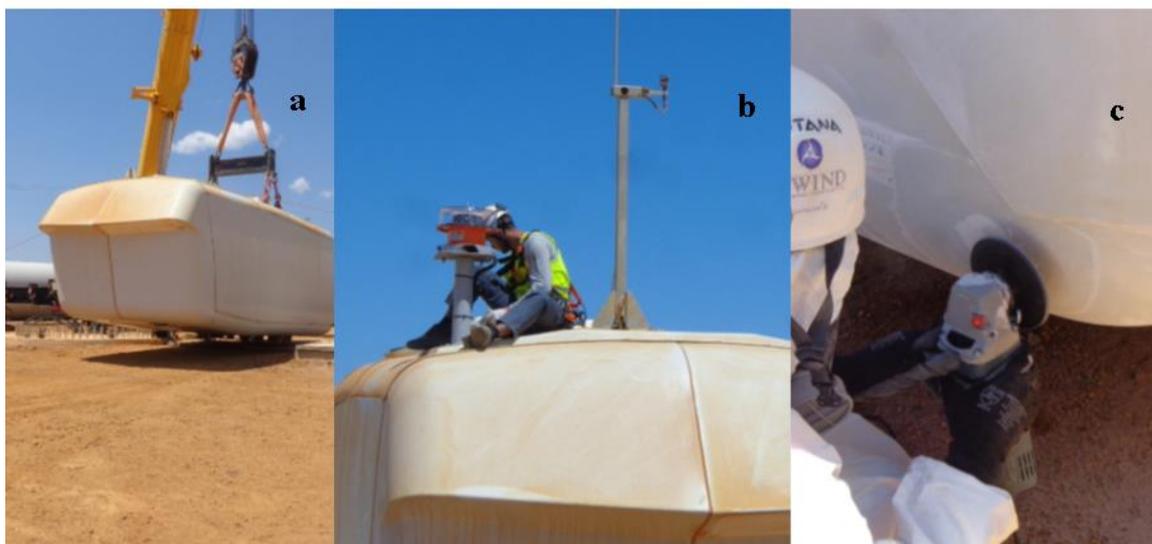
Fonte: Elaboração própria do autor.

Os componentes de uma *Nacelle* com caixa de velocidades, vista de baixo, podem incluir:

- 1 e 2 – quadro principal de apoio, que é a estrutura rígida da *Nacelle*;
- 3 – Flange da união *Nacelle*-segmento do topo T3;
- 4, 5 – Dispositivo de acionamento do sistema de guinda, engrenamento interno aberto e lubrificadores;
- 6 – Base do motorreductor de guinada.

Durante o recebimento da *Nacelle*, com o descarregamento no local de montagem, for detectado danos na fibra, imediatamente, o reparo precisa ser executado. Reparos em fibra demandam um pouco mais de tempo que as outras atividades de pré-montagem, conforme ilustrado na FIGURA 21.

Figura 21 - Exemplo de recebimento e preparação da *Nacelle*



Fonte: Elaboração própria do autor.

A *Nacelle* é fornecida com suportes que permite a estocagem numa área próxima ao local de montagem, dentro do raio de alcance do guindaste montador. Normalmente, para descarregar a *Nacelle* precisa apenas de um guindaste e pessoal de apoio (a). Alguns acessórios da *Nacelle* precisam ser transportados como peças soltas, e a instalação é feita, ainda, com a *Nacelle* em solo (b). Em caso de danos de fibra, a superfície precisa ser reparada, de modo que a reposição de material, acabamento e pintura esteja de acordo com critérios pré-estabelecidos pelo fabricante da turbina (c).

A *Nacelle* possui um sistema que permite o bloqueio do disco do Rotor, utilizado quando necessário executar serviços, fora da própria *Nacelle*. A instrução de operação deve ser obrigatória para qualquer técnico de montagem. É um dispositivo hidráulico que pode acionar simultaneamente o sistema de freios e um pino de bloqueio do disco do Rotor. Conforme ilustrado na FIGURA 22.

Figura 22 - Sistema hidráulico de freios e bloqueio do Rotor



Fonte: Elaboração própria do autor.

O travamento do Rotor ocorre por meio de um pino acionado pelo sistema hidráulico. Em intervenções de manutenção, o acionamento do freio pode ser por de um sistema elétrico (válvulas eletropilotadas).

Antes do içamento da nacelle, executar as seguintes atividades:

- Limpeza da *Nacelle*;
- Instalação dos acessórios de içamento;
- Colocação das cordas guias;
- Verificação do nivelamento da *Nacelle*;
- Verificação do flange da união com o segmento do topo T3;
- Encaixe do pino guia.

Durante o içamento da *Nacelle*, devido as condições de carga e ação do vento, são utilizadas cordas guias. Que são cordas colocadas na frente e atrás para controlar o movimento. Com comprimento suficiente, considerando a altura máxima antes da *Nacelle* ser colada sobre o segmento do topo da torre T3.

A FIGURA 23 mostra exemplos de preparação da *Nacelle* antes do içamento.

Figura 23 - Preparação da *Nacelle* para o içamento



Fonte: Elaboração própria do autor.

Além da limpeza externa da *Nacelle* e da colocação das cordas guias, como preparação do içamento, ainda, são retirados os acessórios de transporte, e o flange é ajustado para a posição correta de acoplamento no segmento T3.

A FIGURA 24 ilustra a colocação da *Nacelle* no segmento do topo T3.

Figura 24 - Montagem da *Nacelle* no segmento do topo T3



Fonte: Elaboração própria do autor.

Enquanto a *Nacelle* estiver no topo sendo içada, as cordas guias são usadas para posicionar e controlar a *Nacelle*. A *Nacelle* é posicionada de modo que o lado do Rotor fique

na frente do guindaste, e os flanges da união fiquem alinhados (a). Quando a *Nacelle* estiver alinhada imediatamente acima do flange do topo (b), um pino guia é usado para direcionar o alinhamento dos furos dos flanges (c). Em seguida, executar o aperto dos parafusos, conforme ilustra o exemplo da FIGURA 25.

Figura 25 - Exemplo do processo de aperto da união T3/*Nacelle*



Fonte: Elaboração própria do autor.

Com os flanges alinhados na posição correta, com todos os parafusos instalados, a *Nacelle* é descida lentamente, enquanto os parafusos são apertados, até que os flanges estejam completamente apoiados (a). Primeiro, todos os parafusos são apertados com um torque inicial (b). Em seguida, deve ser aplicado o torque final, de acordo com a especificação do fabricante da turbina (c).

Depois de terminada a instalação da *Nacelle*, os acessórios de içamento do guindaste e as cordas guias, são liberadas.

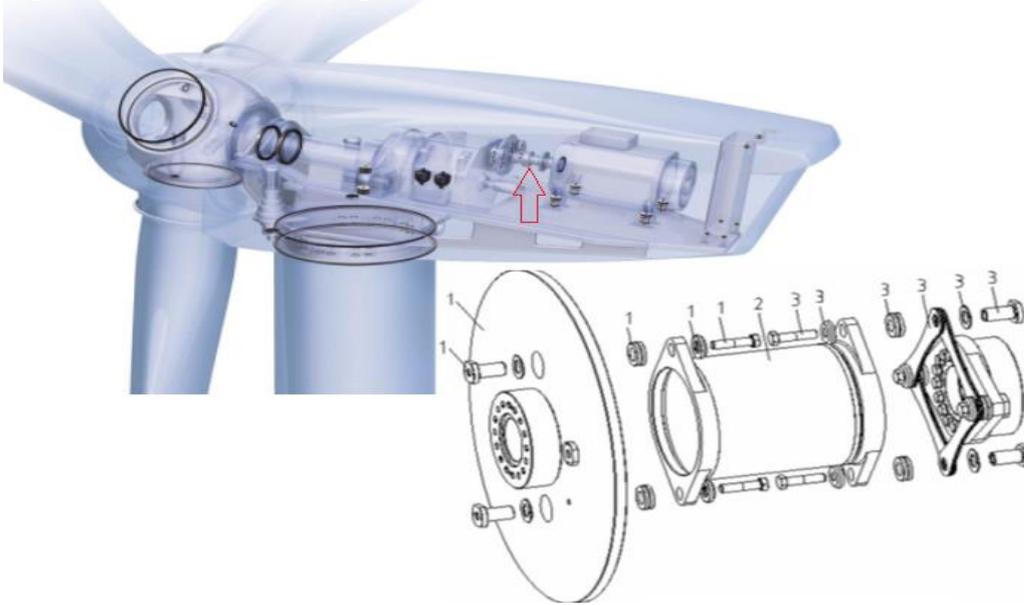
O chamado alinhamento¹⁰ do gerador, é uma atividade de finalização da montagem da *Nacelle*. Consiste, basicamente, no alinhamento da ponta do eixo principal com a ponta do eixo do gerador.

Numa *Nacelle* com caixa de velocidades (caixa redutora), a rotação do eixo principal na entrada é de 15 RPM. E, na saída, pode chegar até 1800 RPM. Ou seja, o acoplamento deverá girar a 1800 rotações por minuto. Considerando a dimensão e composição do acoplamento, um desvio mínimo de massa, com desbalanceamento mínimo, pode levar a quebra do acessório.

A FIGURA 26 ilustra um exemplo de acoplamento e a localização típica na *Nacelle*.

¹⁰ O alinhamento de eixos é um ajuste obrigatório quando se trata do uso de acoplamentos. Mesmo que o acoplamento permita graus de liberdade, um desvio mínimo é admissível, sob risco do acoplamento quebrar durante o serviço.

Figura 26 - Exemplo de acoplamento do eixo do gerador



Fonte: elaboração própria do autor.

As partes que compõem o acoplamento são:

- 1 – Disco de freio, flange com pacote de lâmina – feixe de molas planas (do lado da caixa de velocidades) e elementos de fixação (parafusos);
- 2 – Espaçador, tipo tubo com flange;
- 3 – Flange com pacote de lâmina (do lado gerador) e elementos de fixação.

Para o alinhamento do gerador, é necessário executar um passo a passo, que inclui, primeiro montar o acoplamento do lado do disco de freio, FIGURA 27.

