Mauricio Vivan Guarnieri

USINAS SOLARES FOTOVOLTAICAS COM SEGUIMENTO EM UM EIXO NO BRASIL: ASPECTOS DA CONSTRUÇÃO, CUSTOS E EXPECTATIVA DE DESEMPENHO.

Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de concentração Construção Civil, da Universidade Federal de Santa Catarina.
Orientador: Prof. Ricardo Rüther, PhD.

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Guarnieri, Mauricio Vivan
USINAS SOLARES FOTOVOLTAICAS COM SEGUIMENTO EM UM EIXO NO BRASIL: ASPECTOS DA CONSTRUÇÃO, CUSTOS E EXPECTATIVA DE DESEMPENHO / Mauricio Vivan Guarnieri; orientador, Ricardo Rüther, 2017.
180 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Usinas fotovoltaicas. 3. Análise técnica-econômica. 4. Planejamento e construção. I. Rüther, Ricardo. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Mauricio Vivan Guarnieri

USINAS SOLARES FOTOVOLTAICAS COM SEGUIMENTO EM UM EIXO NO BRASIL: ASPECTOS DA CONSTRUÇÃO, CUSTOS E EXPECTATIVA DE DESEMPENHO.

Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Florianópolis, 17 de outubro de 2017.

_____

Prof. Prof. Glicério Trichês, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

_____

Prof. Ricardo Rüther, Ph.D.
Orientador

Banca examinadora:

_____

Prof. João Tavares Pinho, Ph.D.
Universidade Federal do Pará
(Videoconferência)

_____

Prof. Antônio Edésio Jungles, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

_____

Prof. Deivis Luis Marinoski, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

À minha família e meus pais José e Jane por todo carinho, dedicação e tudo o que me proporcionaram até este momento.

Ao meu orientador, Ricardo Rüther, por todo apoio e conhecimento compartilhado e por proporcionar a oportunidade de atuar no setor de energia solar e desenvolver este trabalho.

Aos colegas de trabalho, Paulo, Rodolfo, Fabrício, Caroline, Daniel, Alair, Romênia, por sua contribuição e ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores João Tavares Pinho, Deivis Luis Marinoski e principalmente Antônio Edésio Jungles, pela dedicação na leitura e contribuições no trabalho e disponibilidade em participar da banca.

A todos meus amigos e aqueles que de alguma forma contribuíram para o bom andamento deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar a construção de uma usina solar de grande porte com foco na opção de suporte dos painéis com seguimento de um eixo, a qual vem sendo largamente adotada nos primeiros empreendimentos em construção no Brasil. Estudou-se o desempenho do equipamento, instruções de montagem, escopo e cronograma aplicados à construção e análise do progresso real da montagem mecânica. Inicialmente foi realizada a comparação entre os principais tipos de estruturas de suporte utilizadas (fixa e com seguimento). Os resultados apontam em termos energéticos, para um desempenho superior da opção com seguimento (média de 18 %). Verificou-se que a posição geográfica da usina é de suma importância nesta comparação, sendo o custo da energia gerada até 6 % mais barata na região com latitude de 5°, porém atingindo níveis igualitários em latitudes maiores, considerando cenários orçamentários mais competitivos para opção fixa. O processo de montagem da estrutura de suporte com seguidor foi estudado e verificaram-se características que impactam no orçamento e dimensionamento da mão de obra, bem como no período de projeto executivo e implantação. A etapa de instalação das fundações das estruturas foi identificada como a mais importante, devido à profunda interação com o processo de engenharia em termos geológicos e topográficos e por determinar o alinhamento para as demais fases de montagem. Posteriormente foi apresentado e analisado o escopo de um projeto real de uma usina de grande porte, com destaque para as etapas construtivas de obra civil e montagem eletromecânica. A respeito do cronograma, é notório o curto período disponível, com oito meses para finalização da construção. Foi importante identificar a estruturação do cronograma baseado em áreas referenciadas à configuração da usina. Em paralelo foi proposto um modelo de planejamento das atividades de montagem mecânica através da técnica linha de balanceamento, considerou-se este um método satisfatório, o qual se adapta com as características construtivas das usinas solares e permitiu uma adequada interpretação física-temporal do plano em

termos gráficos. Em relação aos resultados obtidos em campo para montagem mecânica, foi relevante examinar a composição das equipes, o progressivo aumento de produtividade e picos alcançados, bem como os replanejamentos necessários, após paralização de algumas atividades devido à falta de material.

Palavras-chave: usinas solares fotovoltaicas; análise técnico-econômica; planejamento de obras, construção.

ABSTRACT

The objective of this work is to analyze the construction of a large solar power plant focusing on the mounting system with single axis tracking, which has been widely adopted in the first projects under construction in Brazil. It was studied the equipment performance, assembly instructions, scope and schedule applied to the construction and analysis of the real progress of the mechanical assembly. Initially a comparison was made between the main types of support structures used (fixed tilt and single-axis tracker). The results point for a higher performance of the tracker option (average of 18%) in energy terms. It was verified that the geographic position of the plant is particularly important in this comparison, being the cost of gerated energy 6% cheaper in the region with latitude of 5°, but reaching egalitarian levels in higher latitudes and considering more competitive budget scenarios for fixed tilt option. The assembling process of the tracking system was studied and were verified special characteristics that influence on the budget and sizing of work teams, as well as in the period of detailed project and implantation. The stage of installation of the foundations of the structures was identified as the most important, due to the deep interaction with the engineering process in geological and topographic terms and to determine the alignment for the other assembly phases. Subsequently, the scope of a real project of a large plant was presented and analyzed, with emphasis on the construction stages of civil works and electromechanical assembly. Regarding the schedule, the short available period stands out, with eight months to finish the construction. It was important to identify the structuring of the schedule based on areas referenced to the plant configuration. In parallel, a model for the planning of the mechanical assembly activities was proposed through the line of balance technique, which was considered a satisfactory method, which adapts with the constructive characteristics of the solar plants and allowed an adequate physical-temporal interpretation of the plane. Regarding the results obtained in the field for mechanical assembly, it was relevant to examine the composition of the teams, the progressive increase of productivity and peaks reached, as well as the necessary replanning, after some activities stopped due to lack of material

Keywords: photovoltaic solar power plants; technical-economic analysis; construction planning, construction.

Abreviaturas e siglas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BOS – Balance of system

BT – Baixa Tensão

c.a. – Corrente alternada

CAPEX – Capital expenditure

CIF – (cost, insurance and freight) “custo, seguro e frete”

c.c. – Corrente contínua

CdTe – Telureto de cádmio

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FC – Fator de capacidade

FDI – Fator de dimensionamento do inversor

GCR – Ground cover Ratio

Impp – Corrente no ponto de máxima potência

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Isc – Corrente de curto circuito

LCOE – Custo nivelado da energia

LID – Light induced degradation

m-Si – Silício monocristalino

MME – Ministério de Minas e Energia

FV – Fotovoltaica (o)

MPP – Ponto de máxima potência

MT – Média Tensão

NREL – National Renewable Energy Laboratory

O&M – Operação e Manutenção

NOS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

p-Si – Silício multicristalino

PCH – Pequena central hidrelétrica

Pitch – Distanciamento entre fileiras

PR – Taxa de desempenho do sistema

STC – Condições padrão de teste

String – Conexão de módulos fotovoltaicos associados em série

SWERA – Solar and Wind Energy Resource Assessment

TMA – Taxa Mínima de Atratividade

UFV – Usina solar fotovoltaica

Vmpp – Tensão no ponto de máxima potência

Vc.c. – Tensão em corrente contínua

Voc – Tensão de circuito aberto

Wp – Potência nominal de módulos fotovoltaicos em STC

Yield – Rendimento energético do sistema fotovoltaico

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1– Crescimento do consumo de energia elétrica no Brasil – 2009-2015(adaptado EPE, 2015) 25

Figura 2 – Evolução da Tarifa de Energia Elétrica, acumulado no ano (em %). Fonte IPCA-IBGE. Elaboração (DIEESE, 2015) 26

Figura 3 – Geração elétrica no Brasilpor tipo de geração na capacidade instalada (2011 – 2016) (BRASIL, 2017)..... 27

Figura 4 – Empreendimentos fotovoltaicos habilitados, potência agregada por munícipio/estado LER/2014, 1º LER/2015 e 2º LER 2015 (adaptado EPE 2016)..... 30

Figura 5-Capacidade fotovoltaica global instalada acumulada (FRAUNHOFER, 2017)..... 32

Figura 6 – Empreendimentos fotovoltaicos vencedores, potência agregada por munícipio/estado LER/2014, 1º LER/2015 e 2º LER 2015 (EPE 2016, adaptado)..... 33

Figura 7 - Referências internacionais de preço de energia FV (US$/MWh) (EPIA, 2016) adaptado..... 34

Figura 8– Histórico de preços nos acordos de compra de energia nos EUA. Fonte: (BOLINGER; WEAVER; ZUBOY, 2015)..... 35

Figura 9 – Resultado da habilitação técnica de empreendimentos fotovoltaicos no LER 2014, 1º LER 2015 e 2º LER 2015(EPE 2016). 37

Figura 10 - Percentual de motivos de inabilitação técnica em relação ao total de empreendimentos não habilitados. (EPE, 2016) 38

Figura 11–Principais agentes no processo de estruturação de um empreedimento solar. 40

Figura 12 – Ilustração das estruturas de suporte tipo *tracker* de eixo horizontal..... 45

Figura 13 – Potência por tipo de módulo e estrutura de suporte para projetos de usinas fotovoltaicas de grande porte no EUA. Fonte: (Adaptado BOLINGER; WEAVER; ZUBOY, 2015)..... 46

Figura 14 – Distribuição das opções utilizadas nos empreendimentos vencedores dos leilões de 2014 e 2015.....47
Figura 15 – Interação de processos de gerenciamento de projetos (fonte: PMI 2013, adaptado).....52
Figura 16 – Ilustração esquemática da linha de balanceamento (Fonte: UFSC – EVC5318) 63
Figura 17 – Localização dos sites simulados (cores iguais representam locais com latitudes semelhantes) 71
Figura 18–Planta e corte do tracker (STI, 2017 adaptado) 78
Figura 19 – Visão geral do *tracker* multifileira e seus princpais componentes. (STI, 2017 adaptado) 80
Figura 20 – Componentes do acionamento do *tracker* (STI, 2017 adaptado) 81
Figura 21 – Índice comparativo- desempenho do sistema com *tracker* sobre opção fixa.....99
Figura 22 – Visão geral do posicionamento e codificação das fundações (STI, 2017 adaptado).....108
Figura 23 – Orientação para disposição das marcas topográficas para alinhamento dos eixos (STI, 2017 adaptado). 111
Figura 24 – Esquema demarcações topográficas para instalação das hastes 112
Figura 25 - Esquemático de marcação da altura de cravação (STI, 2017).....112
Figura 26 – Ilustração do espaçador e sequência de locação com o uso da ferramenta.(STI, 2017, adaptado).....113
Figura 27 – Ilustração do processo de cravação de estacas com máquina cravadora.....115
Figura 28 – Fluxograma do processo de instalação das estacas metálica de fundação – engenharia prévia e cravação.....115
Figura 29 – Fluxograma de instalação da estrutura de acionamento e suporte 117
Figura 30 – Modelo da presilha selecionada para o projeto 118

Figura 31 – Ilustração sequência do processo de instalação dos módulos fotovoltaicos 119
Figura 32 – Fases de desenvolvimento de projeto fotovoltaico de grande porte. 121
Figura 33 – Atividades de segundo nível da fase de implantação.. 121
Figura 34 Abertura em terceiro nível – atividades das fases de construção..... 122
Figura 35 – Gráfico de barras gantt- principais atividades Usina Solar 134
Figura 36 Cronograma em barras - principais etapas do projeto – fase pré-executiva..... 135
Figura 37 – Layout do empreendimento dividido em 10 blocos de geração 137
Figura 38 – Cronograma previsto de entrega dos materiais e equipamentos principais 138
Figura 39 – Sequencia temporal prevista para montagem mecânica de uma unidade..... 139
Figura 40 – Cronograma de barras - cravação e montagem de mesas e módulos – fase pré-executiva 140
Figura 41 – Cronograma em barras –principais etapas - fase executiva..... 141
Figura 42 – Cronograma de barras -etapas de cravação e montagem de mesas e módulos – fase executiva. 142
Figura 43 - – Linhas de balanceamento montagem mecânica – 10 blocos 152
Figura 44 – Linhas de balanceamento montagem mecânica – 30 blocos 155
Figura 45 – Plano de cravação de hastes de fundação – avanço semanal previsto 156
Figura 46 – Cravação de hastes de fundação – avanço e replanejamento 157

Figura 47 – Plano de montagem das mesas – avanço semanal previsto 159
Figura 48 – Montagem das mesas – avanço e replanejamento.....160
Figura 49 – Área com a etapa de montagem das mesas concluída. 161
Figura 50 – Plano de montagem e fixação dos módulos – avanço semanal previsto 162
Figura 51 – Montagem e fixação dos módulos FV – avanço e replanejamento.....163
Figura 52 – Avanço da montagem dos módulos FV- 26/07 e 29/07 164
Figura 53 – Avanço da montagem dos módulos FV- 02/08 e 07/08 165
Figura 54 – Avanço da montagem dos módulos FV - 19/08 e 26/08 166
Figura 55 – Avanço da montagem dos módulos FV - 02/09 e 18/09 167

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Grupos de processos de gerenciamento de projetos e áreas de conhecimento (PMI, 2013), adaptado) 53
Tabela 2 – Escopo do projeto – definição dos processos e objetivos (PMI, 2013 adaptado)..... 57
Tabela 3 – Tempo do projeto – definição dos processos e objetivos (PMI, 2013 adaptado)..... 59
Tabela 4 – Custo do projeto – definição dos processos e objetivos (PMI, 2013 adaptado)..... 60
Tabela 5 – Parâmetro, formulas e definições da técnica linha de balanceamento..... 64
Tabela 6 - Estatísticas descritivas e ranking dos fatores que impactam a produtividade no local no Reino Unido (Shamil George Naoum (2016), adaptado) 66
Tabela 7 – Dados de localização dos locais simulados 70
Tabela 8 – Dados principais dos módulos FV simulados..... 72
Tabela 9 – Dados principais da configuração adotada nos sistemas 72
Tabela 10 – Características principais dos conjuntos de suporte adotado 73
Tabela 11 - Dimensões dos seguidores (*trackers)*..... 79
Tabela 12 – Desvio máximo do perfil de suporte – Direção L-O 85
Tabela 13 – Desvio Máximo do Perfil de Suporte – Direção N-S ... 86
Tabela 14- Etapas da implantação da montagem mecânica 91
Tabela 15 – Locais simulados- Dados de localização e recurso solar 94
Tabela 16 - Resultados energéticos – Sistemas com Estrutura Fixa - Produção (MWh/ano) Yield (MWh/MWp) e PR..... 95
Tabela 17 - Resultados energéticos – Sistemas com *Tracker* - Prod. (MWh/ano) Yield (MWh/MWp) e PR..... 96