Figura 27 - Montagem do acoplamento do lado do disco de freio

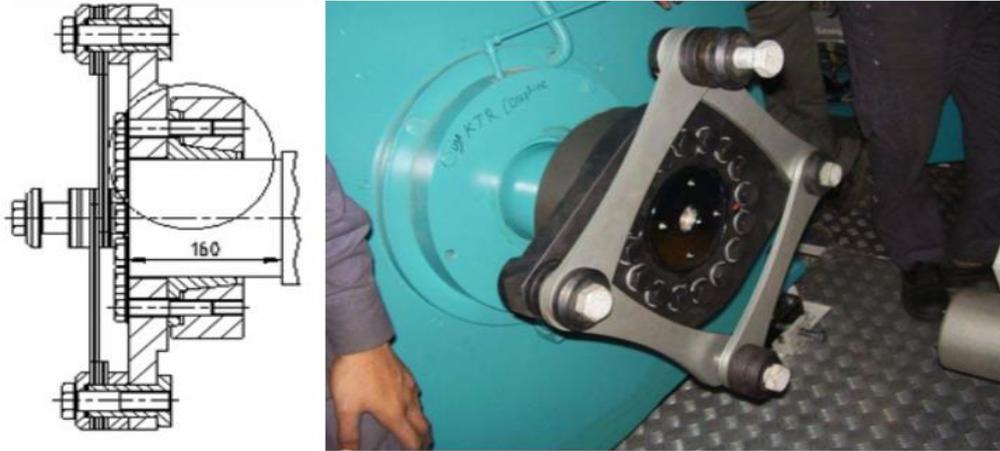


Fonte: Elaboração própria do autor.

O encaixe no disco de freio é feito com uma folga mínima entre o flange e a face do disco. Aplicar torques até que os elementos de aperto não girem mais.

O segundo passo é montar o acoplamento do lado do gerador, conforme ilustrado na FIGURA 28.

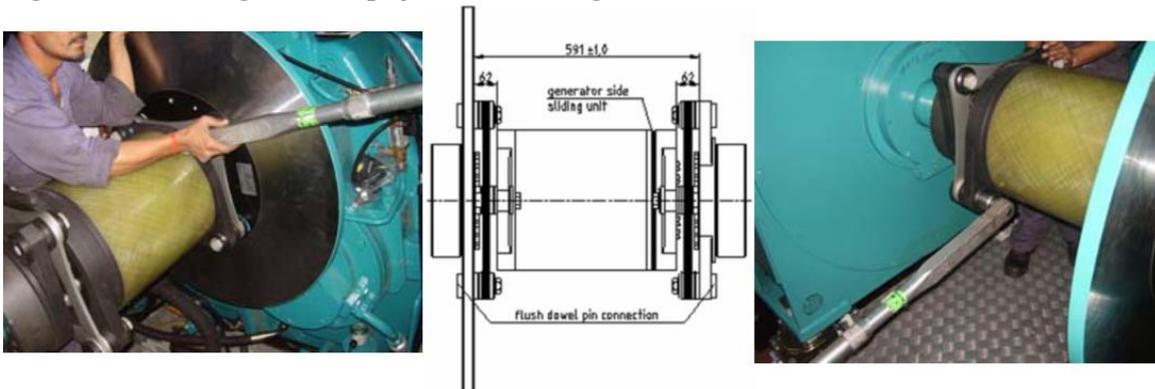
Figura 28 - Montagem do acoplamento do lado do gerador



Fonte: elaboração própria do autor.

Verificar se a face do flange do lado do gerador está alinhada e paralela com a face do flange do disco de freio. Verificar a medida da distância entre as faces, para o encaixe do espaçador com flanges. Se o alinhamento vertical e horizontal das faces dos flanges estiver de acordo com a tolerância de montagem, fazer a montagem do espaçador, concluindo assim o alinhamento do gerador, conforme mostrado na FIGURA 29.

Figura 29 - Montagem do espaçador com flanges

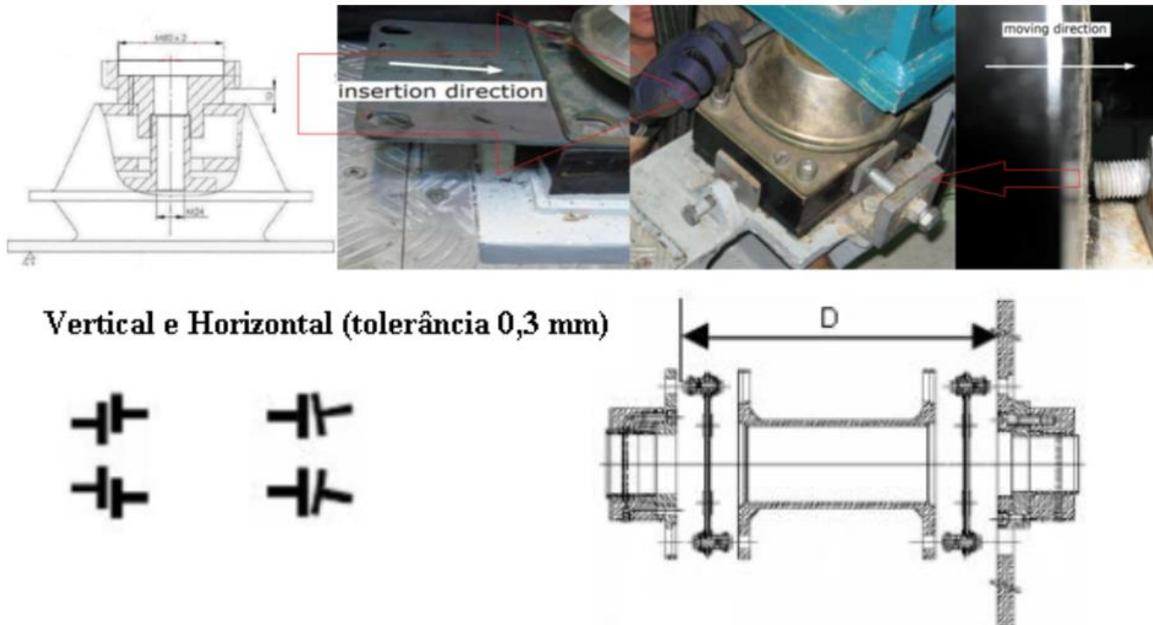


Fonte: Elaboração própria do autor.

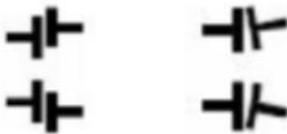
O alinhamento do gerador consiste em verificar o paralelismo e o alinhamento das pontas dos eixos que serão acoplados. A distância, suficiente para acomodar o espaçador, sem interferências, é ajustada por meio de buchas de aperto do elemento de fixação dos flanges, que permite um deslocamento milimétrico axial. Para o ajuste das faces dos flanges, de

paralelismo (horizontal) e de alinhamento (vertical), existe um dispositivo regulável na base do gerador, conforme ilustrado na FIGURA 30.

Figura 30 - Ajuste da face do flange do eixo principal com a do eixo do gerador



Vertical e Horizontal (tolerância 0,3 mm)



Fonte: Elaboração própria do autor.

Este dispositivo regulável da base do gerador, neste exemplo de turbina, funciona como uma espécie de macaco mecânico, com um fuso central, que permite ajustes na vertical e na horizontal do gerador.

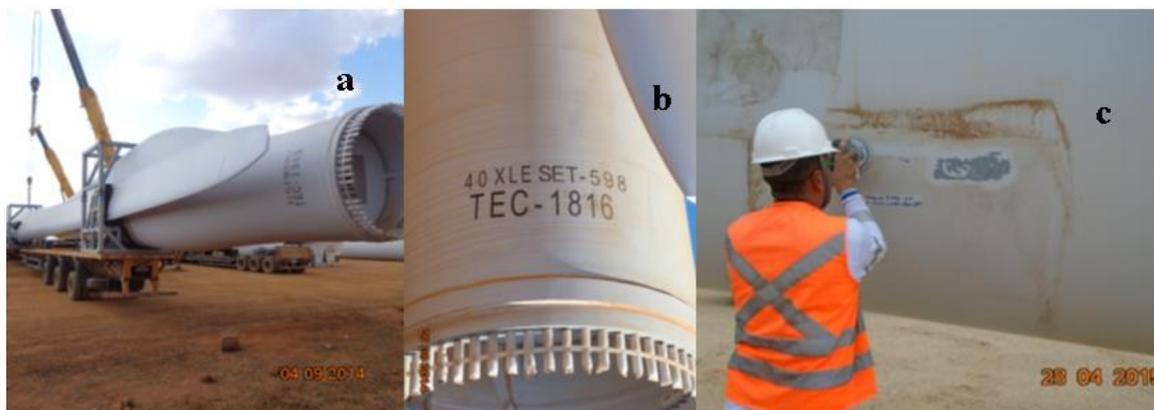
3.2.3 Montagem de Rotor

Para um Rotor horizontal de três pás, são duas as opções de montagem: com pré-montagem em solo, onde as pás são fixadas e torqueadas no hub antes do içamento do conjunto completo. A outra opção, é içar individualmente cada pá.

As Pás são construídas, principalmente, de fibra de vidro. É importante, na descarga e recebimento, inspecionar em busca de danos, como, fissuras, amassamentos, rachaduras ao redor dos pontos de apoio, etc.

A FIGURA 31 mostra exemplos de Inspeção de Recebimento de Pás.

Figura 31 - Inspeção de recebimento de Pás



Fonte: Elaboração própria do autor.

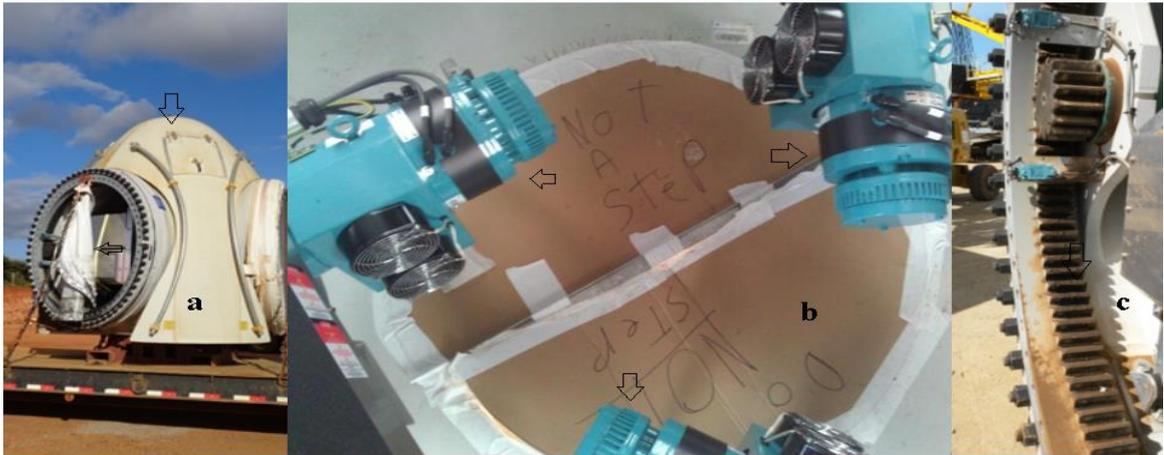
As pás são transportadas, normalmente, em pares. Sobre suportes, especialmente, desenvolvidos para prevenir danos estruturais ou superficiais devido ao transporte, carregamentos e descarregamentos. São descarregadas numa área próxima ao local de montagem, dentro do raio de alcance do guindaste da montagem (a). É recomendado verificar os números de identificação do *SET* (número de identificação do conjunto de pás), de modo sejam montadas num mesmo rotor (b). Com procedimento semelhante ao aplicado na *Nacelle*, a reparação de fibra nas pás precisa ser realizada de forma precisa, a ponto de obter uma superfície lisa e homogênea (c).

A superfície externa da uma pá é uma das partes mais requisitadas para a eficiência aerodinâmica do rotor da turbina. Qualquer dano mínimo, como, ruptura de fibra ou rachadura, tende a evoluir muito rápido, quando a turbina começa a funcionar. Não é muito raro encontrar casos de queda de turbina em função da quebra de alguma pá, motivada por defeitos na fibra. O reparo precisa ser executado, de tal modo, que não seja possível a propagação do dano no sentido da fibra.

Na inspeção de recebimento do *hub* (cubo), além da verificação da cobertura, também fabricada em fibra de vidro, em busca de danos superficiais, verificar a existência de três motorreductores, para o acionamento das pás. Inspeccionar quanto a danos e desvios de qualidade nas escotilhas de entrada, escada, parafusos, porcas e arruelas.

A FIGURA 32 mostra exemplos dos componentes do *hub* que são normalmente inspeccionados no recebimento no local de montagem da turbina.

Figura 32 - Inspeção de recebimento de *hub*



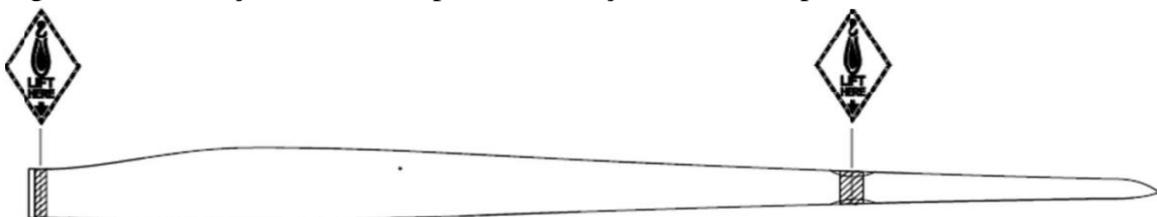
Fonte: Elaboração própria do autor.

O *hub* (cubo), normalmente possui uma carenagem de fibra de vidro, escotilhas e corrimões de apoio, para cesso do pessoal de montagem e manutenção, e suportes de carga usados para o içamento (a). Internamente, além de painéis elétricos de comando e dispositivos para lubrificação automática, o *hub* possui três motorredutores para acionamento individual das pás (b). Cada acionamento de pá possui um engrenamento, com mancais de apoio de difícil acesso depois da pá instalada, por isso é recomendada uma preparação prévia, com limpeza e substituição de graxa (c).

A instalação do Rotor pode acontecer em duas etapas. Primeiro, ainda em solo, as pás são montadas no *Hub*. Em seguida, o Rotor é içado e acoplado na *Nacelle*. O processo de montagem de uma pá, com a aproximação e acoplagem no *hub*, aperto e torque final, é repetido mais duas vezes, para as outras duas pás, completando o conjunto. Requer no mínimo dois guindastes. O segundo guindaste serve de apoio adicional para evitar tombamento do Rotor, enquanto a montagem das três pás não for completada.

Uma pá possui pontos específicos para colocação dos acessórios de içamento, conforme mostrado na FIGURA 33.

Figura 33 - Indicação de locais específicos de içamento numa pá



Fonte: Elaboração própria do autor.

Dependendo do modelo da turbina, é importante verificar as recomendações de içamento das pás. Dependendo do número de guindastes necessários e o tipo de acessórios de içamento.

A FIGURA 34 mostra o processo de montagem das pás no Hub, com a aproximação e o apoio adicional enquanto a montagem das três pás não for completada.

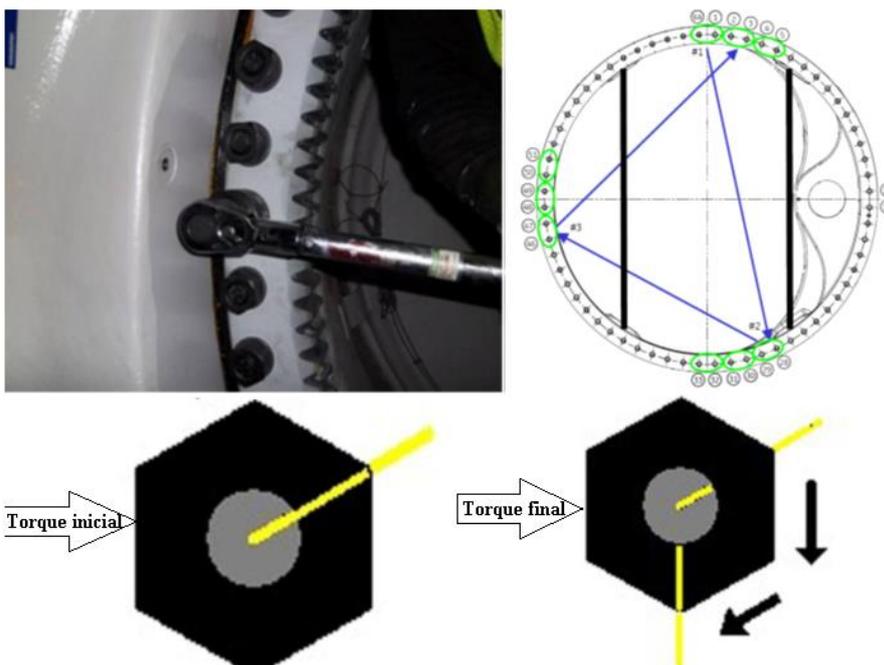
Figura 34 - Pré-montagem do Rotor



Fonte: Elaboração própria do autor.

Enquanto de um lado com a pá já instalada e apoiada no guindaste auxiliar, do outro a próxima pá é posicionada com o guindaste principal. Depois de encaixado todos os parafusos, é preciso instalar as porcas e arruelas, e em seguida aplicar o torque, conforme mostra a FIGURA 35.

Figura 35 - Ilustração do torqueamento de pás



Fonte: Elaboração própria do autor.

O critério de aplicação de torque e seus valores, devem ser consultados no manual de montagem fornecido pelo fabricante. Um exemplo, é quando o torque final é aplicado, no formato estrela, com um giro complementar da porca em 120 graus em relação a posição do torque inicial. Concluído o torque, reposicionar cada pá para a posição zero graus, na posição horizontal – normalmente, a pá possui uma placa de indicação de posição em relação ao *hub*.

Antes do içamento do Rotor, a *Nacelle* precisa ser posicionada de frente para o guindaste, na posição recomendada para receber o Rotor. Todas as ferramentas e parafusos necessários para acoplar o Rotor na *Nacelle* devem estar dispostos e de fácil acesso; o disco de freio deve estar girando livremente; os acessórios de içamento e as cordas guias, em todas as pás, colocados. O comprimento da corda deve ser pelo menos da altura do *Hub*. Essas cordas guias são usadas para controlar o Rotor durante o içamento.

A FIGURA 36 mostra o içamento do Rotor para acoplamento na *Nacelle*.

Figura 36 - Içamento do Rotor



Fonte: Elaboração própria do autor.

Durante o içamento do Rotor o operador do guindaste precisa manter contato com a equipe de montagem na *Nacelle*, de modo a garantir que a aproximação e o encaixe aconteçam com o máximo de precisão. O processo consiste em içar o Rotor horizontalmente até uma altura que permita uma inspeção cuidadosa do flange. O guindaste principal começa a içar o Rotor para uma posição vertical, com o guindaste auxiliar mantendo a pá inferior livre do solo. As cordas guias têm a função de manter o Rotor parado, controlando a ação do vento. Uma vez que o Rotor tenha sido içado à posição vertical, o guindaste é liberado, e o guindaste principal continua sozinho o içamento, para o encaixe correto, de modo que seja possível inserir os parafusos.

A FIGURA 37 mostra a sequência de encaixe e torqueamento do Rotor na *Nacelle*.

Figura 37 - Encaixe e torque do Rotor



Fonte: Elaboração própria do autor.

Uma vez que o primeiro parafuso tenha alcançado sua furação, o guindaste move o Rotor nas direções de acordo com o comando da equipe de montagem na *Nacelle*. Uma vez que o segundo parafuso tenha encontrado seu furo, é possível que todos os outros parafusos já possam ser encaixados (a). Primeiro os parafusos são apertados com um torque inicial (b). E, em seguida todos os parafusos são apertados até o torque final (c). O próximo passo, é escrever na parede do flange as informações de torque, com o valor do torque inicial e final, além da data de execução (d). Marcar todos os parafusos, de maneira a identificar onde foi aplicado o torque.

Para a remoção dos acessórios de içamento, é preciso acessar ao teto da *Nacelle*, na parte externa. Neste caso, é preciso acionar o freio e travar o Rotor. Observar todas as condições de segurança, com os locais corretos de ancoragem dos acessórios do cinto de segurança.