Tabela 18 - Índices comparativos entre tecnologias com mesma estrutura de suporte.....97
Tabela 19 - Índices relativos de desempenho do sistema tracker sobre o fixo – geração e performance.....98
Tabela 20 – Resultados médios entre tecnologias e latitudes.....99
Tabela 21 – Preços relativos para cada item do orçamento divididos em cenários A, B e C.....101
Tabela 22 – Capex relativo (R$/Wp)- Variação TIPO 1 (módulos FV).....102
Tabela 23 – LCOE – Comparação *tracker* x fixo - Variação TIPO 1 (módulos FV).....103
Tabela 24 – Índices percentuais – LCOE *tracker*/Fixo - Variação TIPO 1 (módulos FV).....104
Tabela 25 - Capex relativo - Variação TIPO 2 (BOS).....105
Tabela 26 - LCOE – Comparação *tracker* x fixo - Variação TIPO 2 (BOS).....106
Tabela 27 - Indices percentuais – LCOE *tracker*/Fixo - Variação TIPO 2 (BOS).....106
Tabela 28 – Distribuição alternativa de atividades de construção..122
Tabela 29 –Características dos módulos previstos no projeto e quantidades.....124
Tabela 30 – Tipo e quantidades de *tracker*s aplicados no empreendimento em questão.....126
Tabela 31 – Dados principais da UFV.....126
Tabela 32 – Riscos previstos e impactos associados.....128
Tabela 33 – Marcos contratuais do projeto.....129
Tabela 34 – Etapas de construção – segundo nível de atividades..130
Tabela 35 – Cronograma geral de atividades – linha base.....134
Tabela 36 – Características das atividades de montagem – plano pré-executivo.....143

Tabela 37 – Características das atividades de montagem – plano executivo 144
Tabela 38 – Plano de cravação regiões com impenetrável. 145
Tabela 39 – Produtividade atividades de montagem – plano pré-executivo 146
Tabela 40 – Produtividade atividades de montagem – plano executivo 147
Tabela 41 - Divisão do tipo de tracker por bloco na usina em estudo 148
Tabela 42 – Números de hastes, mesas e módulos – divisão em 10 ou 30 blocos 149
Tabela 43 – Atividades com número de unidades e produtividade prevista 149
Tabela 44 – Dados de entrada- cenário10 blocos 150
Tabela 45 - Dimensionamento das equipes -cenário 10 blocos 150
Tabela 46 - Dados de entrada - cenário 30 blocos 153
Tabela 47 – Dimensionamento das equipes - cenário 30 blocos 154
Tabela 48 – Composição das equipes envolvidas no processo de cravação de hastes 158
Tabela 49 - Composição das equipes envolvidas no processo de montagem das mesas 161

CONTEÚDO

1 INTRODUÇÃO 21
1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO ESTUDO PROPOSTO 21
1.2 OBJETIVOS 23
1.2.1 GERAL 23
1.2.2 ESPECÍFICOS 23
2 REFERENCIAL TEÓRICO 24
2.1 CENÁRIO DO SISTEMA DE GERAÇÃO ELÉTRICA BRASILEIRO 24
2.1 POTENCIAL SOLAR NO BRASIL 29
2.3 PANORAMA DO MERCADO FV MUNDIAL E BRASILEIRO 31
2.4 LEGISLAÇÕES PARA GERAÇÃO SOLAR NO BRASIL 35
2.4.1 LEILÕES DE ENERGIA 35
2.4.2 CADASTRAMENTO E HABILITAÇÃO TÉCNICA 36
2.4.3 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL 39
2.5 USINAS FOTOVOLTAICAS CENTRALIZADAS 40
2.5.1 PROCESSO DE ESTRUTURAÇÃO DO EMPREENDIMENTO . 40
2.5.2 COMPONENTES PRINCIPAIS 42
2.5.3 SOLUÇÕES TÉCNICAS COMERCIALMENTE DISPONÍVEIS 46
2.5.4 ETAPAS DA OBRA DE UMA UFV 48
2.5.5 DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS 49
2.6 PLANEJAMENTO DA CONSTRUÇÃO DE UM REENDIMENTO ... 50
2.6.1 ESCOPO DO PROJETO 56
2.6.2 TEMPO DO PROJETO 58

2.6.3 CUSTO DO PROJETO, CONTROLE DA QUALIDADE E RISCOS. 60

2.6.4 TÉCNICAS DE PLANEJAMENTO DE CONSTRUÇÃO..... 61

2.6.5 PRODUTIVIDADE NA CONSTRUÇÃO..... 65

3. METODOLOGIA..... 68

3.1 ANÁLISE DE ALTERNATIVAS DE SUPORTE DOS PAINÉIS EM UMA UFV 69

3.1.1 DADOS AMBIENTAIS E SIMULAÇÃO DE GERAÇÃO DE ENERGIA 69

3.1.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS CONSIDERADOS 71

3.1.3 CONFIGURAÇÃO ELÉTRICA PADRÃO DOS SISTEMAS..... 72

3.1.4 ESTRUTURAS DE SUPORTE E LAYOUTS 72

3.1.5 ANÁLISE DE CUSTO BENEFÍCIO DO USO DA OPÇÃO COM *TRACKER* 74

3.2 FLUXOGRAMA DE TRABALHO DA ETAPA DE MONTAGEM MECÂNICA..... 77

3.2.1 DESCRIÇÃO TÉCNICA DO *TRACKER* CONSIDERADO..... 77

3.2.2 CONDIÇÕES E TOLERÂNCIAS DE INSTALAÇÃO 82

3.3 PLANO DE CONSTRUÇÃO DE UMA UFV DE GRANDE PORTE.. 87

3.3.1 ESCOPO DO PROJETO..... 88

3.3.2 CRONOGRAMA DO PROJETO 89

3.4 ACOMPANHAMENTO DO PLANO E ANALISE DE FATORES DE INTERFERÊNCIA NA ETAPA DE MONTAGEM MECÂNICA 91

4 RESULTADOS 93

4.1 COMPARAÇÃO DO SISTEMA DE SUPORTE FIXO E *TRACKER* .. 93

4.1.1 GERAÇÃO DE ENERGIA E DESEMPENHO 94

4.1.2 ANÁLISE ECONÔMICA 99

4.2 FLUXOGRAMA DE TRABALHO DA ETAPA DE MONTAGEM MECÂNICA 107

4.2.1 INSTALAÇÃO DA FUNDAÇÃO 107

4.2.2 INSTALAÇÃO DAESTRUTURA DE ACIONAMENTO E SUPORTE (MESAS) 115

4.2.3 INSTALAÇÃO DOS MÓDULOS FV E FIXADORES 117

4.3 PLANO DE CONSTRUÇÃO DE UMA UFV DE GRANDE PORTE 120

4.3.1 Escopo do projeto 120

4.3.2 CRONOGRAMA DO PROJETO 133

4.4 ACOMPANHAMENTO DO PLANO E ANÁLISE DE FATORES DE INTERFERÊNCIA 156

4.4.1 Cravação das hastes de fundação 156

4.4.2. MONTAGEM DAS MESAS DE SUPORTE 158

4.4.3 MONTAGEM E FIXAÇÃO DOS MÓDULOS FV 162

5 CONCLUSÕES 168

6 RECOMENDAÇÃO DE TRABALHOS FUTUROS 172

REFERÊNCIAS 173

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO ESTUDO PROPOSTO

O estudo e avaliação de novas alternativas de geração elétrica beneficia o sistema interligado de energia brasileiro, o qual deve desenvolver-se com diversidade de fontes. O incremento contínuo de restrições ambientais de outras fontes, como hidrelétricas, térmicas e nucleares, é um fator que contribui para o estabelecimento da energia solar como fonte de eletricidade, a qual se posiciona como grande alternativa do setor elétrico brasileiro, principalmente em função da intensa redução de custos experimentada por esta tecnologia na última década.

De 2000 a 2016 a potência instalada mundial foi multiplicada por mais de 200 vezes, crescendo a uma taxa média de mais de 40% ao ano. A tecnologia fotovoltaica sustenta, depois de hidrelétricas e energia eólica, a terceira mais importante fonte de energia renovável em termos de capacidade instalada a nível mundial. (EPIA, 2016).

Em abril de 2012 a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a resolução normativa nº 482/2012, que regularizou a micro e minigeração distribuída no Brasil, impulsionando o mercado fotovoltaico em especial. Esta medida contemplou o que se chama de geração distribuída (GD).Em outubro de 2014 aconteceu o primeiro leilão promovido pelo Ministério de Minas e Energia (MME) para contratação de energia proveniente de empreendimentos fotovoltaicos no Ambiente de Contratação Regulada – ACR. Foram 400 projetos cadastrados no Leilão de Energia de Reserva (LER) de 2014, somando 10.790 MW de potência instalada. Deste total, 17% não foram habilitados tecnicamente, restando 8.871 MW, dos quais 889,7MW foram contratados, representando cerca de 10% dos concorrentes. Este marco efetivamente inseriu a modalidade fotovoltaica na matriz energética brasileira, sinalizando a necessidade do avanço técnico no setor, principalmente focado nos projetos de grande porte como os vencedores do LER 2014. Em 2015 aconteceram mais dois leilões de reserva, em agosto e novembro, totalizando nos três leilões mais de 3,3 mil MWp em projetos negociados (EPE, 2016).

Esses empreendimentos caracterizaram-se por apresentar predominantemente potência mínima de 30 MW, e em alguns casos formando complexos com até 400 MW de potência instalada, em terrenos de centenas de hectares de área. Serão realizados grandes investimentos concentrados em um cronograma reduzido em comparação a outras obras de geração de energia. As centrais fotovoltaicas representam uma modalidade recente para geração de eletricidade no Brasil; com tendência contínua de quedas dos custos, o número de instalações vem crescendo, consolidando o protagonismo desta modalidade na expansão da matriz energética nacional. Porém, a pesquisa de métodos para tornar os custos dos sistemas fotovoltaicos mais competitivos, sem subsídios federais, como as fontes de energia convencionais, vai ajudar a promover a sua aplicação. Em particular, o chamado "*balance of system"* (BOS), que são os custos associados com a instalação de sistemas fotovoltaicos, é uma parcela onde pode haver redução. Custos com BOS referem-se a todos os custos associados ao sistema, exceto com os módulos fotovoltaicos e inversores e incluem: estruturas de suporte, cabeamento, custos administrativos e contratuais, licenciamento, conexão, logística e mão de obra de instalação.

Em relação à construção das usinas, um item com relevante importância diz respeito às estruturas de suporte dos módulos fotovoltaicos. Este elemento, além do seu custo de fornecimento, que pode variar de acordo com as dimensões adotadas e principalmente de acordo com o tipo de estrutura, seja ela fixa ou com seguimento, tem impacto significativo em outros componentes e etapas da obra, como preparação do terreno e dimensionamento das fundações, bem como instruções de montagem e cronograma de obra.

Primeiramente o objetivo deste trabalho é avaliar e comparar a atratividade entre o uso de estrutura do tipo fixa e com seguimento em diferentes locais do Brasil e posteriormente introduzir maiores informações a respeito de uma obra com uso da estrutura com seguimento, a qual vem sendo largamente adotada nos primeiros empreendimentos em construção no Brasil. É apresentado um fluxograma de montagem desses equipamentos, mostrando as peculiaridades técnicas e de montagem. Na sequencia é apresentado o escopo relacionado à etapa construtiva de uma usina solar de grande porte com base em um caso prático de instalação, apresentando exemplos de estruturação de cronogramas de uma obra desta natureza. Nesta etapa, com foco na etapa de montagem mecânica, referente à

instalação da estrutura de suporte, é proposto um método de dimensionamento de equipes e cronograma de montagem através das suas principais etapas. Por fim são expostos resultados reais de desempenhos das etapas de montagem mecânica com base nos progressos obtidos até o momento da pesquisa, apresentando as equipes utilizadas e produtividades atingidas, bem como realizando análise de fatores de interferência no desempenho da construção.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 GERAL

Avaliar procedimentos de montagem e analisar plano de construção da etapa de montagem mecânica com base em um caso prático de instalação de uma usina solar fotovoltaica (UFV) com uso de estrutura de suporte com seguimento da trajetória aparente do sol (mais conhecido pelo termo em inglês *solar tracker*).

1.2.2 ESPECÍFICOS

- Comparar opções de suporte dos painéis fotovoltaicos do tipo fixo e com seguidor (*tracker*) com mono eixo horizontal para diferentes locais no Brasil;

- Elaborar fluxograma de trabalho da etapa de montagem mecânica de uma usina solar fotovoltaica com *tracker* de um eixo;

- Avaliar o plano geral de construção de uma usina solar fotovoltaica com tracker de um eixo com detalhamento da etapa de montagem mecânica;

- Acompanhar os resultados da etapa de montagem mecânica de uma usina solar fotovoltaica com tracker de um eixo e analisar fatores que influenciam o resultado do plano.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CENÁRIO DO SISTEMA DE GERAÇÃO ELÉTRICA BRASILEIRO

Anualmente, o consumo de energia elétrica no Brasil cresce mais que o PIB do país. Em 2013 o crescimento do consumo de eletricidade foi de 3,6% e em 2014 de 2,2%; já em 2015 e 2016 houve uma retração de 2,1% e 0,9% em relação ao ano anterior. (EPE, 2016) O Produto Interno Bruto, neste mesmo período teve variação de 2,3, 0,4% e -3,8% e -3,6%, respectivamente (IBGE, 2016). Esse tipo de comportamento é esperado em um país emergente, onde há tendência de aumento per capita do consumo, devido à gradual melhora da qualidade de vida da população.

A taxa reduzida de crescimento econômico reflete principalmente no consumo industrial, o qual, em 2014 e 2015superou as piores expectativas, alcançando as taxas negativas de 3,6 % e 5,3%respectivamente.O segmento de comércio e serviços apresentou aumento no consumo de energia em 2014; o crescimento foi de pelo menos 6%, seguido de apenas 0,6% em 2015. Já o segmento residencial mostrou-se ainda capaz de sustentar em 2014 o crescimento de 5,7%, porém registrou decréscimo de 0,7% em 2015. (EPE, 2015).