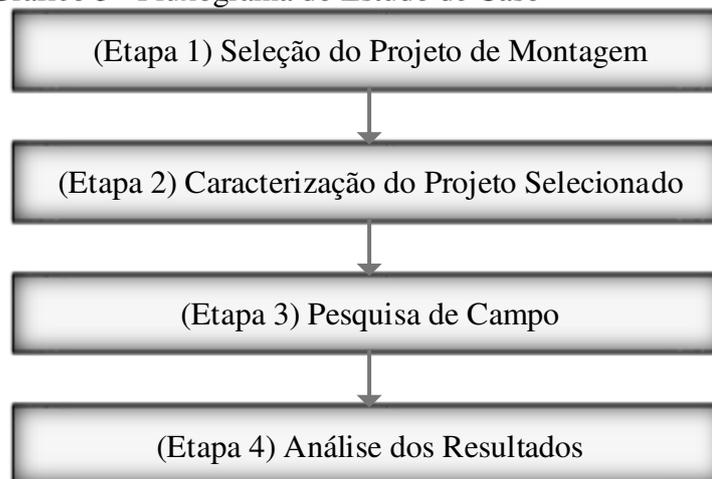
No manual de segurança do trabalho, no programa de treinamento para trabalhos em altura, existem procedimentos e aplicações que tornam o acesso externo na *Nacelle*, assim como o uso de ferramentas, como neste caso de soltar os acessórios do guindaste, um processo controlado e seguro.

3.3 Etapas do Estudo de Caso

A montagem de turbinas é uma etapa da implantação do parque eólico, complexa com relação a execução, que vai além da montagem mecânica, que ainda inclui obras civis e obras elétricas. A montagem mecânica uma etapa intermediária, que começa logo após às obras civis, e precisa terminar antes do início das obras elétricas.

Os processos de execução são fundamentados, essencialmente na engenharia de projetos de máquinas, na concepção e construção da turbina, considerando a vida útil dos componentes e as características de disponibilidade requeridas durante todo o tempo previsto para operar. Neste estudo de caso, onde foi considerado apenas a montagem mecânica dos componentes, visando analisar a execução com relação ao planejamento, foi desenvolvido conforme ilustra o fluxograma apresentado a seguir.

Gráfico 3 - Fluxograma do Estudo de Caso



Fonte: Elaboração própria do autor.

3.3.1 Seleção do Projeto de Montagem

A maioria dos grandes parques eólicos já construídos no Brasil estão localizados em regiões litorâneas. Sem a necessidade de grandes adequações nas vias de acesso, e com relativa disponibilidade de recursos. Executar um projeto de montagem de turbinas eólicas dessa magnitude no interior do Brasil, numa região com atividade industrial quase inexistente, pode ser muito difícil. Com grande risco de atrasos no cronograma executivo e aumento considerável no custo de execução do projeto.

Do ponto de vista ambiental, o projeto precisa estar habilitado de acordo com as licenças exigidas para a maioria dos projetos eólicos de grande porte, que em geral são três: a Licença Prévia (LP) – concedida na fase preliminar do planejamento do empreendimento, aprovando sua localização e concepção, atestando a viabilidade ambiental e estabelecendo os requisitos básicos e condicionantes a serem atendidos nas próximas fases de sua implementação. Nesta fase do licenciamento ainda não é autorizado o início de obras; a Licença de Instalação (LI) – autoriza o início da instalação do empreendimento ou atividade de acordo com as especificações constantes dos planos, programas e projetos executivos aprovados, incluindo as medidas de controle ambiental e demais condicionantes, da qual constituem motivo determinante. Neste momento não é autorizada a operacionalização do empreendimento; e, a Licença de Operação (LO) – autoriza a operação da atividade, obra ou empreendimento, após a verificação do efetivo cumprimento das exigências das licenças anteriores (LP e LI), bem como do adequado funcionamento das medidas de controle ambiental, equipamentos de controle de poluição e demais condicionantes determinados para a operação.

Do ponto de vista técnico, o transporte de componentes de turbinas é sempre uma das primeiras condições a ser verificada. A existência de vias de acesso, se com pista simples ou duplicadas; com curvas que precisam ser adequadas para passagem das pás, normalmente com mais de 50 metros de comprimento; com viadutos e pontes, que precisam comportar o peso e a dimensão dos componentes. Em alguns casos, o transporte só poderá ser realizado em horário específico, sob escolta especializada.

A experiência da equipe de montagem, deve ser considerada também como critério de seleção do projeto de montagem. Durante a execução do projeto poderá ocorrer situações atípicas, não planejadas, e a habilidade na busca de soluções poderá ser a diferença entre o sucesso e o fracasso do projeto. Geralmente, o pessoal técnico chave da montagem são selecionados nos grandes centros de formação. Mas, alguns montadores, auxiliares, com funções menos especializadas, podem ser selecionados e recrutados na região¹¹ de execução da montagem das turbinas eólicas.

¹¹ Em muitos projetos, o Cliente Final recomenda que seja considerada uma cota de contratação na região de execução do projeto. Na maioria dessas regiões a baixa qualidade e disponibilidade de mão de obra são os principais problemas.

Um projeto de montagem de turbinas eólicas pode requerer guindastes de várias capacidades. No transporte é utilizado para o carregamento e descarregamento, o que deve ser considerado principalmente a capacidade de levantar pesos, numa altura não muito superior ao próprio veículo de transporte. Como o descarregamento, nas sucessivas viagens, pode ocorrer em bases de turbinas diferentes, é importante que estes guindastes tenham boa capacidade de deslocamentos. Na montagem dos segmentos da torre, da *Nacelle* e do Rotor, deve ser considerado a capacidade de levantar os componentes em função da altura da turbina. Este guindaste, se montados sobre esteiras, normalmente são mais lentos em deslocamento entre bases de turbinas.

3.3.2 Caracterização do Projeto Selecionado

Na caracterização do projeto, além da qualificação da equipe de montagem, serão apresentados os dados do projeto de montagem de turbinas eólicas selecionado. O que inclui, o cronograma e o custo do projeto planejado, em função da quantidade de pacotes de trabalho. Cada pacote de trabalho utiliza recursos de mão de obra especializada e operações com guindastes.

A mão de obra especializada executa funções que envolve a interpretação do projeto, no aspecto construtivo e funcional, das turbinas eólicas; critérios do controle de qualidade, como nas inspeções de recebimento do transporte e de entregas, na conclusão da montagem; como no gerenciamento e aplicação de programas de saúde e segurança do trabalho e meio ambiente, o que pode incluir: o PCMSO - Programa de Controle Médico de Saúde Ocupacional, de acordo com a Norma Regulamentadora N° 7; o PPRA (Programa de Prevenção de Riscos Ambientais), de acordo com Norma Regulamentadoras N° 09; o Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS), de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Federal nº 12.305/2010).

A operação com guindastes, na maioria dos processos, requer sempre um guindaste principal e um guindaste auxiliar. Para cada componente da turbina eólica, segmentos de torre, *Nacelle* e Rotor, existe um limite com relação a velocidade de vento na qual o guindaste pode operar. Estes valores são fornecidos pelo fabricante do guindaste e ratificados em contrato pelo Cliente Final.

3.3.3 Pesquisa de Campo

Na pesquisa de campo serão apresentados os dados de execução da montagem das turbinas eólicas. Basicamente, a data planejada para o final da montagem será utilizada como data de acompanhamento para atualização do cronograma, da linha de base do tempo e do custo.

O acesso às informações foi a partir dos relatórios de acompanhamento da montagem, da equipe de fiscalização e qualidade; relatórios gerenciais e ATA's de reuniões de acompanhamento, da equipe de gerenciamento do projeto. Durante o tempo de 34,8 dias, planejado para executar o projeto de montagem das turbinas eólicas.

O cronograma executivo será atualizado na data de acompanhamento. Como forma de verificar o tempo de execução dos pacotes de trabalho. A análise de desempenho do custo será realizada pelo gerenciamento do Valor agregado (VA). Determinando se o projeto estará adiantado ou atrasado, se executado gastando mais ou menos recursos com relação ao planejado.

3.3.4 Análise dos Resultados

Nesta etapa será analisado os desvios de execução com relação ao planejamento. Com a atualização do cronograma na data de acompanhamento, serão verificados o percentual de execução do escopo em relação ao planejado; o custo real de execução do projeto, mais o tempo necessário para terminar a montagem das turbinas eólicas.

O custo real da montagem das turbinas eólicas, será calculado de acordo com as horas consumidas por cada pacote de trabalho, em função das respectivas taxas horárias predefinidas.

3.4 Desenvolvimento do Estudo de Caso

Nessa parte do trabalho serão apresentados como foi realizado o Estudo de Caso, de acordo com cada etapa planejada.

3.4.1 Seleção do Projeto de Montagem

Como critérios de seleção do projeto de montagem, foram considerados: as condições de transporte, do porto de entrega até uma área de estocagem próxima ao site de montagem, para posterior redistribuição nas bases das respectivas turbinas eólicas; risco de incidências de ventos fortes durante a execução do içamento de componentes das turbinas eólicas; e, a baixa de disponibilidade de recursos na região, principalmente na parte de mão de obra especializada.

Todas as licenças ambientais requeridas estavam em conformidade com a fase de execução do projeto.

A complexidade no transporte dos componentes das turbinas, foi considerada por se tratar de um dos primeiros projetos eólicos de grande porte a ser implantado no interior do Brasil, longe da região litorânea. Com cerca de 700 km do porto mais próximo. Em região de montanhas, de difícil acesso, com muitas adequações nas vias de acesso para permitir a passagem de *Nacelles* e pás, por exemplo. Para minimizar o risco de atrasos no transporte, foi utilizada uma área de estocagem fora da área do parque eólico, como pulmão. À medida que os acessos eram liberados, os componentes das turbinas eram distribuídos nas suas respectivas bases. Foram realizados transportes paralelos, fora da sequência planejada por base.

O risco de parada da operação com guindaste devido a incidências de ventos fortes é considerado em função de parâmetros de limitação dos guindastes. Para cada tipo de componente de turbina que precisou ser içado foi determinado um valor máximo admissível como seguro para realizar a operação. Foram preestabelecidos os seguintes valores médios de velocidades de ventos, de acordo com as características de montagem de cada componente: para o içamento de segmentos de torre T1, T2 e T3, o limite preestabelecido foi de 11 m/s; para o içamento da *Nacelle*, o limite foi de 12,8 m/s. E, para o içamento do Rotor, a média de vento ficou no limite de 9 m/s.

A equipe de montagem foi uma equipe multifuncional, formada por profissionais de diversas áreas, tais como, administradores, engenheiros e outros profissionais com formação distinta e ponto de vista diferentes, que enriqueceram a equipe e apresentaram soluções diferentes. Selecionados e recrutados nos grandes centros de formação profissional do Brasil. Escolhidos para agregar valor com suas experiências e habilidades. As equipes foram treinadas no detalhamento do projeto construtivo e funcional das turbinas eólicas. E, ainda, nos treinamentos obrigatórios, de acordo com Normas de Saúde e Segurança do

Trabalho vigentes no Brasil, tais como, trabalho em altura, trabalho em espaço confinado, primeiros socorros, combate a incêndios, etc. Além de treinamentos relacionados aos impactos ambientais, considerando principalmente a produção e destinação de resíduos.

3.4.2 Caracterização do Projeto Selecionado

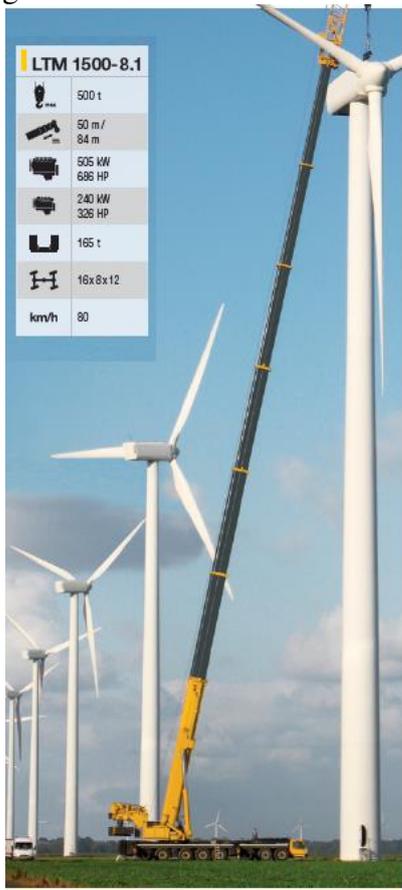
O projeto selecionado trata da montagem mecânica de 15 turbinas eólicas, cada uma com potência instalada de 1,8 MW e altura de 80 m, localizado em Pindaí, no Estado da Bahia, foi planejado para ser executado em 34,8 dias. O escopo foi definido para ser executado em três pacotes de trabalho: um pacote de trabalho responsável pelo transporte de componentes das turbinas; um pacote de trabalho responsável pela montagem dos segmentos de torre T1 e T2; e, um pacote de trabalho responsável pela montagem do segmento de torre T3, da *Nacelle* e do Rotor.

O planejamento do transporte considerou o seguinte cronograma:

- O transporte de 14 turbinas nas duas primeiras semanas, ficando a décima quinta turbina para ser transportada na terceira semana. Para carregamentos e descarregamentos foram utilizados dois guindastes, um LTM 1220 (com capacidade de carga de 220 toneladas), como guindaste principal, e um LTM 1100 (com capacidade de carga de 100 toneladas), como guindaste auxiliar. Durante o descarregamento, no recebimento do transporte entre o porto e a área de estocagem, e depois, também no descarregamento da redistribuição entre as bases, foram realizadas as inspeções de recebimento, com o objetivo de identificar não conformidades de qualidade nas especificações técnicas dos componentes.
- Para a montagem dos segmentos de torre T1 e T2 foi utilizado um guindaste LTM 1500 (com capacidade de carga de 500 toneladas), como guindaste principal, e um guindaste LTM 1100, como guindaste auxiliar. O planejamento determinou um rendimento de 5 torres por semana, considerando 50 horas de trabalho semanal.

A FIGURA 38 ilustra um guindaste do tipo LTM.

Figura 38 - Guindaste LTM 1500



LTM 1500-8.1	
	500 t
	50 m / 84 m
	505 kW 686 HP
	240 kW 326 HP
	165 t
	16x8x12
	km/h 80

- 8-axe all terrain chassis
- Bestseller for the assembly of wind generators of the 1.5 MW class
- Multi variable boom system: 50 m and 84 m telescopic boom, fixed and luffing lattice jib
- Sensitive manoeuvring due to comfortable all-wheel steering and torque converter
- Economical transportation logistics as for maximum capacities at steep working radii only partial ballast is needed

84 m-telescopic boom + Y-guying system + fixed jib

Hub height	Max. capacity at radius	Hook height	System
80 m	84 t x 16 m	72 m	TY3ENZF
90 m	38.5 t x 20 m	88 m	TY3ENZF
100 m	17.2 t x 24 m	109 m	TY3ENZF

50 m-telescopic boom + Y-guying system + luffing jib

Hub height	Max. capacity at radius	Hook height	System
60 m	78 t x 18 m	72 m	TY3SN
90 m	56 t x 24 m	90 m	TY3SN
100 m	31 t x 30 m	109 m	TY3SN
105 m	24 t x 34 m	116 m	TY3SN
120 m	16.1 t x 38 m	129 m	TY3SN



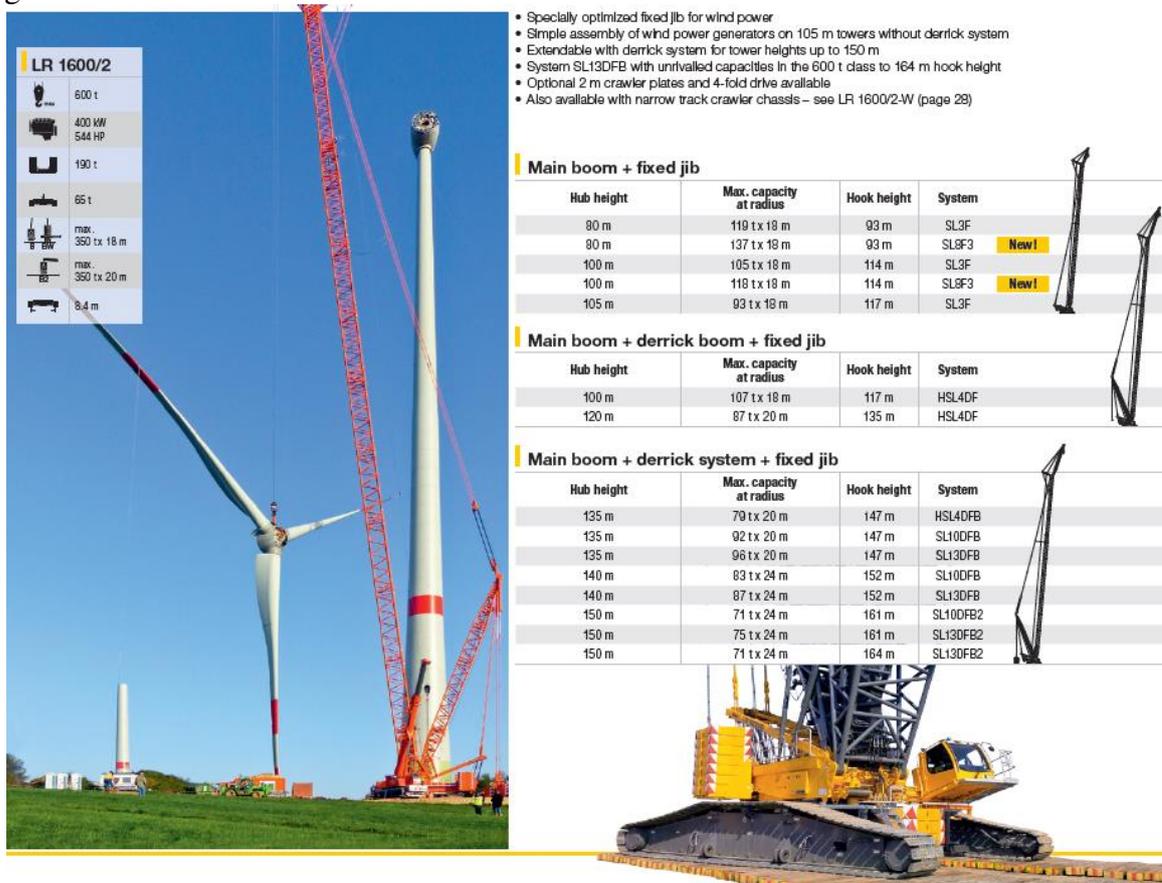
Fonte: Elaboração própria do autor.

A descrição LTM caracteriza os guindastes móveis, sobre rodas e com lança telescópica. Este tipo de guindaste se desloca com facilidade entre bases e não precisa ser desmontado na mobilização. Já o guindaste LR utiliza lança treliçada de grande capacidade de carga, altura e alcance, e demora até dez dias para ser montado na mobilização.

- Para a montagem do segmento de torre T3, *Nacelle* e Rotor, foi escolhido um guindaste LR1600 (com capacidade de carga de 600 toneladas), como guindaste principal, e um guindaste LTM 1100, como guindaste auxiliar. O planejamento determinou um rendimento de 5 torres por semana, considerando 50 horas de trabalho semanal.

A FIGURA 39 ilustra um guindaste do tipo LR.

Figura 39 - Guindaste LR 1600



Fonte: Elaboração própria do autor

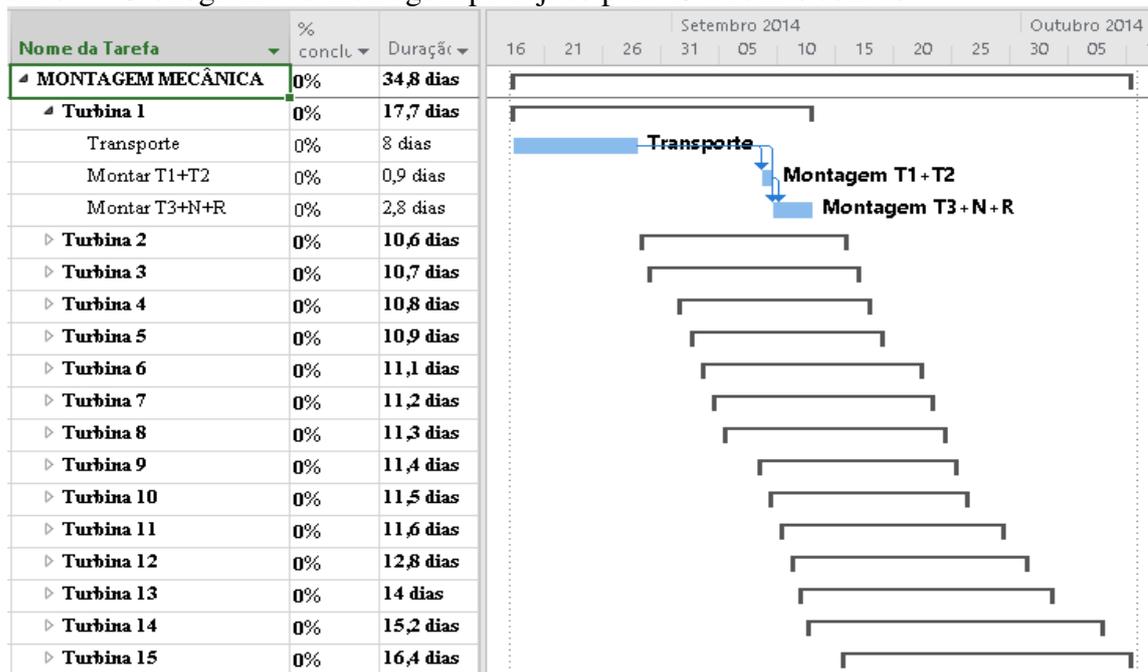
Esse tipo de guindaste que se desloca entre as bases com velocidade máxima de 1,2 km/h.