Na Figura 1 está ilustrado o comportamento do crescimento do consumo de energia elétrica no Brasil nos últimos anos

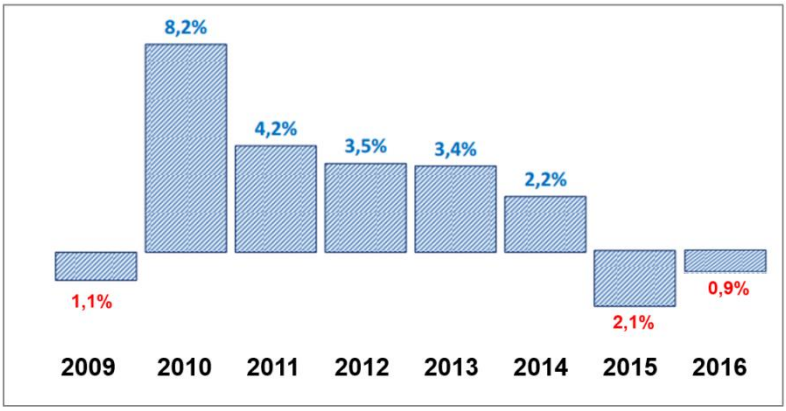


Figura 1– Crescimento do consumo de energia elétrica no Brasil – 2009-2015(adaptado EPE, 2015)

Em 2014 o Tribunal de Contas da União (TCU) apontou indicativos de que a capacidade de geração de energia elétrica no Brasil é insuficiente, o que pode levar a problemas para atender à demanda dos consumidores no futuro. Algumas causas que podem ser citadas para o problema são a superavaliação da garantia física das usinas, a indisponibilidade de parte do parque termelétrico e o atraso na entrega de obras de geração e transmissão de energia; a redução de receita das geradoras de energia devido à Medida Provisória MP 615 /2013 que mudou regras de concessões também foi citada. (TCU, 2014)

Na Figura 2 é ilustrada a evolução da tarifa de energia elétrica entre março de 2013 e junho de 2015, período que marcou eventos históricos no setor. Diferentes fatores influenciaram a variação das tarifas de energia elétrica nesse período. As variações na tarifa final de eletricidade derivaram principalmente de alterações nos custos relacionados à compra e transmissão de energia e aos encargos setoriais.

Em 2013, as tarifas foram reduzidas em 16% devido à renovação antecipada das concessões de geração e transmissão e da diminuição de alguns encargos setoriais.(DIEESE, 2015) A medida deu estímulo à competitividade industrial e auxiliou no controle da inflação; no entanto, provocou forte ajuste de custos no setor e redução de milhares de postos de trabalho.

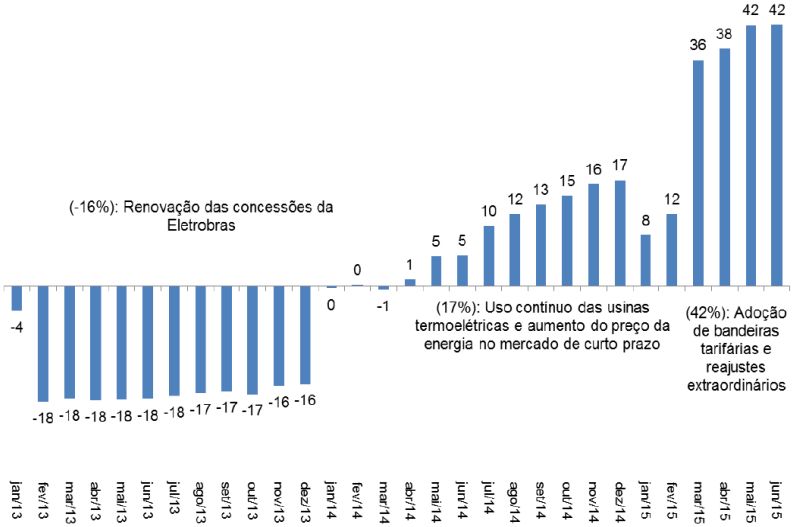


Figura 2 – Evolução da Tarifa de Energia Elétrica, acumulado no ano (em %). Fonte IPCA-IBGE. Elaboração (DIEESE, 2015)

A crise hídrica em conjunto com o modelo de comercialização de energia operaram no sentido contrário em 2014, resultando em aumento de 17% das tarifas (DIEESE, 2015). A restrição na geração hidrelétrica colocou em operação outras fontes mais caras, normalmente já contratadas pelas distribuidoras a título de disponibilidade, adicionando-se assim um custo significativo de operação. A maior parte dos aumentos averiguados em 2015 foi devido à antecipação de custos já incorridos pelas distribuidoras, posteriormente repassados para o consumidor final. No caso das bandeiras tarifárias, que eram transferidas uma vez por ano, passou a ser mensal, numa perspectiva de que esta sinalização pudesse nortear um consumo mais prudente, de acordo com a variação do preço da geração.

A chamada reserva estratégica (capacidade máxima de todos os reservatórios dividida pela carga total mensal) que em termos gerais significa quantos meses seria possível manter a geração de hidreletricidade caso os rios que abastecem os reservatórios secassem, decresceu de forma intensificada a partir de 2012. Mesmo com o acionamento massivo das usinas térmicas, a reserva estratégica não se regularizou, atingindo índice abaixo de 1mês no início de 2015. Apenas

após a queda histórica de consumo em 2015, obteve-se um relativo aumento, iniciando 2016 com a reserva equivalente a 2,8 meses.(Instituto Ilumina, 2016)

Hoje o aproveitamento do potencial hidrelétrico remanescente é cada vez mais complexo, e menor é a possibilidade de construção de reservatórios capazes de aumentar a regularização do sistema. Apesar da tendência de aumento da participação de outras fontes renováveis na matriz, como a eólica e a solar, em razão do seu caráter intermitente, o aumento da geração térmica torna-se necessário para garantir a segurança do sistema. (PDE, 2014).Constata-se uma clara tendência de queda da participação da fonte hídrica na matriz brasileira e um aumento da geração térmica convencional (Óleo Diesel / Comb., Gás Natural e Carvão). Segundo relatórios do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), enquanto a participação das hidrelétricas recuou de 81,8% para 65%, de 2011 a 2015, a produção das térmicas convencionais e a gás natural de 8,4% para 23% no mesmo período, alcançando índices históricos. Hoje o Brasil possui no total 4.508 empreendimentos em operação, totalizando cerca de 160 GW de potência instalada, com a divisão apresentada na Figura 3.

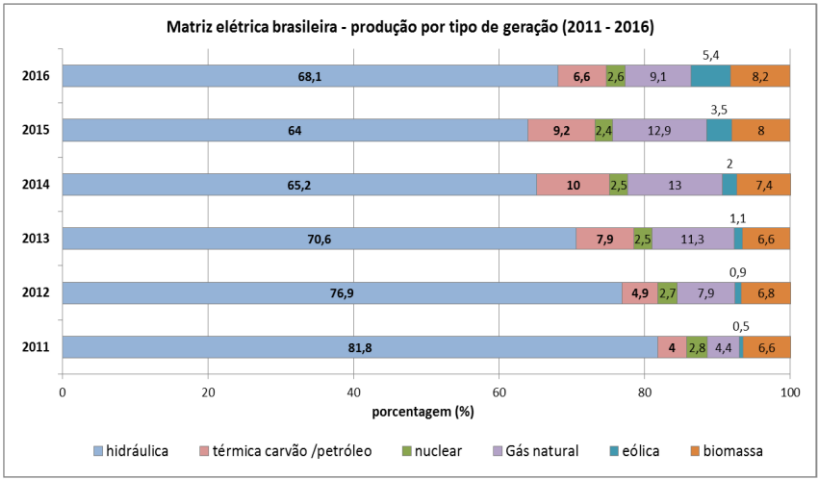


Figura 3 – Geração elétrica no Brasilpor tipo de geração na capacidade instalada (2011 – 2016) (BRASIL, 2017)

Está prevista para os próximos anos uma adição de 24.055 MW na capacidade de geração do país, proveniente dos 255 empreendimentos atualmente em construção e mais 572 em empreendimentos com construção não iniciada. (ANEEL, 2017). Considerando o plano decenal de expansão de energia 2016, está prevista a adição de mais 58,6 GW nos próximos 10 anos. Neste cenário, os projetos de centrais eólicas e fotovoltaicas adquirem papéis de destaque no panorama energético nacional, em especial porque estão geralmente associados a impactos socioambientais menos significativos se confrontados com os de outras fontes convencionais. Hoje a fonte eólica corresponde a 7,3 % da potência instalada e dentre os empreendimentos em construção lidera com 30 %. Dentre empreendimentos em construção, a modalidade fotovoltaica já representa hoje mais de 9% em termos de potência outorgada. (ANEEL, 2017). Pela característica não despachável, essas usinas podem atuar na redução significativa de carga e indiretamente reservar energia em forma de volume de água economizado nos reservatórios. Em períodos secos a geração de energia solar, em especial, pode intensificar a economia de água.

Considerando o valor acumulado no período 2016-2026, a expansão da geração requer investimentos totais da ordem de R$ 174 bilhões. Em 2026 a expectativa é que o conjunto de fontes renováveis formado pelas PCH, biomassa, eólica e solar, representem 30 % em termos de potência instalada com expansão conjunto de cerca de 30 GW. A solar fotovoltaica, a partir da potência atualmente instalada, teria sua capacidade multiplicada por 40. (MME/EPE, 2017)

2.1 POTENCIAL SOLAR NO BRASIL

Os índices de irradiação solar incidente no Brasil foram mapeados pelo projeto SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment) que permitiua elaboração da primeira edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar em 2006 considerando uma série histórica de 10 anos.Em 2017 o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), lançou uma versão atualizadaque apresenta dados de irradiação na superfície terrestre, obtidos a partir do tratamento, via modelo matemático deuma série histórica de 17 anos (1999 a 2015) de dados e imagens de satélite geoestacionário, posteriormente validados por dados coletados em estações de superfície. A resolução dos dados é de 3 km x 5km, os valores de irradiação apresentam estimativas do total diário de irradiação solar (BRASIL, 2017).

A média anual do total diário dairradiância solar global horizontal (kWh/m²/dia) para o territóriobrasileiro é uma das maiores do planeta.NaFigura 4 são indicados os empreendimentos fotovoltaicos habilitados tecnicamente na EPE até o fim de 2015, destacando a potência agregada por munícipio/estado. Observa-se a predominancia dos projetos em locais de altos índices de irradição, somando, segundo a EPE,15,9 GWp em potência. O estado da Bahia lidera com 28%, Piaui e Rio Grande do Norte aparecem com cerca de 15% e, na sequência, Pernambuco, São Paulo e Minas Gerais com 10% cada, representando quase 90% dos projetos em termos de potência habilitada.

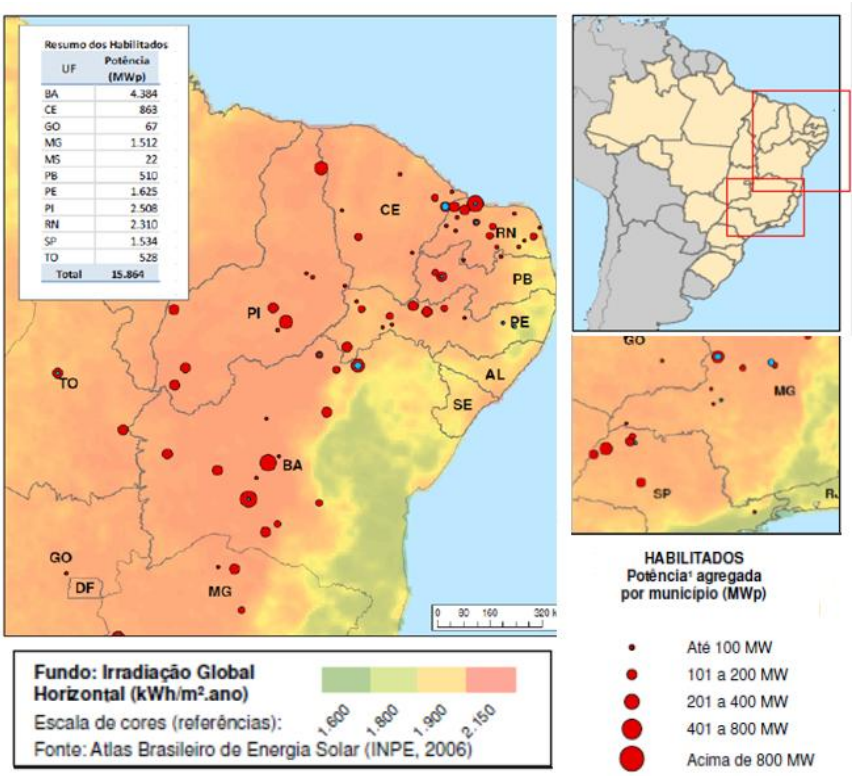


Figura 4 – Empreendimentos fotovoltaicos habilitados, potência agregada por munícipio/estado LER/2014, 1º LER/2015 e 2º LER 2015 (adaptado EPE 2016).

Para o credenciamento técnico dos projetos junto à EPE é necessário a entrega de um relatório que certifica os valores anuais de irradiação global horizontal (GHI) assinado por empresas certificadoras. Dentre os empreendimentos vencedores no LER/2014, por exemplo, os níveis apresentados ficaram contidos no intervalo entre 1.924 e 2.200 kWh/m².ano. Em relação ao Atlas Brasileiro de Energia Solar (INPE, 2006), os desvios percentuais observados ficaram entre -3,2% a +4,9%. (EPE, 2014).

A capacidade instalada atual da tecnologia fotovoltaica ainda é reduzida, com 236MW de potência. (ANEEL, 2017) A expectativa, porém, é de crescimento de sua participação, estando em construção em termos de potência mais de 1 GW (ANEEL, 2017). Estima-se que a capacidade fotovoltaica instalada chegue a 8.300 MW em 2024, sendo 7.000 MW de geração centralizada e 1.300 MW de distribuída; a expansão proveniente da fonte solar prevista nesse plano é superior à de fontes consolidadas como a biomassa e as PCHs, adquirindo um importante papel na matriz elétrica brasileira nesse horizonte decenal. (PDE, 2024)

Por outro lado, à semelhança da energia eólica, a inserção da tecnologia solar fotovoltaica na economia nacional tende a gerar novas oportunidades de emprego nos setores industriais e de serviços. Também há a possibilidade de arrendamento de terras para a instalação dos novos parques solares por parte dos pequenos agricultores, prática que pode ser importante para a economia no sertão nordestino.

2.3 PANORAMA DO MERCADO FV MUNDIAL E BRASILEIRO

Relatórios de mercado revelam que o setor solar global ultrapassou uma capacidade acumulada de cerca de 300 Gigawatt (GW) em 2016, multiplicando a capacidade acumulada por um fator de 300 em apenas 17anos de desenvolvimento. Na Figura 5 segue gráfico que ilustra o formato exponencial de crescimento do mercado entre 2008 e 2016.