Na divisão de escopo, a pesar da importância técnica da mão de obra especializada, pelo conhecimento detalhado do projeto, com habilidades específicas de aplicação de ajustes, que garantirão a montagem contra falhas, permitindo que a turbina opere de forma segura e com o máximo de disponibilidade, é a parte do escopo de operações com guindastes que custa mais caro. Com cerca de 75% do valor total da montagem.

Na determinação do cronograma de montagem, o transporte aparece como atividade predecessora para a montagem dos segmentos de torre T1 e T2. Para que seja possível a montagem do segmento T3, antes precisam estar concluídos, respectivamente, o transporte, a montagem do T1 e do T2. Na sequência de montagem, é içada a *Nacelle* e, seguida, na conclusão da montagem da turbina eólica, é feito o içamento do Rotor.

O gráfico 4 mostra o cronograma de montagem planejado em função do transporte.

Gráfico 4 - Cronograma de montagem planejado para 15 turbinas eólicas



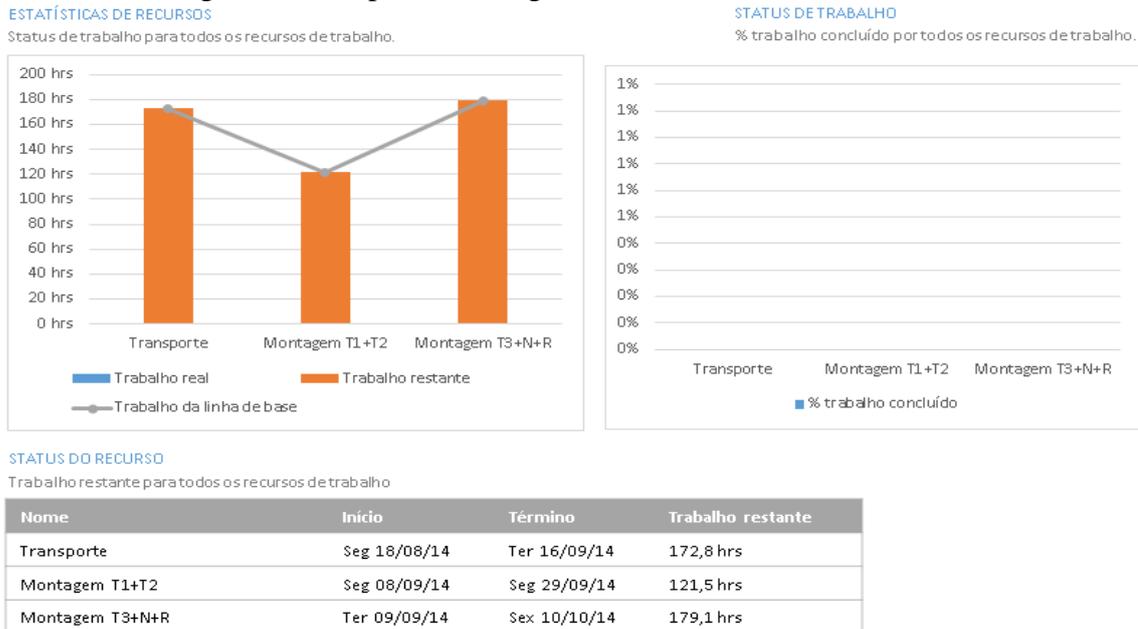
Fonte: Elaboração própria do autor.

Na sequência, a montagem com o guindaste LTM 1500, e em seguida com o guindaste LR 1600. O prazo planejado para executar a montagem das 15 turbinas eólicas foi planejado em 34,8 dias.

Foi planejado um tempo maior para o transporte da primeira turbina, 8 dias, devidos ao processo de mobilização. A definição de 0,9 dias para a montagem do segmento T1 e T2, considera a desmobilização do guindaste LTM 1500. Na montagem do segmento T, da *Nacelle* e do Rotor, o tempo de 2,8 dias considera ainda a pré-montagem do Rotor – instalação das pás no *hub* antes do içamento.

O gráfico 5 ilustra uma visão geral do escopo, com uso de recurso. Com data início e de término, e suas respectivas durações para cada pacote de trabalho.

Gráfico 5 - Visão geral do escopo de montagem



Fonte: Elaboração própria do autor.

A data de acompanhamento, para atualização do cronograma, foi definida para 10 de outubro de 2014.

O custo planejado, que incluiu o transporte como parte do custo com operações com guindastes, considerando o aluguel de veículos e de guindastes, a mobilização de todos os equipamentos, a aquisição de insumos e a equipe de apoio, tanto de operação como de manutenção; e, a mão de obra especializada, com ferramentas de uso geral e específico.

Como critério de análise do custo, em função da quantidade de horas consumidas por cada pacote de trabalho para executar a montagem dos componentes das turbinas eólicas, o custo horário para cada pacote de trabalho foi determinado da seguinte forma:

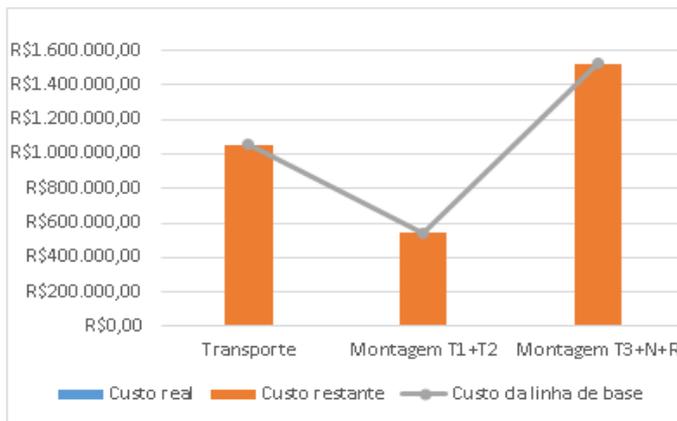
- Custo horário do pacote de trabalho do transporte – R\$ 6.100,00 / h (seis mil e cem reais por hora);
- Custo horário do pacote de trabalho da montagem dos segmentos T1 e T2 – R\$ 4.470,00 / h (quatro mil quatrocentos e setenta reais por hora);
- Custo horário do pacote de montagem do segmento T3, *Nacelle* e Rotor – R\$ 8.500,00 / h (oito mil e quinhentos reais por hora).

O gráfico 6 mostra a distribuição do custo em função dos pacotes de trabalho, e o total do montante planejado para executar a montagem dos componentes de 15 turbinas eólicas.

Gráfico 6 – Custo planejado de montagem

STATUS DE CUSTO

Status de custo para recursos de trabalho.



CUSTO DE DISTRIBUIÇÃO

Como os custos estão distribuídos ao longo de diferentes tipos de recursos.



DETALHES DO CUSTOS

Detalhes dos custos para todos os recursos de trabalho.

Nome	Trabalho real	Custo real	Taxa padrão
Transporte	0 hrs	R\$0,00	R\$6.100,00/hr
Montagem T1+T2	0 hrs	R\$0,00	R\$4.470,00/hr
Montagem T3+N+R	0 hrs	R\$0,00	R\$8.500,00/hr

Fonte: Elaboração própria do autor.

O montante planejado de custo de execução da montagem dos componentes das turbinas foi de R\$ 3.119.535,00 (três milhões cento e dezenove mil quinhentos e trinta e cinco reais).

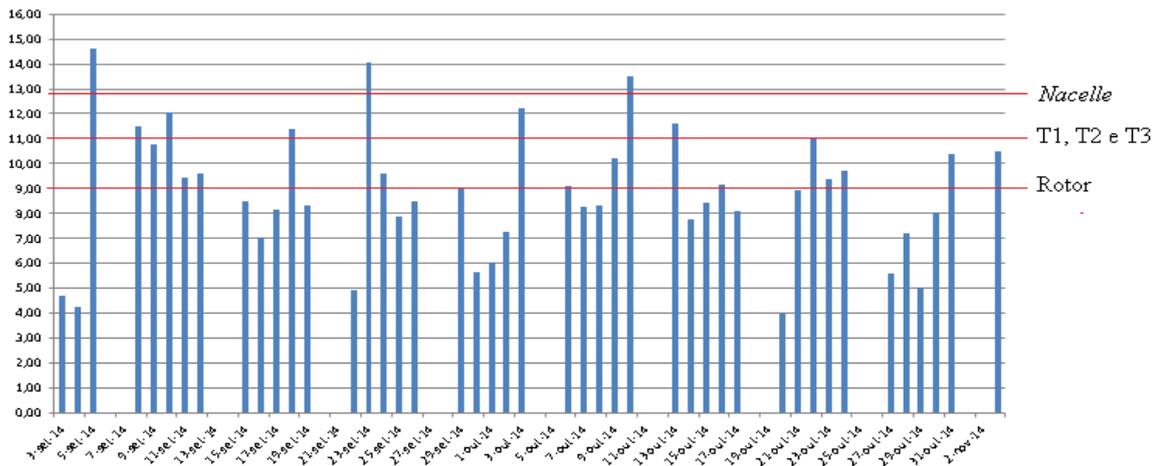
3.4.3 Pesquisa de Campo

No planejamento da montagem, a quantidade de horas atribuídas a cada pacote de trabalho sempre considera o tempo efetivo de execução do içamento, por exemplo. Entretanto, antes ocorre toda uma preparação para a execução da operação. O guindaste precisa ser devidamente posicionado, os acessórios precisam ser instalados, as lanças precisam ser levantadas para a posição adequada para o içamento, etc. Em caso de algum imprevisto que impeça a execução do processo, todas essas ações de preparação serão desfeitas. Para realizar novas operações, todo o processo de preparação precisa ser executado novamente.