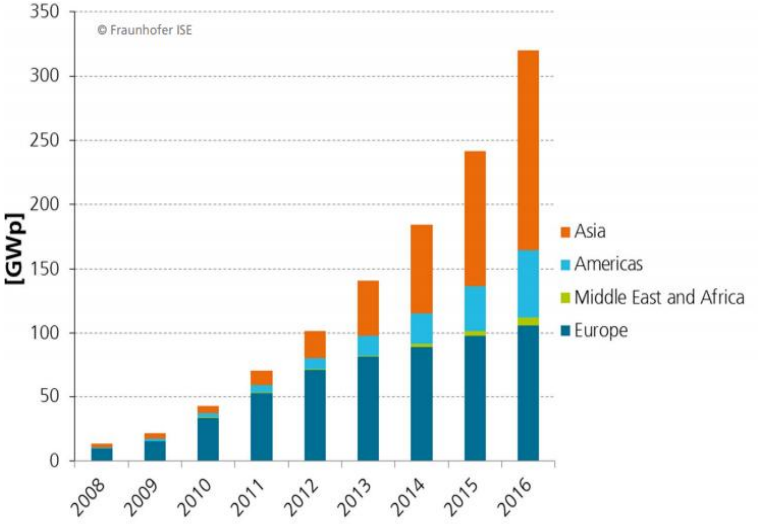
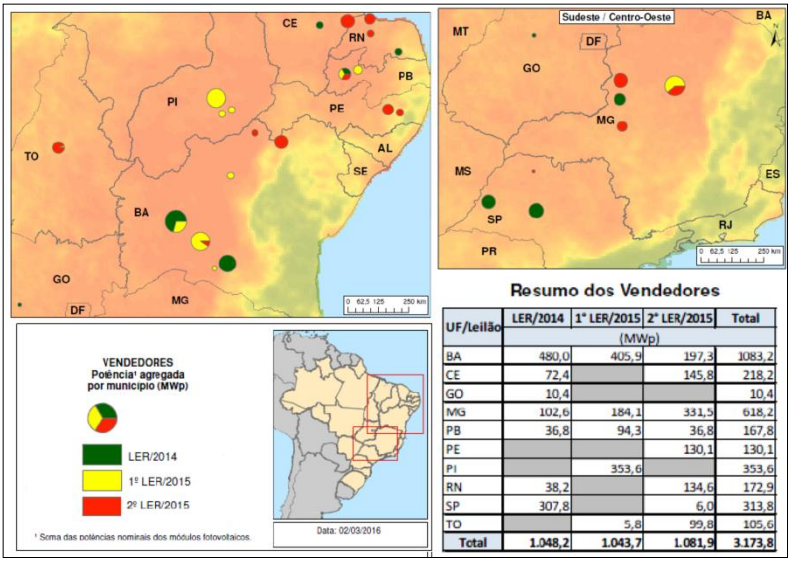


Figura 5-Capacidade fotovoltaica global instalada acumulada (FRAUNHOFER, 2017).

Foi estabelecido um novo recorde para o setor de energia solar fotovoltaica com cerca de 70 GWp instalados em todo o mundo em 2016, acima dos 50 GW em 2015. Europa, China eAmérica do Norterepresentam respectivamente os três principais mercados em termos de potência total instalada até o final de 2016. A Europa, ainda líder em potência acumulada,reduziu sua participação de 40 para 30%, já a China expandiu de 21 para 26 %, mais recentemente instalando 24,4 GWp apenas no primeiro semestre de 2017.(PV MAGAZINE, 2017).

No Brasil, de acordo com a EPE ea Câmara deComercialização de Energia Elétrica – CCEE foram contratados 202,1, 231,5 e 245,3MWmed de energia, provenientes de mais de 100 empreendimentos, no LER/2014, 1º LER/2015 e 2º LER/2015, respectivamente. Um resumo do quantitativo de empreendimentos vencedores do leilão, agregados por estado, é apresentado na Figura 6.



Resumo dos Vendedores

UF/Leilão	LER/2014	1° LER/2015	2° LER/2015	Total
	(MWp)			
BA	480,0	405,9	197,3	1083,2
CE	72,4		145,8	218,2
GO	10,4			10,4
MG	102,6	184,1	331,5	618,2
PB	36,8	94,3	36,8	167,8
PE			130,1	130,1
PI		353,6		353,6
RN	38,2		134,6	172,9
SP	307,8		6,0	313,8
TO		5,8	99,8	105,6
Total	**1.048,2**	**1.043,7**	**1.081,9**	**3.173,8**

Figura 6 – Empreendimentos fotovoltaicos vencedores, potência agregada por munícipio/estado LER/2014, 1º LER/2015 e 2º LER 2015 (EPE 2016, adaptado).

Segundo o PDE 2023, a instalação dos parques solares era prevista para as regiões Nordeste, com 80% e Sudeste, com 20%. Considerando o resultado dos três leilões solares já realizados, verifica-se que em termos de potência instalada 67% dos projetos vencedores estão no Nordeste, 29% na região Sudeste e 4% na região centro-oeste. Em relação à geração de energia esperada, a região nordeste aumenta sua participação, pois na média os projetos apresentaram fator de capacidade 10% superior daqueles da região sudeste, por exemplo.

O preço médio de venda da energia fotovoltaica foi de 215,12, 301,79 e 297,75 R$/MWh, nos 3 leilões realizados, respectivamente. Em comparação com diversas referências mundiais recentes, mostradas na Figura 7, é possível inferir que o preço de venda de energia solar fotovoltaica no Brasil se encontra em patamar intermediário frente a outros locais no mundo. Considerando a cotação média do mês da

realização dos certames (10/14, 08/15 e 11/15) os valores foram de 88, 86 e 79 US$ /MWh.(EPE, 2016).

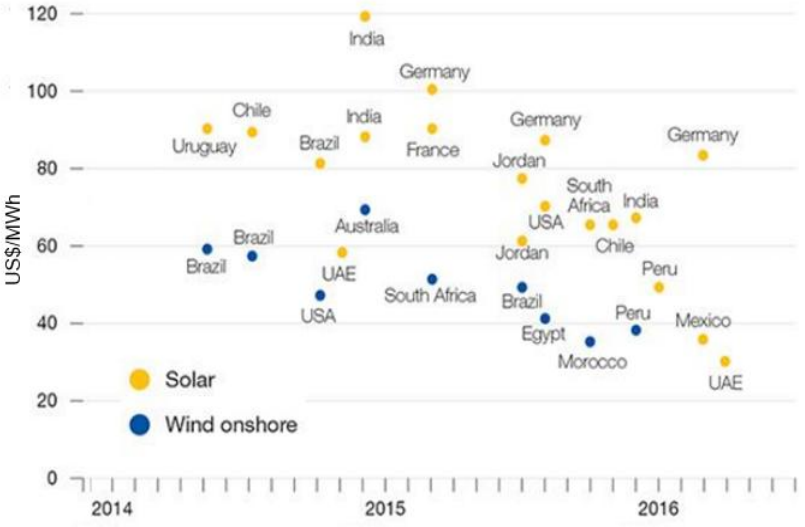


Figura 7 - Referências internacionais de preço de energia FV (US$/MWh) (EPIA, 2016) adaptado.

Os valores praticados nos contratos de compra de energia (PPA) em projetos solares fotovoltaicos de grande porte nos Estados Unidos caíram vertiginosamente ao longo dos últimos anos (Figura 8), com alguns contratos assinados recentemente com valores médios em torno de US $ 50 / MWh. Desde 2007 este setor tem tido o mais rápido crescimento dentre as modalidades FV e desde 2012 é responsável pela maior parcela do mercado em termos de potência instalada. (BOLINGER; WEAVER; ZUBOY, 2015).

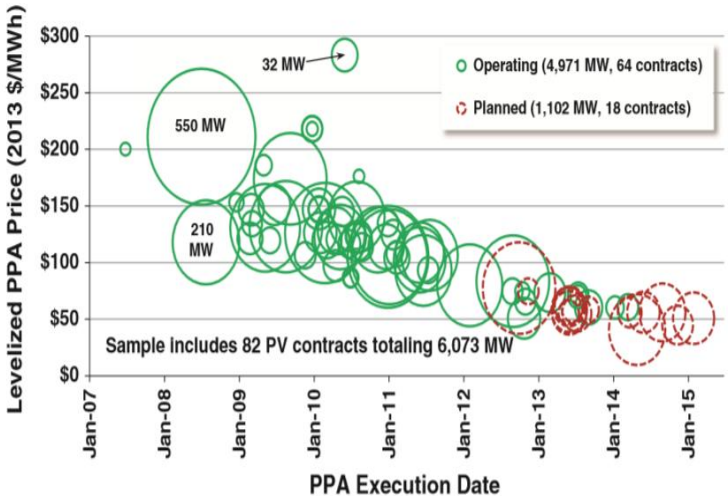


Figura 8– Histórico de preços nos acordos de compra de energia nos EUA. Fonte: (BOLINGER; WEAVER; ZUBOY, 2015).

2.4 LEGISLAÇÕES PARA GERAÇÃO SOLAR NO BRASIL

2.4.1 LEILÕES DE ENERGIA

O objeto de um leilão de energia é a contratação de Energia de Reserva originário de empreendimentos de geração destinada ao Sistema Interligado Nacional (SIN), no Ambiente de Contratação Regulada (ACR), para início de suprimento de energia elétrica em data determinada. A energia elétrica é objeto de Contrato de Energia de Reserva (CER), normalmente na modalidade "quantidade de energia", com prazo de suprimento de 20 (vinte) anos.

Em outubro de 2014 ocorreu o primeiro leilão exclusivo para empreendimentos solares: definidos como central de geração de energia elétrica a partir de fonte solar fotovoltaica, não foi considerada a modalidade solar heliotérmica. O leilão foi realizado em duas etapas subsequentes:

Etapa Uniforme: período no qual as participantes podem, a cada rodada, submeter lances, para o produto em negociação, associados ao preço de lance da rodada;

Etapa Discriminatória: fase iniciada após a etapa uniforme, onde há oferta de apenas um lance, para o produto em negociação, com preço associado à quantidade de lotes classificada na etapa anterior.

Os seguintes marcos de construção da usina fotovoltaica devem ser declarados no período de cadastro técnico do empreendimento no leilão de energia:

- Obtenção da Licença Ambiental de Instalação – LI
- Início das obras civis das estruturas
- Início da montagem dos painéis fotovoltaicos
- Início das obras da subestação e/ou da linha de transmissão de interesse restrito
- Início da operação em teste (inserir uma linha para cada unidade geradora)
- Início da operação comercial (inserir uma linha para cada unidade geradora)

2.4.2 CADASTRAMENTO E HABILITAÇÃO TÉCNICA

O cadastramento e habilitação técnica dos projetos são realizados pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE de acordo com as diretrizes do MME, bem como a Portaria MME nº 21, de 18 de janeiro de 2008e as "Instruções para Solicitação de Cadastramento e Habilitação Técnica com vistas à participação nos Leilões de Energia Elétrica", publicadas pela EPE.

O processo de análise e habilitação técnica abrange diversos aspectos do projeto e documentação recebida pela EPE no ato do cadastramento, com o objetivo de selecionar aqueles que demonstram, essencialmente, sua viabilidade técnica e capacidade de entregar o montante de energia a ser contratado nos prazos contratuais. A EPE habilitou tecnicamente 83%, 89 % e 76%dos empreendimentos fotovoltaicos cadastrados, nos três leilões solares já realizados, LER2014, 1º LER 2015 e 2º LER 2015, respectivamente, conforme é ilustrado na Figura 9.

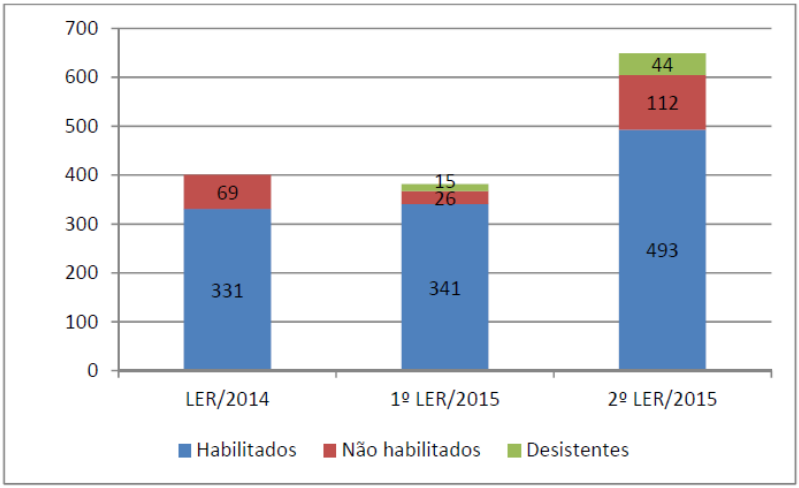


Figura 9 – Resultado da habilitação técnica de empreendimentos fotovoltaicos no LER 2014, 1º LER 2015 e 2º LER 2015(EPE 2016).

O gráfico ilustrado na Figura 10 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**indica os principais motivos da inabilitação técnica do empreendimento cadastrados. O principal motivo de inabilitação de empreendimentos do 2º LER/2015 está associado a não apresentação de Parecer de Acesso válido e à insuficiência de capacidade sistêmica de conexão. Em contrapartida os demais motivos, como questões de projeto e licença ambiental apresentaram queda significativa, apontando uma tendência de maturidade técnica, o que pode representar maior confiança do mercado na fonte fotovoltaica.

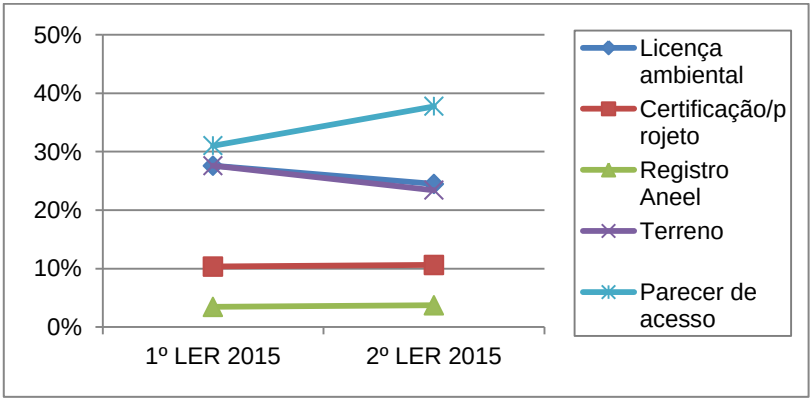


Figura 10 - Percentual de motivos de inabilitação técnica em relação ao total de empreendimentos não habilitados. (EPE, 2016)

Conforme as Instruções da EPE, a potência instalada de um empreendimento fotovoltaico é o somatório das potências elétricas ativas nominais das unidades geradoras da usina. A EPE definiu como Unidade Geradora de uma Central Geradora Fotovoltaica o arranjo de módulos fotovoltaicos associados a um equipamento condicionador de potência – inversor ou conversor –, de modo que o número de unidades geradoras da central seja igual ao número de condicionadores de potência que nela operarão. Considerando que cada unidade geradora é formada por um conjunto de módulos fotovoltaicos conectados a um inversor, a potência instalada dessa unidade é o menor valor, em MW, entre a potência CA do inversor e a soma das potências c.c. dos módulos fotovoltaicos associados. (EPE 2014).

Ressalta-se que parte dos projetos cadastrados e vencedores faz uso de controle de potência dos inversores, restringindo sua capacidade máxima, geralmente com o objetivo de limitar a potência total do empreendimento a 30MW. Portanto, a potência CA de uma usina corresponde à soma das potências de todos seus inversores, já considerando essa limitação.

Um importante quesito para habilitação técnica de um empreendimento de geração renovável é confirmação da disponibilidade do recurso no local do empreendimento. Em relação às usinas de geração fotovoltaicas, uma entidade certificadora com experiência comprovada deve ser acionada pelo empreendedor para validar o índice

solarimétrico e realizar uma simulação de desempenho certificando a geração de energia prevista no período de contrato previsto nas regras do leilão de energia.

O art. 6º-B10, inciso II, da Portaria MME nº 21/2008, estabelece que, para empreendimentos fotovoltaicos, apenas a partir de 2016 é obrigatória a apresentação de histórico de medições contínuas de irradiação global horizontal, por período não inferior a doze meses consecutivos, realizadas no local do empreendimento. Dessa forma, para habilitação técnica no LER/2014 e 1º e 2º LER 2015, admitiu-se que a Certificação de Produção Anual de Energia fosse elaborada a partir de dados solarimétricos secundários, obtidos, principalmente, a partir de modelos numéricos, com uso de parâmetros derivados de dados de satélites, interpolação de dados terrestres de terceiros, entre outros. (EPE, 2016).

2.4.3 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL

Há na atualidade a necessidade de padronizar os procedimentos ambientais quanto ao rito do processo de licenciamento de empreendimento de geração renovável. Para atingir tal demanda acordou-se que o melhor instrumento seria a criação de uma resolução do CONAMA. Tal iniciativa partiu do órgão ambiental do Rio Grande do Sul (FEPAM), que elaborou uma proposta de resolução indicando que o processo de licenciamento deve ficar a cargo dos Estados, dado que são empreendimentos que causam pequeno impacto ambiental e têm por amplitude a escala local.

Em relação às etapas, é a Licença Prévia (LP) que aprova a localização, concepção e atesta a viabilidade ambiental do empreendimento ou atividade. Já a Licença de Instalação (LI) autoriza a respectiva instalação, com a concomitante aprovação dos detalhamentos e cronogramas de implantação dos planos e programas de controle ambiental; ou seja, dá validade à estratégia proposta para o trato das questões ambientais durante a fase de construção. A Licença de Operação (LO) autoriza o interessado a iniciar a operação do empreendimento, tem por finalidade aprovar a forma proposta de convívio do empreendimento com o meio ambiente, durante um tempo finito, equivalente aos seus primeiros anos de operação. (BRASIL, 2004).

2.5 USINAS FOTOVOLTAICAS CENTRALIZADAS

Nesta seção são listadas as fases e processos previstos para estruturação de um empreendimento solar de geração; posteriormente são descritos os componentes de uma usina solar, bem como as alternativas técnicas principais empregadas hoje e por fim são citadas as etapas da obra normalmente consideradas.

2.5.1 PROCESSO DE ESTRUTURAÇÃO DO EMPREENDIMENTO

Uma usina solar fotovoltaica de grande porte é classificada como um empreendimento de geração centralizada. Para sua viabilização um processo de desenvolvimento do projeto deve ocorrer desde sua concepção inicial. Na Figura 11 de forma esquemática foram ilustradas as principais partes envolvidas no processo. Na sequência são listadas cronologicamente as atividades e marcos durante o desenvolvimento do projeto.

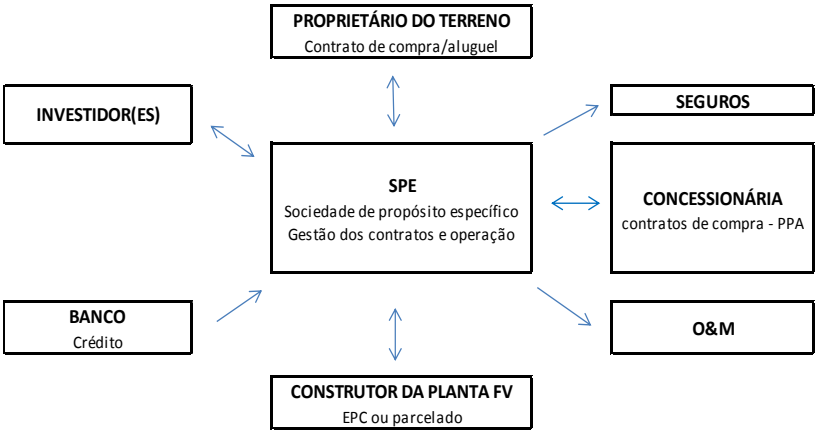


Figura 11–Principais agentes no processo de estruturação de um empreedimento solar.

- Primeiro contato, ideia inicial e descrição geral do projeto.
- Avaliação do site - Aspectos técnicos / legais

  - Verificação prévia do ponto de conexão
  - Terreno adequado à instalação em região com bom índice de irradiação solar
  - Estudo da geração solar preliminar
- Desenvolvimento do projeto básico preliminar
  - Consulta do acesso à rede
  - Análise de investimento
  - Contrato de compra / aluguel do terreno
  - Estudo ambiental e obtenção de Licenciamento Prévio
  - Medição de dados ambientais e certificação da produção de energia
- Cadastramento da usina para habilitação (em caso de participações em leilões federais)
- Projeto básico
  - Orçamento dos principais componentes, construção, custos administrativos e O&M
  - Avaliação econômica para acerto de preço da energia negociada
- Leilão de Energia
  - PPA - Contrato de compra de energia
  - Contratos da SPE
- Fonte garantida de recurso para implantação (financiamentos ou investimentos privados)
- Viabilização do ponto de conexão
- Negociação com principais fornecedores
  - Solicitação de propostas
  - Roteiro para avaliação das propostas técnicas e econômicas
- Levantamentos de custo e alternativas de implantação

- Projeto executivo
    - Consolidação das especificações dos equipamentos e materiais
    - Elaboração de desenhos de projetos e listas de compras
    - Cronograma da construção
- Aquisição dos materiais
- Construção
    - Preparação do site e mobilização
        - Atividades de caráter civil e montagem eletromecânica
        - Testes de operação: testes elétricos
        - Comissionamento
- Inauguração

2.5.2 COMPONENTES PRINCIPAIS

2.5.2.1 MÓDULO FOTOVOLTAICO

O componente elementar do sistema é o módulo fotovoltaico, que constitui a unidade produtiva do sistema, onde ocorre a conversão direta da luz solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico.

Os módulos fotovoltaicos geram energia em corrente contínua (c.c.), com sua capacidade nominal definida a partir da potência que o equipamento pode fornecer em condições padrão de teste (irradiância de 1.000 W/m², massa de ar de 1,5, temperatura de 25ºC na junção p-n da célula fotovoltaica), sendo expressa em Wp (Watt-pico). O recorde atual de eficiência (em laboratório) de células de silício monocristalino é de 26,7% e de multicristalino de 21,9%. A mais alta eficiência para filme finos é de 21,7 e 21 % para CIGS e CdTe, respectivamente. (GREEN et al., 2017).

2.5.2.2. STRINGS (SÉRIES DE MÓDULOS)

O conjunto formado pela união em série de certo número de módulos é chamada de string (série fotovoltaica). Os módulos são conectados eletricamente em série de forma a somar a tensão exigida para a adequada integração com o inversor. Essas composições podem resultar em níveis próximos a 1.000V e até 1.500V e são normalmente conectadas em paralelo para que o número de circuitos se adeque com as entradas disponíveis nos inversores.

2.5.2.3 CAIXAS DE JUNÇÃO OU COMBINAÇÃO (STRING OU COMBINER BOXES)

Em grandes usinas as séries fotovoltaicas são ligadas em paralelo através de quadros elétricos de combinação para então serem encaminhadas até os inversores. Os circuitos c.c. são conectados em paralelo, atingindo altos níveis de corrente. Nestes quadros é comum haver medições descentralizadas das variáveis elétricas que alimentam o sistema de monitoramento da usina.

2.5.2.4 CABOS DE BAIXA TENSÃO DE POTÊNCIA E CONTROLE

Os cabos das séries fotovoltaicas são normalmente encaminhados através da estrutura de suporte dos módulos por meio de calhas metálicas. Eles devem possuir isolação compatível com o nível de tensão do circuito, ser resistentes à radiação UV e ter garantia de durabilidade adequada. Após as caixas de junção, os cabos apresentam bitolas mais significativas e são normalmente protegidos por eletrodutos e encaminhados através de valas até os inversores. Circuitos de comunicação e força têm encaminhamentos distintos, assegurando distância apropriada para evitar possibilidade de interferências (>30 cm).

2.5.2.5 INVERSORES

O inversor é o equipamento eletrônico que converte a energia gerada pelos módulos em corrente contínua (c.c.), para corrente alternada (c.a.). A energia elétrica é entregue aos consumidores em

corrente alternada e dessa forma, torna-se necessário essa conversão por meio destes conversores c.c.-c.a., cuja capacidade é expressa em W (Watt). A topologia de uma usina solar é predominantemente feita com inversores centralizados, posicionados dentro de um eletrocentro ou subestação unitária, onde está posicionado o transformador elevador de média tensão, proteções e equipamentos de medição.

2.5.2.6 CABOS DE M.T.

Nas Subestações Unitárias, após os inversores a tensão do sistema é elevada para níveis médios, 15 ou 35 kV, permitindo redução do nível de perdas elétricas. Os circuitos de média tensão interligam eletrocentros e direcionam a energia à subestação interna da usina, permitindo a conexão do sistema de transmissão até uma subestação regional. Esses circuitos são normalmente encaminhados por valas com profundidade adequada e podem ser diretamente enterrados, caso sejam especificados para isso.

2.5.2.6 ESTRUTURA DE SUPORTE

As estruturas de suporte dos módulos fotovoltaicos são predominantemente metálicas, compostas por aço, alumínio, ou até madeira, com proteção galvânica e por anodização, quando for o caso. Elas devem ser resistentes às condições ambientas, pois estão sujeitas aos efeitos de degradação e por estarem em contato com os módulos devem apresentar durabilidade compatível, sendo comum encontrar fornecedores apresentando garantias de até 20 anos. As estruturas são dimensionadas considerando as características mecânicas dos módulos e as ações permanentes (peso próprio) e variáveis (cargas de vento). Elas são projetadas para que permitam adequada fixação dos módulos e garantam sua integridade, não permitindo deformações que afetem os módulos. Uma parte importante da estrutura é a fundação, a qual pode ser de concreto, com hastes metálicas cravadas ou parafusos helicoidais.

Quanto aos tipos de estruturas metálicas de suporte, modelos fixos são os mais usuais, com inclinação e orientação projetadas para o melhor aproveitamento relacionado à região de instalação da usina. Este processo deve ser realizado durante a fase de projeto e também envolver verificação de custos, visto que, após a instalação, normalmente não são possíveis alterações. (GÓMEZ-GIL; WANG; BARNETT, 2012).

Outra opção a ser destacada e que vem crescendo em importância e utilização nas usinas de grande porte que vêm sendo instaladas no Brasil são as estruturas de suporte do tipo *tracker* (com seguimento do sol em eixo horizontal N-S); este tipo de solução segue parcialmente o sol, utilizando apenas um eixo com acionamento motorizado, mantendo algumas características e estabilidade da estrutura fixa. Na **Figura 12** é ilustrado um tipo de *tracker* com eixo horizontal e acionamento central, também chamado de multifileira, destacando a orientação dos eixos presentes na estrutura, Biela (eixo EW) e viga de torção (eixo NS).

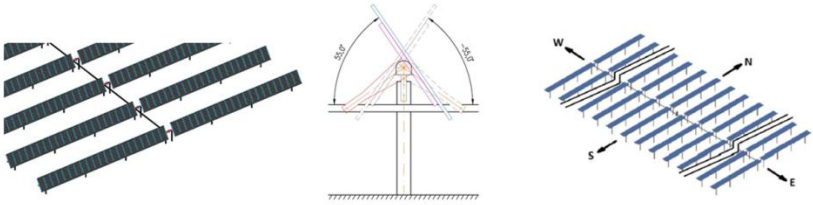


Figura 12 – Ilustração das estruturas de suporte tipo *tracker* de eixo horizontal.

2.5.2.7 ALTERNATIVAS DE FUNDAÇÃO

Três tipos de fundação para estruturas de suporte podem hoje ser citadas como as principais opções praticadas, todas considerando o uso de uma haste metálica na solução, a qual já representa componente estrutural de apoio para as demais peças de suporte.

Cravação direta: Este tipo de fundação consiste da cravação direta da haste metálica através de uma máquina especial.

Pré-escavação + cravação: Esta opção é aplicada quando a cravação direta não é possível, normalmente pela ocorrência de um solo muito duro ou leito de rocha. A solução consiste em pré-escavar o solo em profundidade projetada, preencher com material peneirado, compactar e realizar a cravação normal.

Mini-tubulão: Esta alternativa consiste em escavar o solo, inserir a haste metálica e preencher com concreto.

2.5.3 SOLUÇÕES TÉCNICAS COMERCIALMENTE DISPONÍVEIS

Os principais componentes de um sistema FV são os módulos fotovoltaicos e os inversores. A tecnologia de módulos fotovoltaicos mais presente e com maior competitividade no mercado é de silício cristalino (c-Si).Os módulos de segunda geração, chamados de filmes finos, figuram como concorrentes frente à tecnologia clássica; em destaque cita-se um exemplar baseado em um composto de telureto de cádmio (CdTe), tecnologia esta que ao longo dos últimos anos tem aumentado consideravelmente o seu nível de eficiência.

Os projetos de centrais fotovoltaicas podem ser classificados em quatro categorias principais, dependendo do tipo de módulo utilizado, de c-Si ou filme fino (principalmente CdTe) e se são utilizadas estruturas de suporte com inclinação fixa ou em um sistema que acompanha o sol, com domínio da opção com único eixo N-S. Como exemplo, em 2013 nos EUA cerca de 70% dos projetos utilizaram módulos de c-Si e aqueles com rastreamento representaram 60% do total, conforme é ilustrado na Figura 13.

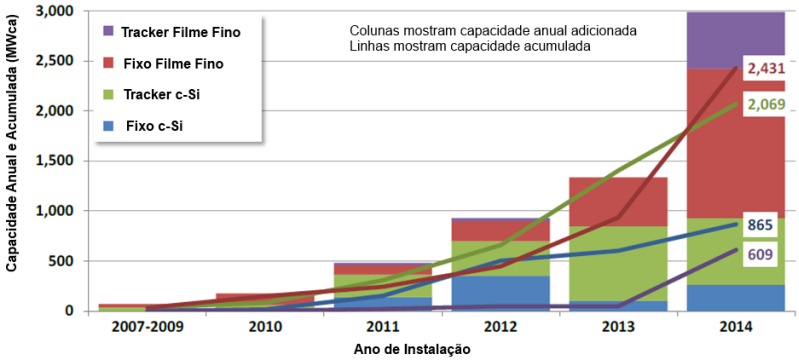
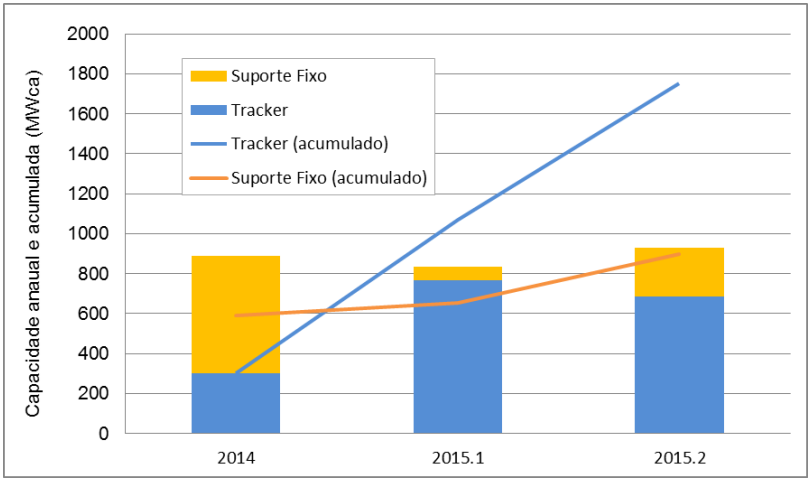


Figura 13 – Potência por tipo de módulo e estrutura de suporte para projetos de usinas fotovoltaicas de grande porte no EUA. Fonte: (Adaptado BOLINGER; WEAVER; ZUBOY, 2015).