No caso da incidência de ventos fortes, mesmo que as janelas de vento sejam previstas numa base de dados historicamente confiável, o risco de não conseguir executar uma operação com guindaste é uma situação sempre possível.

Considerando o período planejado para a execução da montagem dos componentes das turbinas, os dados coletados nos relatórios gerenciais e de acompanhamento, indicam que houve incidência de ventos fortes em dias programados para executar montagem, conforme mostrado no gráfico 7.

Gráfico 7 - Média das velocidades de vento nos dias de montagem



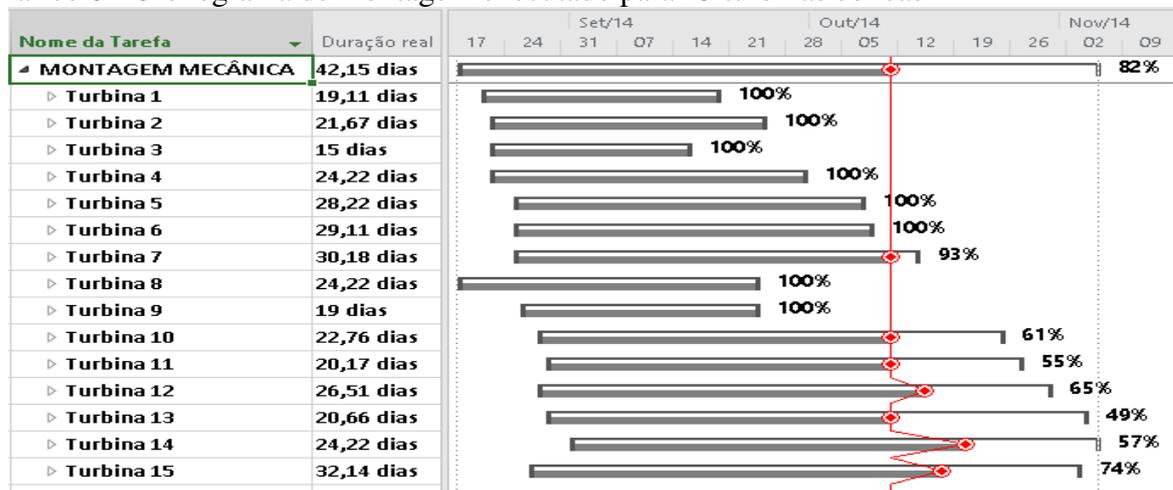
Font

e: Elaboração própria do autor.

O gráfico mostra como a média diária de velocidades de vento registradas durante o período de montagem, em dias úteis, entre 07 e 17:00 horas. É possível observar que a montagem de Rotor foi a mais afetada.

O gráfico 8 mostra a situação real executada. O cronograma de montagem foi atualizado na data de acompanhamento, de acordo com a linha de acompanhamento (vertical vermelha).

Gráfico 8 - Cronograma de montagem executado para 15 turbinas eólicas



Fonte: Elaboração própria do autor.

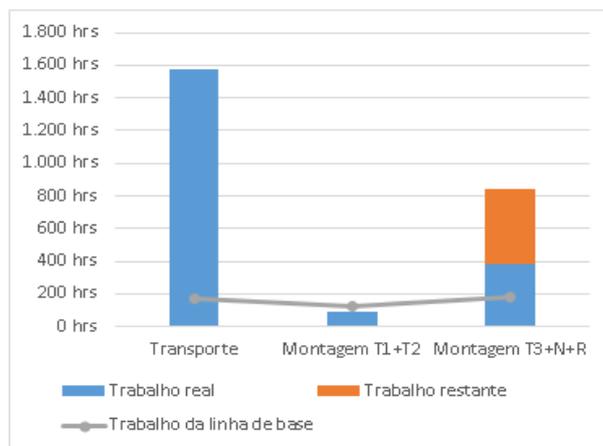
O avanço do cronograma em relação à data de acompanhamento, mostra que somente 82% do escopo foi executado. Restaram pendências nas turbinas 7, 10, 11, 12, 13, 14 e 15. A previsão da data do término da montagem foi atualizada para 02 de novembro de 2014, com duração total de 42,15 dias.

De acordo com o gráfico 9, os atrasos ocorreram na montagem do segmento no segmento do topo T3, na *Nacelle* e no Rotor.

Gráfico 9 – Acompanhamento do tempo em função da linha de base do cronograma

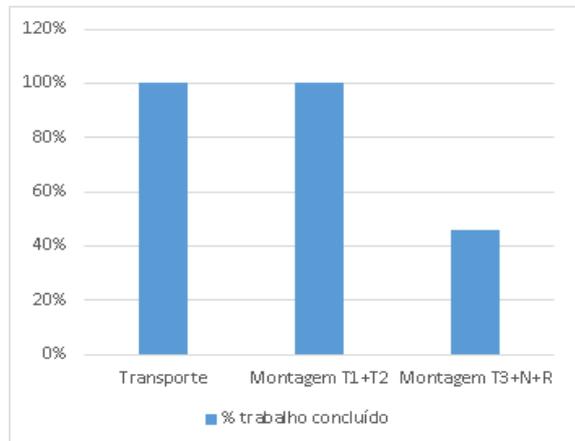
ESTATÍSTICAS DE RECURSOS

Status de trabalho para todos os recursos de trabalho.



STATUS DE TRABALHO

% trabalho concluído por todos os recursos de trabalho.



STATUS DO RECURSO

Trabalho restante para todos os recursos de trabalho

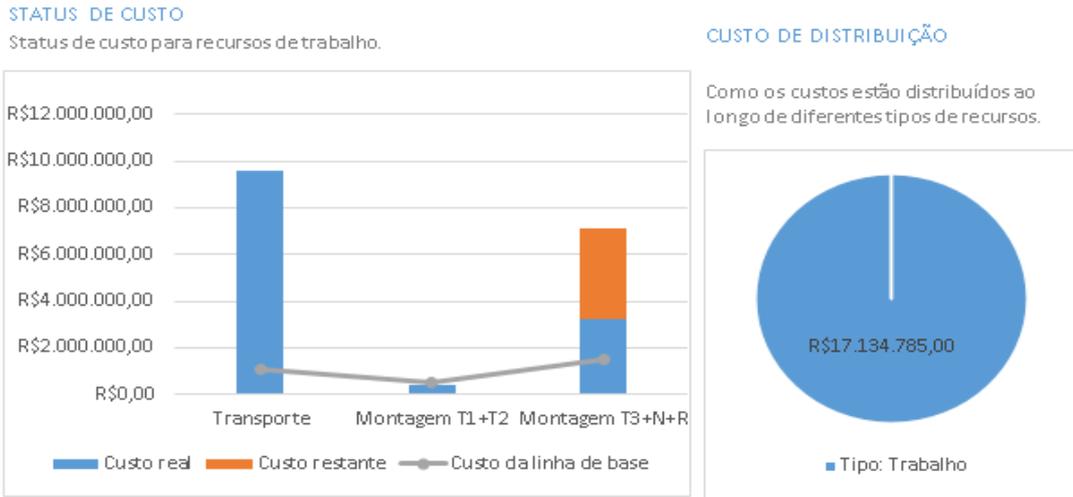
Nome	Início	Término	Trabalho restante
Transporte	Qua 20/08/14	Qua 17/09/14	0 hrs
Montagem T1+T2	Qua 03/09/14	Qui 09/10/14	0 hrs
Montagem T3+N+R	Seg 18/08/14	Qua 05/11/14	456,5 hrs

Fonte: Elaboração própria do autor.

As 456,5 horas de trabalho restante é cerca de 2,5 vezes a mais que a quantidade planejada para montar todo o pacote de trabalho.

Com relação ao custo, o gráfico 10 mostra que a montagem pode ter custado até 5,5 vezes a mais que o planejado. Em relação ao planejado, o custo saltou de R\$ 3.119.535,00 para R\$ 17.134.785,00. O pacote de trabalho que consumiu mais recursos foi o transporte. Seguido da montagem T3, *Nacelle* e Rotor. O transporte utilizou cerca de 9,1 vezes a mais de horas. E a montagem do segmento T3, *Nacelle* e Rotor tende a utilizar a mais 4,7 vezes em relação a quantidade de horas planejadas.

Gráfico 10 – Acompanhamento do custo em função da linha de base do cronograma



Fonte: elaboração própria do autor.

Na montagem do segmento T1 e T2 o custo foi menor, em função de uma duração menor do trabalho real. Das 121,5 horas planejadas, foram necessárias apenas 85,5 horas. Uma redução de quase 30%.

O gráfico 11, mostra o comportamento do custo quando gerenciado pelo Valor Agregado (VA).

Gráfico 11 - Valor agregado ao longo do tempo atualizado na data de acompanhamento



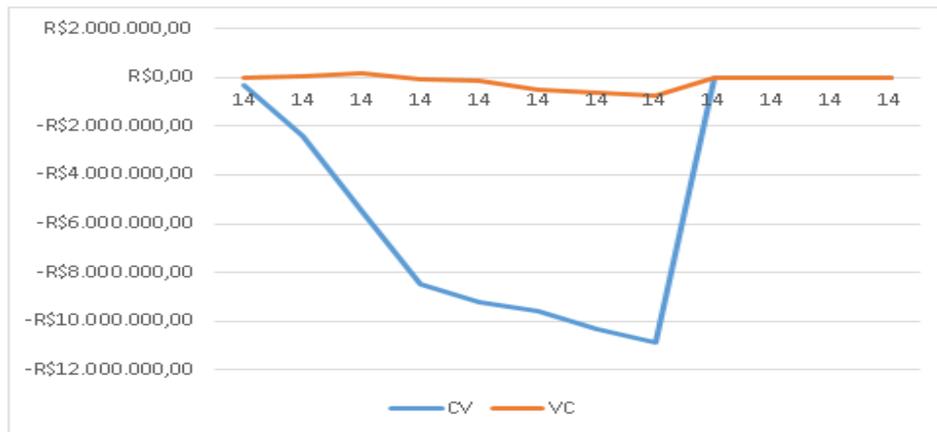
Fonte: Elaboração própria do autor.

É possível observar que de fato o custo real da montagem está acima do orçamento. O custo real (CR) ficou muito maior que o VA. Com a COTA na maior parte do período acima do VA, também significa que a montagem está atrasada.

É possível observar ainda que mesmo gastando mais, a execução não se distanciou da Linha de Base na primeira metade do prazo planejado. Em determinado período foi até mais rápido. Onde o VA ficou abaixo da COTA, indica que ainda existem tarefas a realizar, com valores previstos ainda não empregados.