Nos projetos vencedores dos leilões de geração solar fotovoltaica no Brasil, quanto ao tipo de estrutura de suporte, também há uma divisão entre as opções fixas e com *tracker* de um eixo horizontal. O gráfico a seguir (Figura 14) ilustra a distribuição das opções utilizadas em termos de potência c.a. instalada nos empreendimentos vencedores dos leilões de 2014 e 2015.



Porcentagem uso Tracker	2014	2015.1	2015.2
Por leilão	34%	92%	74%
Acumulada	34%	62%	66%

Figura 14 – Distribuição das opções utilizadas nos empreendimentos vencedores dos leilões de 2014 e 2015.

Ocorreu uma nítida mudança na opção de suporte entre 2014 e 2015 no Brasil. No cenário americano a escolha do *tracker* foi maior até 2013, quando ainda apresentava tendência de expansão de seu crescimento, porém houve uma alternância em 2014, quando a opção fixa ultrapassou em termos de capacidade instalada.

Os inversores solares utilizados em centrais fotovoltaicas são normalmente de grande porte, em torno de 1.000 kW de potência, refletindo em soluções elétricas concentradas, os quais são adequados a espaços extensos e contínuos como aqueles normalmente encontrados nos locais de instalação desse tipo de empreendimento. Nos projetos

vendedores no LER/2014, foram considerados inversores com potência nominal desde 500 kW até 1.665 kW.

Com referência ao dimensionamento elétrico é comum prever a instalação de uma potência c.c. maior que a potência c.a., isto é, subdimensionar a potência do inversor, em relação à capacidade nominal dos módulos fotovoltaicos. Esta razão entre potência c.c./c.a., conhecido por fator de carregamento ou fator de dimensionamento do inversor (FDI), correspondente à divisão da potência nominal c.c.(potência do arranjo de módulos) e a potência CA (soma da potência nominal dos inversores).

É recomendado o sobrecarregamento do inversor dentro de certa faixa de valores, dependendo de condições meteorológicas e de instalação dos módulos, as quais influenciam na incidência solar no plano do gerador (MACÊDO; ZILLES, 2007; BURGER; RÜTHER, 2006). Como os custos de módulos caíram mais rapidamente do que os custos dos inversores, os projetistas têm optado por aumentar a capacidade c.c. em relação à potência c.a. como uma maneira de extrair mais eletricidade por unidades de inversor instalado e, assim, aumentar a receita (FIORELLI, 2015).

O FDI adotado depende de uma avaliação de custo e benefício, já que pode acarretar menor investimento e uma operação mais eficiente dos inversores e, por outro lado, não aproveitamento de uma parcela da energia fornecida pelos módulos fotovoltaicos devido à limitação da capacidade do inversor. O FDI dos empreendimentos vencedores do 2º LER/2015variouna média entre 1,11 a 1,34 (EPE, 2016). Em um levantamento realizado no EUA o FDI médio aumentou de 1,18 em projetos de 2010 e 2011 para quase 1,27 para projetos em 2013. (FIORELLI, 2015).

2.5.4 ETAPAS DA OBRA DE UMA UFV

As etapas da construção de uma usina fotovoltaica, desconsiderando o processo de engenharia, especificação e aquisição dos equipamentos e materiais, podem ser resumidas da seguinte forma.

- Etapa de obra civil: inicia com o processo de supressão vegetal, confirmação da topografia e terraplenagem quando necessário, construção de acessos internos e posterior confecção das valas de drenagem e de encaminhamento de cabos.

- Etapa de montagem mecânica: é composta pela instalação das fundações, posterior montagem das traves e mesas de suporte e finalmente a fixação dos módulos fotovoltaicos.
- Montagem elétrica: quando as conexões dos módulos são efetivadas e ocorre o encaminhamento dos cabos de baixa tensão até as caixas de junção e inversores. Nos eletrocentros ocorre a elevação da tensão e então os circuitos de média tensão são encaminhados para a subestação de conexão da usina. Todos os elementos são também devidamente protegidos através da instalação de um adequado sistema de aterramento e proteção.
- Comissionamento: Antes da conexão e início da operação da usina, os elementos componentes da usina são inspecionados visualmente e através de testes mecânicos e elétricos, certificando o projeto e os parâmetros previstos de operação.

2.5.5 DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Para medir o desempenho dos sistemas FV são amplamente utilizadas métricas como rendimento energético (*yield*) e taxa de desempenho (PR = *Performance Ratio*), recentemente empregadas em trabalhos como de Veríssimo (2017).

O rendimento energético (consagrado na literatura especializada pelo termo em inglês "*yield*") equivale à produtividade do sistema e é determinado através da relação do montante de energia (normalmente anual MWh/ano) e a potência c.c. instalada (MWp), representando o quanto de energia elétrica é produzida por unidade de potência (MWh/MWp).

O coeficiente ou taxa de desempenho (consagrado na literatura especializada pelo termo em inglês "Performance Ratio" – PR)representa a proporção da energia efetivamente produzida, em relação à energia que seria produzida por um sistema "perfeito" que funciona continuamente no STC sob mesma irradiância (global incidente no plano).O PR inclui as perdas dos arranjos (sombreamento, reflexões, temperatura de operação dos módulos FV, incompatibilidade, etc.) e as perdas do sistema (ôhmicas no cabeamento e eficiência do inversor, por exemplo).Ao contrário do *Yield*, não depende diretamente da entrada de dados de irradiação ou da orientação do plano, permitindo comparar a qualidade do sistema entre instalações em diferentes locais e

orientações, sendo apresentado de forma adimensional ou em porcentagem.

2.6 PLANEJAMENTO DA CONSTRUÇÃO DE UM REENDIMENTO

A construção de empreendimentos fotovoltaicos de grande porte é caracterizada pela intensa concentração de capital em um cronograma curto e devem ser compatíveis com os avanços das tecnologias e projeções de custo dos componentes principais.

Considerado um tipo relativamente recente de construção, é esperado que as empresas contratadas para integração dos sistemas com experiências em outras modalidades de construção e montagem, apliquem conceitos e estratégias que podem barrar ou reduzir o grau de inovação e otimização nas fases de projeto e instalação. Há grande espaço para melhorar a integração das partes envolvidas no projeto, antecipar conflitos e reduzir os custos de implantação e aumentar o grau de qualidade da instalação destes empreendimentos. (YUVENTI, 2013).

A seguir são apresentados os principais conceitos em termos de planejamento da construção de empreendimento com base em referencias consolidadas sobre gerenciamento de projetos.

Segundo *Project Management Institute* (PMI) (2013), projeto é um esforço temporário empreendido para criar um produto, serviço ou resultado exclusivo, com um início e um término definidos. O término acontece quando os objetivos são atingidos ou quando o projeto encerra-se por eventos que inviabilizam sua conclusão ou a razão de existir, por força maior ou por indicação do cliente, patrocinador ou financiador. O termo temporário normalmente não se aplica ao produto, serviço ou resultado criado pelo projeto; a maioria dos projetos é empreendida para criar um resultado duradouro. Por exemplo, um projeto de construção de um empreendimento de geração criará um resultado que deverá durar décadas.

Dependendo do tamanho e complexidade, um projeto pode ser segmentado em diferentes números de fases ou grupos de atividades, formando subconjuntos relacionados para facilitar o gerenciamento, planejamento e controle, visando ao desenvolvimento de uma entrega principal específica.

A divisão de fases de um empreendimento pode ser dada, por exemplo, considerando a etapa de (1) engenharia (2) aquisições e (3) construção. Geralmente as fases são terminadas sequencialmente, mas podem se sobrepor em algumas situações do projeto, exigindo recursos adicionais para permitir a execução paralela, aumentando riscos e chance de retrabalho caso uma fase subsequente progrida antes que informações precisas sejam disponibilizadas pela fase anterior.

Segundo PMI (2013), gerenciamento de projetos consiste na aplicação de conhecimentos e métodos visando atender os pré-requisitos do projeto, por meio do adequado uso e integração de alguns processos de gerenciamento, que podem ser agrupados em cinco grupos de processos:

- **Iniciação**. Processos usados para definir um novo projeto ou uma nova fase de um projeto existente com obtenção da autorização de iniciação.
- **Planejamento**. Processos necessários para definir o escopo do projeto, refinar os objetivos e definir a linha de ação necessária para alcançar os objetivos para os quais o projeto foi criado.
- **Execução**. Processos para executar o trabalho definido no plano de gerenciamento do projeto para satisfazer as especificações previstas.
- **Monitoramento e controle**. Processos exigidos para acompanhar, analisar e controlar o progresso e desempenho do projeto, identificar quaisquer áreas nas quais serão necessárias mudanças no plano, e iniciar as mudanças correspondentes.
- **Encerramento**. Processos aplicados para finalizar todas as atividades de todos os grupos de processos, visando encerrar formalmente o projeto ou fase.

Os grupos de processos de gerenciamento de projetos são apresentados como elementos distintos com interfaces bem definidas. Entretanto, na prática eles se sobrepõem e interagem entre si como necessariamente ocorrem os processos de monitoramento e controle. A Figura 15 ilustra a interação e nível de sobreposição dos grupos de processos.

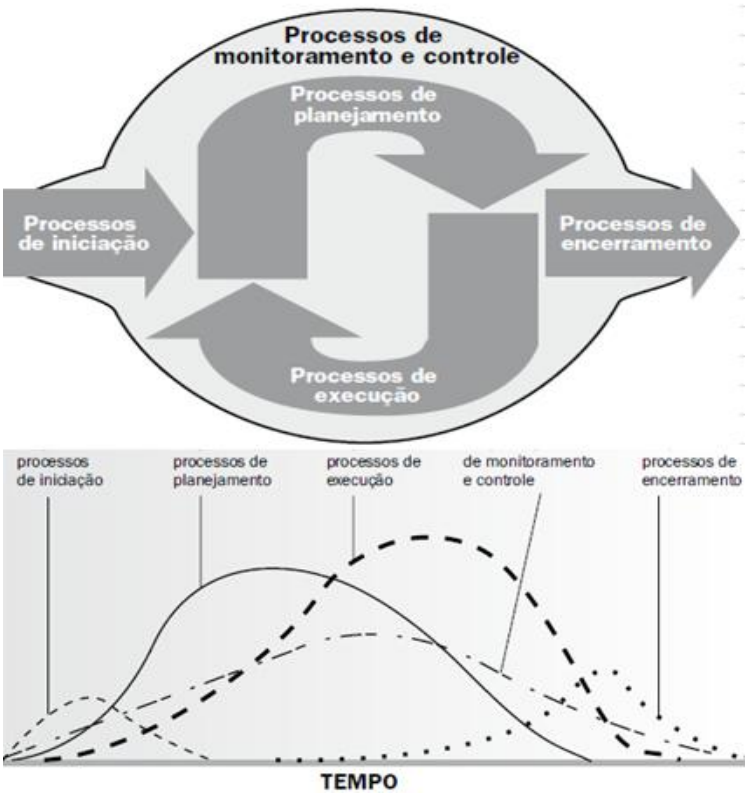


Figura 15 – Interação de processos de gerenciamento de projetos (fonte: PMI 2013, adaptado).

O gerenciamento de um projeto normalmente inclui o equilíbrio das restrições conflitantes do projeto que incluem, principalmente:

- Escopo,
- Qualidade,
- Cronograma,
- Orçamento,
- Recursos, e
- Riscos.

Os processos de gerenciamento são também agrupados em áreas de conhecimento distintas que se integram com os grupos de processos citados. Todos os processos de gerenciamento previstos pelo PMBok (PMI, 2013) são alocados dentro dos cinco grupos e classificados dentro das 10 áreas de conhecimento. Na Tabela 1 estão listados todos os processos com destaque (azul) para os itens que representam o foco deste trabalho, os quais na sequência são teoricamente referenciados.

Tabela 1 – Grupos de processos de gerenciamento de projetos e áreas de conhecimento (PMI, 2013), adaptado)

ÁREAS DE CONHECI-MENTO	Grupos de processos de gerenciamento de projetos				
	Processos de iniciação	Processos de planejamento	Proces-sos de execução	Processos de monitora-mento e controle	Proces-sos de encerra-mento
1.Gerencia-mento da integração	1.1 Desenvolver o termo de abertura do projeto	1.2 Desenvolver o plano de gerenciamento do projeto	1.3 Orientar e gerenciar o trabalho do projeto	1.4 Monitorar e controlar o trabalho do projeto 1.5 Realizar o controle integrado de mudanças	1.6 Encerrar o projeto ou fase
2. Gerencia-mento do escopo		2.1 Planejar o gerenciamento do escopo 2.2 Coletar os requisitos 2.3 Definir o escopo 2.4 Criar a estrutura analítica do projeto (EAP)		2.5 Validar o escopo 2.6 Controlar o escopo	

Tabela 1 (continuação)

ÁREAS DE CONHECI-MENTO	Grupos de processos de gerenciamento de projetos				
	Processos de iniciação	Processos de planejamento	Proces-sos de execução	Processos de monitora-mento e controle	Proces-sos de encerramento
3. Gerenciamento do tempo		3.1 Planejar o gerenciamento do cronograma 3.2 Definir as atividades 3.3 Sequenciar as atividades 3.4 Estimar os recursos das atividades 3.5 Estimar as durações das atividades 3.6 Desenvolver o cronograma			3.7 Controlar o cronograma
4. Gerenciamento dos custos		4.1 Planejar o gerenciamento dos custos 4.2 Estimar os custos 4.3 Determinar o orçamento			4.4 Controlar os custos
5. Gerenciamento da qualidade		5.1 Planejar o gerenciamento da qualidade	5.2 Realizar a garantia da qualidade		5.3 Controlar a qualidade

Tabela 1- (continuação)

ÁREAS DE CONHECI-MENTO	Grupos de processos de gerenciamento de projetos				
	Processos de iniciação	Processos de planejamento	Processos de execução	Processos de monitora-mento e controle	Proces-sos de encerra-mento
6. Gerenciamento dos recursos humanos		6.1 Planejar o gerenciamento dos recursos humanos	6.2 Mobilizar a equipe do projeto 6.3 Desenvolver a equipe do projeto 6.4 Gerenciar a equipe do projeto		
7. Gerenciamento dos recursos de comunicações		7.1 Planejar o gerenciamento das comunicações	7.2 Gerenciar as comunica-ções	7.3 Controlar as comunica-ções	
8. Gerenciamento dos riscos		8.1 Planejar o gerenciamento dos riscos 8.2 Identificar os riscos 8.3 Realizar a análise qualitativa dos riscos 8.4 Realizar a análise quantitativa dos riscos 8.5 Planejar as respostas aos riscos		8.6 Controlar os riscos	

Tabela 1 (continuação)

ÁREAS DE CONHE-CIMENTO	Grupos de processos de gerenciamento de projetos				
	Processos de iniciação	Processos de Planejamento	Processos de execução	Processos de monitoramento e controle	Processos de encerramento
9. Gerenciamento das aquisições		9.1 Planejar o gerenciamento das aquisições	9.2 Conduzir as aquisições	9.3 Controlar as aquisições	9.4 Encerrar as aquisições
10. Gerenciamento das partes interessadas	10.1 Identificar as partes interessadas	10.2 Planejar o gerenciamento das partes interessadas	10.3 Gerenciar o engajamento das partes interessadas	10.4 Controlar o engajamento das partes interessadas	

2.6.1 ESCOPO DO PROJETO

O gerenciamento do escopo do projeto está relacionado especialmente com a definição e controle do que está e do que não está incluso no projeto, inclui assim os procedimentos destinados a certificar que estão consideradas todas as atividades necessárias para finalizar o projeto.

Segundo PMI (2013), no contexto do projeto, o termo escopo pode se referir ao:

Escopo do produto. As particularidades e funções que caracterizam um produto, serviço ou resultado; e/ou

Escopo do projeto. O trabalho que deve ser realizado para entregar um produto, serviço ou resultado com as características e funções apontadas.

A linha de base do escopo é a versão aprovada das especificações e da estrutura analítica do projeto (EAP). A priori, não deve ser alterada e é usada como uma base de comparação durante o cumprimento dos processos de validação e controle do escopo.

Na Tabela 2 é apresentada uma visão geral dos processos de gerenciamento do escopo do projeto segundo PMI (2013).

Tabela 2 – Escopo do projeto – definição dos processos e objetivos (PMI, 2013 adaptado)

Processos	Definição	Objetivo
Coletar os requisitos	Processo de determinar, documentar e gerenciar as necessidades e requisitos das partes interessadas a fim de atender aos objetivos do projeto.	Fornecera base para definição e gerenciamento do escopo do projeto, incluindo o escopo do produto.
Definir o Escopo	Processo de elaborar uma descrição detalhada do projeto e do produto	Descrever os limites do projeto, serviços ou resultados com definição de quais requisitos serão incluídos ou não.
Criar a estrutura analítica do projeto (EAP)	Processo de subdividir as entregas em componentes menores em ordem de execução. Instituição do responsável e atributos de cada tarefa (duração, custos e recursos envolvidos).	Fornecer uma visão estruturada do que deve ser entregue

Tabela 2 (continuação)

Validar o escopo	Processo de formalizara aceitação das entregas terminadas do projeto	Proporcionar objetividade ao processo de aceitação e aumentar a probabilidade da aceitação final do produto, serviço ou resultado, através da validação de cada entrega realizada.
Controlar o escopo	Processo de monitorar o progresso do escopo do projeto e do produto e gerenciar as mudanças feitas na linha de base do escopo	Permitir que a linha de base do escopo seja mantida ao longo de todo o projeto

Dos itens abordados, a criação da EAP é a parte efetivamente importante, quando se materializam as atividades previstas para entrega do projeto. Avila e Jungles (2013) indicam que deve se ter atenção para não haver um excesso de níveis, que tornem complexo o acompanhamento e fragmentem as informações, indicando quando possível que atividades de menor tempo de execução sejam inseridas dentro de outras mais complexas.

2.6.2 TEMPO DO PROJETO

O gerenciamento do tempo do projeto inclui os processos necessários para gerenciar o término pontual do projeto. Basicamente resume-se a definir, sequenciar, estimar os recursos e principalmente as durações das atividades, dando subsídio ao desenvolvimento do cronograma e possibilitar seu controle.

Na Tabela 3 é apresentada uma visão geral dos processos de gerenciamento do tempo do projeto segundo PMI (2013).

Tabela 3 – Tempo do projeto – definição dos processos e objetivos (PMI, 2013 adaptado).

Processos	Definição	Objetivo
Definir as atividades	Processo de identificar e documentação das ações específicas a serem realizadas para produzir as entregas do projeto.	Divisão dos pacotes de trabalho em atividades que fornecem uma base para estimar, programar, executar, monitorar e controlar os trabalhos do projeto.
Sequenciar as atividades	Processo de identificar e documentar os relacionamentos entre as atividades do projeto.	Definir a sequência lógica do trabalho a fim de obter o mais alto nível de eficiência em face de todas as restrições do projeto.
Estimar os recursos das atividades	Processo de estimar os tipos e quantidades de material, recursos humanos, equipamentos ou suprimentos que serão necessários para realizar cada atividade.	Identificar o tipo, quantidade e características dos recursos exigidos para concluir a atividade, permitindo estimativas de custos e de duração mais exatas.
Desenvolver o cronograma	Processo de analisar o sequenciamento das atividades, suas durações, recursos necessários e restrições visando criar o cronograma do projeto.	Inserção das atividades do cronograma, suas durações, disponibilidades dos recursos e relacionamentos lógicos em uma ferramenta de cronograma, gerando um modelo de cronograma com datas planejadas para a conclusão das atividades do projeto.

Tabela 3 (continuação)

Controlar o cronograma	Processo de monitorar o andamento das atividades do projeto para atualização no seu progresso e gerenciamento das mudanças feitas na linha de base do cronograma para realizar o planejado.	Fornecer os meios de se reconhecer o desvio do planejado e tomar medidas corretivas e preventivas, minimizando assim os riscos.

2.6.3 CUSTO DO PROJETO, CONTROLE DA QUALIDADE E RISCOS.

O gerenciamento dos custos do projeto compreende as técnicas envolvidas para planejar e estimar os custos, determinar o orçamento e gerenciar estes custos, de maneira que o projeto seja finalizado dentro da verba aprovada.

Na Tabela 4 é apresentada uma visão global dos processos de gerenciamento dos custos do projeto.

Tabela 4 – Custo do projeto – definição dos processos e objetivos (PMI, 2013 adaptado)

Processos	**Definição**	**Objetivo**
Estimar os custos	Processo de desenvolver uma estimativa dos recursos monetários necessários para terminar as atividades do projeto.	Definir os custos exigidos para concluir os trabalhos do projeto.
Determinar o orçamento	Processo de agregar os custos estimados de atividades individuais ou pacotes de trabalho para estabelecer uma linha de base dos custos autorizada.	Determinar da linha de base dos custos para o monitoramento e controle do desempenho do projeto.

Tabela 4 (continuação)

Controlar os custos	Processo de monitorar o andamento do projeto para atualização no seu orçamento e gerenciamento das mudanças feitas na linha de base de custo

Para controlar a qualidade requerem-se processos de monitoramento e apontamento dos resultados das atividades para aferir o desempenho e indicar as modificações necessárias. Os principais objetivos deste processo incluem a identificação das causas da baixa qualidade de um processo ou produto e adotar medidas para eliminá-las, bem como validar a conformidade das entregas e do trabalho do projeto com os requisitos necessários à aceitação final, especificados pelas principais partes interessadas. (PMI, 2013)

O controle dos riscos é realizado através da identificação, implantação de respostas e acompanhamento dos riscos, contínua verificação de novos riscos e avaliação do processo durante o ciclo de vida do projeto a fim de aperfeiçoar as respostas e minimizar seus impactos.

2.6.4 TÉCNICAS DE PLANEJAMENTO DE CONSTRUÇÃO

Na literatura são citadas duas classificações amplas para sistemas de planejamento para construção (a) *Activity-Based* e (b) *Location-Based* . As duas categorias são metodologias baseadas, respectivamente, em atividades e em localização As duas metodologias são especialmente associadas com dois processos de planejamento fundamentais: PERT/CPM e Linha de Balanceamento, respectivamente, a qual pode ser conhecida como, tempo-caminho, tempo-espaço ou linha de fluxo (KENLEY; SEPPANEN, 2009; BUCHMANN-SLORUP, 2012).

Padrões clássicos de planejamento e controle de obras estão profundamente embasados no emprego da técnica CPM (*Critical Path Method*) e nos grupos de processos e áreas de conhecimento do PMI (*Project Management Institute*). (OLIVIERI; GRANJA; PICCHI, 2016). No entanto, os locais são importantes na construção, porque a obra dificilmente pode ser vista como um processo contínuo repetitivo, mas

sim como uma série de locais físicos em que o tipo e quantidade de trabalho variável devem ser concluídos. O foco do método *location-based* é na tarefa que se desloca através de unidades de produção (locais) e os dados do projeto se situam na tarefa e na localização. (KENLEY; SEPPANEN, 2009).

Neste sentido, a linha de balanceamento (LDB) vem sendo indicada como uma ferramenta para o planejamento e controle de projetos que proporciona grande visibilidade para os fluxos de trabalho em um canteiro de obra, tornando-os mais transparentes para os gestores. (OLIVIERI; GRANJA; PICCHI, 2016) (KEMMER *et al.* 2008). A LDB retrata informações relacionadas a quando, onde, bem como a dimensão da atividade, o ritmo e as folgas entre as diferentes equipes; a ferramenta pode servir como um meio para simular diferentes alternativas e estratégias para sequenciar atividades no longo prazo. (KEMMER *et al.* ,2008). Embora na sua forma básica, a metodologia seja em grande parte gráfica, é possível incorporar as relações lógicas do CPM, dentro e entre as tarefas e, além disso, a presença de tarefas e locais permite maior capacidade e flexibilidade para modelar projetos de construção.(KENLEY; SEPPANEN, 2009).

2.6.4.1 LINHA DE BALANCEAMENTO

A técnica da Linha de Balanceamento (LDB) se resume ao conceito de que as tarefas são repetidas muitas vezes ao longo de uma unidade de repetição. Por exemplo, o serviço de interligação de módulos fotovoltaicos é realizado muitas vezes ao longo de todas as unidades de geração de uma usina solar. O ritmo de conclusão da tarefa nas diversas unidades dependerá de quantas equipes sejam alocadas. A técnica é de aplicação bastante simples principalmente porque pode ser feita graficamente, se for admitida a linearidade do desenvolvimento da tarefa, podendo ser visualizada num gráfico espaço x tempo, indicando a unidade e quando a tarefa é executada nesta unidade. Cada linha do gráfico corresponderá a uma tarefa. (MENDES Jr., 2015)

A maior vantagem da Linha de Balanceamento é a de permitir fácil visualização, em forma gráfica, dos ritmos de produção e informação da duração das atividades, bem como a interferência com as atividades mais próximas. Nenhuma outra técnica de planejamento oferece esta facilidade, porque não são especialmente desenvolvidas para atividades repetitivas, acrescenta-se a facilidade de entendimento

do gráfico, tanto no planejamento como na execução. (MENDES Jr., 2015).Por meio da Linha de Balanceamento o engenheiro da obra passará a ter uma visão mais simples da execução das atividades servindo como ferramenta de apoio na melhoria da produtividade e qualidade nos canteiros e poderá dispor de uma técnica eminentemente gráfica (visual) que será um valioso aliado nas suas comunicações em obra.

Mendes Jr. (1999), assim como Losso e Araújo (1995) desenvolveram metodologias de como se programar a produção através da LB. Estes roteiros se complementam e seguem em princípio os mesmos passos:

- Definição da unidade básica de repetição;

- Determinação das atividades a serem programadas e suas precedências;

- Obtenção das quantidades de serviços a executar;

- Dimensionamento do tamanho das equipes, produtividade esperada e durações das atividades na unidade de repetição considerada;

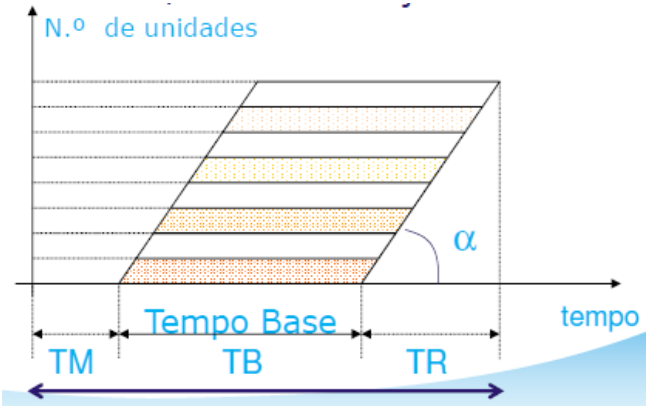


Figura 16 – Ilustração esquemática da linha de balanceamento (Fonte: UFSC – EVC5318)

i. Dois eixos:

   a. Grandeza tempo – abscissa

b. Quantidade de unidades produzidas- ordenada

ii. Declividade da reta: define a taxa de produção no tempo – produtividade e o ritmo desejado

iii. Espessura: Define a duração da atividade

Na Tabela 5 são colocadas as fórmulas e parâmetros aplicados.

Tabela 5 – Parâmetro, formulas e definições da técnica linha de balanceamento

Parâmetros	Definições
Duração total (DT)= TM + TB + TR	Tempo previsto para realização do projeto (contrato ou parcela da obra)
Tempo de Mobilização (TM)	Tempo entre assinatura do contrato e início efetivo da obra
Tempo Base (TB)	Tempo de execução de uma unidade de construção (ex., um Bloco).
Tempo restante (TR)	Lapso de tempo entre a conclusão da 1ª unid. Base até o fim do projeto
	Fórmulas
Tempo restante (TR)	TR = (n-1)/a (n= nº de unidades; a = ritmo = tg α
Ritmo de execução	a = (n-1) / DT - TB - TM ou a = (n-1)/ TR
Duração de cada atividade unidade (D)	D = Nº de unid. do Bloco / P x H (P = produtividade - unid./hora.equipe ; H = jornada de trabalho em horas)

2.6.4.2 MÉTODO DO CAMINHO CRÍTICO – CPM E O PERT

Os métodos baseados em redes, tais como o CPM (Critical Path Method) e o PERT (Project Evaluation and Review Technique) são aplicáveis a obras onde existe necessidade de um detalhamento maior do que aquelas em que se aplica simplesmente o diagrama de barras. As

redes usam flechas e nós para representar a construção das operações e suas relações (MAZIERO, 1990).

A rede CPM ilustra claramente a sequência lógica das operações. As dependências e durações estimadas são usadas para determinar o tempo necessário para a conclusão do projeto. Combinar estas duas técnicas, CPM e LDB, para o caso de obras com serviços repetitivos já é uma solução reconhecidamente eficaz.

2.6.5 PRODUTIVIDADE NA CONSTRUÇÃO

Em termos gerais a produtividade pode ser vista como a eficiência em se transformar entradas em saídas num processo produtivo. As saídas são medidas pelo valor ou a quantidade de bens ou serviços produzidos para uma determinada qualidade e padrão determinados. Entradas, por outro lado, incluem recursos como tempo, trabalho (manual e de gestão), instalações / equipamentos / tecnologias, materiais, energia, combustível, etc. (LOOSEMORE, 2014).