A variação do custo (CV) ao longo do tempo, mostrado no gráfico 12, indica que o custo cresceu a mais R\$11.000.000,00.

Gráfico 12 - Variação do custo ao longo do tempo atualizado na data de acompanhamento



Fonte: Elaboração própria do autor.

Já a variação negativa do VC (variação de cronograma) indica que a montagem realmente atrasou. O ideal seria o VC constante em zero.

E, por fim, a análise pelos índices ao longo do tempo, de desempenho do trabalho planejado e do custo, conforme mostrado no gráfico 13, com o IDC abaixo de 1 significa que o desempenho do custo ficou muito ruim.

O pacote de montagem dos segmentos de torre T1 e T2, foi o único com desempenho superior ao planejado. Foi executado num prazo 30% menor que o planejado, com equivalente redução do custo.

Quando comparado a duração total da montagem, dos planejados 34,8 dias em relação aos 42,15 dias executados, totalizando uma diferença de 21,12% de incremento no prazo, não tem como criar uma relação de proporcionalidade com o custo. O custo cresceu numa proporção muito maior.

O aumento significativo no custo do projeto de montagem das turbinas eólicas, revela uma situação de extrema preocupação com relação a viabilidade do projeto do parque eólico. A diferença de 5,5 vezes em relação ao valor estimado é maior que qualquer previsão racional, associada a qualquer risco que possa não ter sido previsto. E, o não cumprimento do marco de início da operação comercial agravou ainda mais a situação econômica do projeto.

3.5 Recomendações

Algumas recomendações de boas práticas que pode contribuir para diminuir os desvios observados em projetos de montagem de turbinas eólicas:

- Uma visita de campo antes da elaboração da proposta orçamentária e assinatura do contrato - pode ser diferencial para o entendimento de possíveis conflitos nas obrigações de contrato durante a execução do projeto. É um reconhecimento do local e da região onde será executado o projeto de montagem das turbinas eólicas. Onde são verificadas as características do local, acessos e o histórico de condições ambientais; e a disponibilidade de recursos, tais como, hotéis, hospitais, rede de suprimentos, serviços de terceiros, serviços de água, esgoto, energia, comunicação, etc.
- Uma matriz de responsabilidade - descrevendo as obrigações destinada a cada parte interessada, com o escopo detalhado para cada fase do projeto.
- Uma matriz de comunicação - incluindo as partes interessadas no projeto, classificadas de acordo com a responsabilidade exercida no organograma do projeto.
- A elaboração de um detalhado plano de mobilização, considerando principalmente aquisição de recursos, recrutamento e seleção de pessoal - na

carência de mão de obra especializada de primeira linha, tais como supervisores, técnico de planejamento, qualidade, segurança do trabalho, meio ambiente, etc., montadores e auxiliares podem ser recrutados sem prejuízo para a qualidade da montagem. É recomendável que ao menos um auxiliar administrativo seja da região, com apurado conhecimento da cadeia de fornecedores, do funcionamento dos serviços públicos, etc., de modo que relacionamento local seja de fundamental importância na resposta às demandas na rotina do projeto. O plano de mobilização precisa considerar também o deslocamento e a integração, a partir da data definida na ordem de serviço emitida pelo cliente.

- Outra recomendação, e talvez a de maior impacto nos resultados do projeto, é a escolha de um gerente com poder de liderança equilibrado, ciente das limitações do projeto, focado no gerenciamento dos requisitos do projeto sem comprometer a qualidade e habilidoso na gestão da comunicação das partes interessadas.

Definir estimativas de baixo risco para a execução um projeto de montagem de turbinas eólicas, é um processo que requer, por parte da equipe de planejamento, além da experiência de projetos anteriores, um detalhado conhecimento das especificações técnicas do modelo de turbina que será montado e das condições ambientais do local onde a montagem será executada.

3.6 Considerações Finais

A montagem de turbinas é apenas uma parte do escopo de implantação do parque eólico. Existe uma série de condicionantes que precisam ser cumpridas antes, durante e depois da montagem. Qualquer atraso ou não conformidade no atendimento de alguma dessas condicionantes pode significar uma eventual paralização por medida forçosa, com reflexo direto nos resultados do projeto.

Ou seja, executar um projeto de montagem de turbinas eólicas não significa apenas aplicar técnicas apuradas de tecnologia mecânica e habilidades na operação com guindastes, engloba uma gama de competências que pode ir além da engenharia mecânica. O gerente de projeto precisa exercer uma visão ampla do planejamento, num processo continuado de atualização do avanço do projeto. De maneira a subsidiar um sistema de

decisão, que quando for acionado, seja possível aplicar a contingência mais adequada à necessidade do projeto.

Os desvios de execução verificados neste trabalho não podem ser meramente atribuídos a falhas de procedimentos na execução, mas substancialmente a um planejamento de baixa precisão.

Como atenuante na atribuição da maior parte da culpa, pelos largos desvios, para a equipe de planejamento, este projeto pode ter pago o preço do pioneirismo. Foi um projeto um projeto ousado na estratégia sob dois aspectos: no tratamento dos dados preliminares, na fase de planejamento, quando não realizou um estudo profundo e detalhado dos riscos; e, por adotar um ritmo de montagem extremamente agressivo, principalmente para o pacote de trabalho de montagem do Rotor.

Em geral, para uma cadência de até 4 turbinas por semana, considerando apenas uma frente de montagem com um único guindaste principal, é bastante factível, se considerando a experiência de projetos anteriores. Acima disso, já é prudente repensar a produtividade usando uma quantidade maior de guindastes.

Tanto a equipe de planejamento quanto a equipe de execução podem ter sido excessivamente conservadores nas suas estimativas, considerando o mapeamento e a avaliação dos riscos do projeto.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho surgiu da necessidade analisar a fase de execução de projetos de montagem de turbinas eólicas, considerando o planejamento realizado segundo o PMBOK, como forma de contribuir para a prática de limites aceitáveis. A técnica aplicada consistiu, basicamente, no uso de um *software* de gerenciamento de projetos (*Microsoft Project*) para o tratamento dos dados de planejamento e de execução de um projeto de montagem de 15 turbinas eólicas apresentado neste trabalho. Posto isto, pode-se concluir que o planejamento do projeto deficiente foi o principal responsável pelos desvios. E, que o objetivo geral foi alcançado.

Os objetivos específicos deste trabalho foram atingidos na seção 3. O primeiro objetivo específico foi atingido na seção 3.2 e 3.4.2, com o detalhamento dos procedimentos de um projeto de montagem de turbinas eólicas, e a utilização de técnicas de planejamento para analisar o desempenho de execução do projeto de montagem das turbinas eólicas.

O segundo objetivo específico foi atingido na seção 3.4.2, onde foi possível construir a linha de base a partir de informações coletadas da fase de planejamento do projeto.

O terceiro objetivo específico foi atingido na seção 3.4.3 e 3.4.4, onde a partir de dados de acompanhamento de execução do projeto de montagem foi possível realizar uma análise dos resultados do trabalho.

E o quarto objetivo específico foi atingido na seção 3.5, com as recomendações, onde foram relacionadas algumas ações que poderão contribuir para reduzir o risco de desvios na execução dos projetos.

Uma sugestão para trabalhos futuros, pode ser o estudo do valor agregado no desenvolvimento de projetos de parques eólicos. Como forma de aumentar a precisão das estimativas de *CAPEX* (*capital expenditure*). O que pode contribuir, de forma relevante, no ambiente de investimento de energia eólica.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. Atlas Energia Elétrica do Brasil. Agencia Nacional de Energia Elétrica. Brasília, 2008.
- ANEEL. Acompanhamento das Centrais Geradoras Eólicas. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br>> Acesso em: 06 de dezembro de 2017.
- BUDYNAS, R. G; NISBETT, J. K. Elementos de Máquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica, 8ª edição. Mc Grau Hill, Bookman. Porto Alegre, 2011.
- BURTON, T; SHARPE, D; JENKINS, N; BOSSANYI, E. Wind Energy Handbook. John Wiley & Sons, LTD. West Sussex, 2001.
- CARVALHO, P. Geração Eólica. Imprensa Universitária. Fortaleza, 2003.
- CLEMENTS, J. P; GIDO, J. *Gestão de Projetos*. Cengage Learning. São Paulo, 2013.
- EPE. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2016 Ano Base 2015. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>> Acesso em: 27 de setembro de 2017.
- GIL, A. C. Como Elaborar Projetos de Pesquisa 4ª edição. Editora Atlas. São Paulo, 2008.
- KERZNER, H; SALADIS, F. P. O Que os Gerentes Precisam Saber Sobre Projetos. Bookman. São Paulo, 2014.
- MARCONI, M. A; LAKATOS, E. M. Técnicas de Pesquisa. Atlas. São Paulo, 2002.
- NORTON, R. L. Projeto de Máquinas. Bookman. São Paulo, 2004.
- PMBOK. Conhecimento em Gerenciamento de Projetos quarta edição. Project *Management Institute, Inc.* Pennsylvania, 2008.
- PMBOK. Conhecimento em Gerenciamento de Projetos quinta edição. Project *Management Institute, Inc.* Pennsylvania, 2013.
- REZENDE, L. C. É preciso diversificar a matriz energética no Brasil. Disponível em: <www.canalbioenergia.com.br> Acesso em: 10 de outubro de 2017.
- RIEMEL, E; Gmbh, W; D-München. MOLYKOTE. LUMOBRAS. Barueri, 1995.
- SEMACE. Tipos de Licença e Autorização / Prazos de Validade e Renovação. Disponível em: <www.semace.ce.gov.br> Acesso em: 05 de dezembro de 2017.
- SILVA, E. L., & MENEZES, E. M. Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação. UFSC. Florianópolis, 2005.

SOTILLE, M. A., MENEZES, L. C., XAVIER, L. S., & PREIRA, M. L. Gerenciamento do escopo em projetos. FVG. Rio de Janeiro, 2014.

VARGAS, V. R. *Análise do Valor Agregado*. Brasport. Rio de Janeiro, 2013.

XAVIER, C. M. S. Gerenciamento de Projetos: Como definir e controlar o escopo do projeto. Editora Saraiva. São Paulo, 2009.

YIN, R. K. Estudo de Caso: Planejamento e Métodos 2ª edição. Bookman. São Paulo, 2001.