Em função do tipo de entrada (recurso) a ser transformada, esta definição permite diferentes abordagens, podendo o estudo da produtividade ser visto sob duas principais perspectivas (1) Física, relacionada ao uso dos materiais, equipamentos ou mão-de obra e (2) Financeira, quando a análise incide sobre o valor monetário demandado. Sob essa ótica, a análise de produtividade da mão-de-obra na construção civil é uma análise física de uma das entradas empregadas no processo. (SOUZA, 2000).A medida mais simples de produtividade é relacionada à produção por trabalhador, que é normalmente medido como o valor acrescentado por empregado ou; quantidade produzida por empregado. (Horner e Duff, 2001).

Os fatores que afetam a produtividade em sites de construção podem ser classificados da seguinte forma de acordo com a revisão da literatura realizada por Shamil George Naoum(2016):

- Fatores relacionados às atividades de pré-construção(métodos de projeto e aquisições, planejamento da construção, seleção do tipo e método de construção, etc.)

- Fatores relacionados às atividades durante a construção (gerenciamento de materiais e equipamentos na obra, variação

das instruções e mudanças no escopo do projeto, habilidades dos trabalhadores, etc.)

- Fatores relacionados ao gerenciamento e liderança
- Satisfação e fatores motivacionais
- Fatores organizacionais(investimento em tecnologia e inovação, por exemplo)

Shamil George Naoum(2016)estabeleceu uma pesquisa para obter as percepções de 36 empresas do ramo da construção no Reino Unido sobre os fatores que podem influenciar a taxa de produtividade em canteiros de obras. Os fatores foram identificados e, em seguida, classificados entre as cinco categorias principais citadas acima. Na Tabela 6 ranquearam-se os primeiros fatores citados pelas empresas consultadas.

Tabela 6 - Estatísticas descritivas e ranking dos fatores que impactam a produtividade no local no Reino Unido (Shamil George Naoum (2016), adaptado)

Fator	Ranking	Descrição
Planejamento do projeto não efetivo	1	Pré-construção
Atrasos causados por erros de projeto e variações das instruções	2	Pré-construção
Sistema de comunicação	2	Pré-construção
Ambiente de trabalho	3	Motivacional e social
Limitações no desempenho dos trabalhadores	3	Motivacional e social
Projeto e integração	4	Pré-construção
Estilo de liderança e gestão	5	Gerencial
Método de aquisição	6	Pré-construção
Falta de integração do sistema de gestão de informação	6	Durante a construção
Gestão dos materiais no local	6	Durante a construção

Tabela 6 (continuação)

Integração da Equipe	7	Motivacional e social
Experiência e treinamento	7	Organizacional

Através do trabalho de Shamil George Naoum (2016) identificam-se quatro principais componentes como causas da baixa produtividade, do tipo técnica, relacionada a um mau planejamento do uso dos recursos ou baixa qualidade dos projetos; social, ligada à motivação do trabalhador; gerencial, como liderança e gerenciamento do projeto; contratual, vinculado ao método de aquisição escolhido por exemplo. Myers (2013) também destaca que as lições não são normalmente adotadas após cada trabalho, visto que os projetos de construção são normalmente de curto prazo, além de a indústria sofrer com pobres níveis de investimento e inovação.

No referencial teórico foram apresentadas particularidades atuais sobre o cenário do sistema de geração elétrico brasileiro e como os empreendimentos fotovoltaicos de grande porte se inserem neste contexto. O potencial e panorama do mercado FV mundial e brasileiro foram apresentados, destacando o alto ritmo de desenvolvimento do setor, que recentemente se estabeleceu no país por meio da consolidação das legislações, principalmente dos leilões de energia para empreendimentos centralizados.

As usinas fotovoltaicas centralizadas têm características típicas que requerem um processo especial de estruturação do empreendimento. A apresentação dessas características e funções dos componentes principais das usinas, bem como as soluções comercialmente disponíveis foi importante para contextualizar tecnicamente os projetos dessa modalidade e seu desempenho esperado. Em relação às principais etapas da obra e planejamento da construção de uma UFV, informações sobre o escopo, tempo e custo do projeto foram introduzidas, bem como técnicas de planejamento com intuito de melhorar a produtividade na construção, a qual está intimamente ligada á esta etapa.

3. METODOLOGIA

Como citado nos objetivos deste trabalho, foram comparadas inicialmente duas opções de suporte de painéis considerando a opção clássica fixa, onde os módulos permanecem estáticos de acordo com a posição inicial de instalação, e estruturas móveis com seguimento azimutal (leste-oeste) com giro em torno do eixo fixo N-S. Esta opção de seguidor vem sendo amplamente aplicada mundialmente, com diversos fornecedores especializados neste produto, demonstrando a atratividade frente às demais opções de seguimento. Optou-se por comparar o rendimento das duas opções em cinco faixas de latitude no Brasil, caracterizando diferentes condições de incidência solar, as quais interferem na irradiação que alcança o plano dos dois tipos de suporte. Foram utilizadas duas tecnologias de módulos fotovoltaicos e as configurações foram aplicadas de forma compatível para uniformizar a comparação. Para análise técnica e estimativa de produção de energia foi utilizado o *software* PVsyst, que permite a modelagem das variáveis ambientais e características dos equipamentos e parâmetros elétricos e físicos dos sistemas, dando como resultado a produção anual de energia do sistema. Para análise econômica foram considerados os custos dos principais componentes e mão de obra aplicada, bem como gastos com operação e manutenção.

Na sequência inicia-se a seção com abordagem prática referente a uma usina solar com a opção de suporte com seguimento de eixo horizontal, tomando como base um caso prático de construção. Com intuito de indicar o método e a sequência geral de montagem, são apresentadas as principais características do *tracker* utilizado, com foco nas tolerâncias e critérios que guiam as instruções de montagem apresentadas.

Com o objetivo de expor o planejamento geral da construção da usina em questão foi apresentados o escopo base do projeto e indicadas as principais características técnicas e físicas do empreendimento. Quanto ao cronograma, foi comparada a versão base anterior às definições de projeto, com o cronograma aplicado para a execução da obra, verificando as diferenças aplicadas. Em paralelo foi proposta uma abordagem através de técnicas de planejamento, para formulação do plano de ataque da etapa de montagem mecânica. Para esta etapa em especial foi indicado o desmembramento adotado em subetapas e técnicas utilizadas para analisar o plano proposto.

Por fim, com objetivo de verificar as curvas de produção efetiva e avaliação dos fatores de interferência, dados reais de construção foram coletados para verificar o fluxo de montagem atingido para etapa de montagem mecânica.

3.1 ANÁLISE DE ALTERNATIVAS DE SUPORTE DOS PAINÉIS EM UMA UFV

Foram analisadas e comparadas duas opções de suporte de módulos fotovoltaicos:

- Suporte Fixo. Opção clássica, com inclinação e orientação fixas.
- Suporte Móvel. Opção que requer esquema de acionamento e programação de posicionamento, em específico o modelo de eixo horizontal N-S.

Com o objetivo de identificar diferenças de desempenho e custo, foram utilizados dados de casos práticos, informações de mercado e foram também realizadas simulações de produção de energia. A seguir são apresentadas considerações sobre o processo metodológico.

3.1.1 DADOS AMBIENTAIS E SIMULAÇÃO DE GERAÇÃO DE ENERGIA

- *Software* utilizado para simulação da incidência de irradiação e produção de energia: PVsyst (versão 6.6.3). Ressalta-se que não as simulações não foram seguidas de medições em campo, pois a usina em questão ainda estava sob construção.
- Índices de perdas aplicados e premissas:
- A energia calculada foi aferida na saída dos inversores, portanto não foram consideradas perdas c.a. nos sistemas;
- As perdas no circuito c.c. aplicadas foram as mesmas para os todos os casos estudados;
- Para os sistemas de módulos multicristalinos foi considerada a perda por LID de 1,5 %;
- Não foram considerados ganhos e perdas espectrais, pois o *software* utilizado não possui esta capacidade. Vale ressaltar que a tecnologia filme fino possui ganhos neste quesito conforme já identificado na literatura, principalmente em

climas tropicais. (POLO et al., 2017) (ALONSO-ABELLA et al., 2014)

- Métricas de desempenho utilizadas: Produção anual de energia, Yield – Rendimento energético do sistema fotovoltaico e PR – Taxa de desempenho do sistema
- Fonte de Dados ambientais: Meteonorm 7.1
- Dados referenciais dos locais simulados conforme Tabela 7:

Tabela 7 – Dados de localização dos locais simulados

LOCAL	Lat (°)	Long (°)
Florianópolis	-27,59	-48,55
Chapeco	-27,10	-52,62
Vitória	-20,30	-40,30
Campo Grande	-20,47	-54,62
Caetité	-14,06	-42,49
Cuiabá	-15,60	-56,09
Maceio	-9,65	-35,71
Palmas	-10,25	-48,32
Natal	-5,78	-35,20
Teresina	-5,09	-42,80

Foram escolhidos dez (10) locais reunidos em cinco (5) grupos de acordo com a latitude correspondente. Buscou-se variar a longitude, para ser possível comparar dados de locais mais próximos do litoral com aqueles posicionados no interior do país. Na Figura 17 estão posicionados no mapa os locais escolhidos.

Figura 17 – Localização dos sites simulados (cores iguais representam locais com latitudes semelhantes)

3.1.2 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS CONSIDERADOS

Foram simuladas duas tecnologias de módulos FV. Uma representa os módulos clássicos com células de silício multicristalino e a outra a tecnologia de segunda geração ou filmes finos, neste caso com módulos de telureto de cadmio (CdTe). As características principais dos módulos estão resumidas na Tabela 8 abaixo.

Tabela 8 – Dados principais dos módulos FV simulados

	Tecnologia	Potência	Tensão máx	Fabricante	Modelo	Dimensões	Eficiência
1)	p-Si	350 W	1,5kV	Canadian Solar	CS6U	1,96 x 0,99 m	18,0%
2)	filme fino (CdTe)	445W	1,5kV	First Solar	Serie 6	2,0 x 1,23 m	18,1%

3.1.3 CONFIGURAÇÃO ELÉTRICA PADRÃO DOS SISTEMAS

A configuração do sistema depende da compatibilidade das características elétricas do inversor com a tensão obtida a partir do arranjo dos módulos em condições de operação. As duas tecnologias de módulos testadas possuem níveis de tensão por unidade diferenciada, o que resulta na obtenção de diferentes dimensionamentos em termos de número de unidades em série ligadas ao modelo de inversor escolhido. Abaixo na Tabela 9 segue quadro que estabelece a configuração aplicada para os dois casos.

Tabela 9 – Dados principais da configuração adotada nos sistemas

	Tecnologia	Potência	Mód/ string	Nº de strings	Pot. CC do sistema	Pot. Inv.	Nº de Inv.
1)	p-Si	350 W	30	120	1.260 kWp	1.050 kVA	1,0
2)	filme fino (CdTe)	445W	6	472	1.260,2 kWp	1.050 kVA	1,0

Para algumas perdas do sistema, que podem ser inseridas manualmente no programa de simulação e garantidas na operação do parque através de critérios de projeto e rotinas de manutenção, como perdas ôhmicas nos cabos e perdas por sujidade, foram adotados valores idênticos para todas as variáveis estudadas.

3.1.4 ESTRUTURAS DE SUPORTE E LAYOUTS

Como os dois modelos de módulos FV estudados não possuem dimensões idênticas e também necessitam esquemas de interligação diferentes para compatibilidade com o inversor, as estruturas de suporte não possuem dimensões iguais. Porém buscou-se adotar conjuntos com

dimensões compatíveis; já as inclinações e distanciamentos adotados foram iguais, quesitos que influenciam diretamente o rendimento e taxa de ocupação das soluções.

Para os sistemas do tipo *tracker* foi escolhido o modelo mais comum e com custo-benefício conhecido em termos de fornecimento, montagem e flexibilidade de adaptação às condições do terreno. Para a estrutura fixa, a qual está exposta a esforços mecânicos menores em relação à opção móvel, principalmente pela inclinação reduzida, considerou-se uma mesa padrão com maior largura. Em termos de distanciamento entre mesas, tomou-se como critério a aplicação de espaço livre mínimo de 3 metros entre as mesmas, além de perda máxima prevista de 2 % por sombreamento mútuo para os sistemas fixos e 3% para os sistemas com uso do *tracker*. Esses valores foram adotados como critérios de perda máxima admitida de projeto.

Abaixo na Tabela 10 são apresentados os dados para cada uma das condições modeladas.

Tabela 10 – Características principais dos conjuntos de suporte adotado

	Tecnologia	Disposição	Largura (m)	Módulos/ mesa	Comp. da mesa (m)	Pitch (m)	GCR
TRACKER	p-Si	1 Vertical	2	60	60	5	0,40
	filme fino			48			
FIXO	p-Si	2 Vertical	4	120		7	0,57
	filme fino			96			

O GCR (ground cover ratio) corresponde à taxa de ocupação e representa em termos proporcionais qual porcentagem da área ocupada pelo sistema é útil (fotoativa). Basicamente divide-se a largura da mesa pelo pitch (distancia entre eixos das fileiras) ou a área total ocupada pela soma da área unitária dos módulos FV.

Foi considerado o uso do recurso *backtracking* na opção com *tracker*. Esta programação evita que no início e fim do dia uma fileira faça sombra nas demais subsequentes, rotacionando as mesas de acordo com o ângulo zenital do sol e características dimensionais do seguidor, reduzindo o efeito do sombreamento com melhor aproveitamento do sol. (LORENZO; NARVARTE; MUÑOZ, 2011)

A inclinação utilizada para simulação dos sistemas fixos foi adotada tendo como referencial inicial os resultados constatados por Santos (2013), que definiu as inclinações com máxima média diária de irradiação para todas as capitais do Brasil utilizando o software Radiasol. Porém este estudo foi concebido com direcionamento para sistemas aplicados em telhado com um único arranjo de painéis. Como neste trabalho a influência do sombreamento mútuo entre fileiras nas usinas de grande porte tem importante relevância, a definição final das inclinações adotadas foi aferida através do Software PVsyst, o qual possui esta funcionalidade. Como a largura das mesas e os distanciamentos foram previamente definidos através de critérios preliminares, a inclinação do sistema fixo foi definida através da obtenção do melhor rendimento médio para os locais com a mesma latitude.

3.1.5 ANÁLISE DE CUSTO BENEFÍCIO DO USO DA OPÇÃO COM *TRACKER*

O intuito principal desta análise é a comparação entre a opção com o uso de um *tracker* e fixa para cada um dos locais estudados. São apresentados os custos principais aplicados na construção dos empreendimentos solares e não são considerados custos periféricos prévios à instalação, como aqueles aplicados às licenças, processos fundiários e gestão de processos aquisitivos e contratuais em geral. Seguem algumas considerações sobre o processo metodológico:

- Não é considerada a diferença de custo entre os locais de instalação, devido a processos logísticos e relacionados à infraestrutura disponível;
- É considerada a seguinte divisão dos custos para os estudos:
    - Módulos fotovoltaicos;
    - Estruturas de suporte;
    - Subestações unitárias (inversores, transformador de MT e proteções).
    - Custo de integração do sistema (projeto, montagem e gestão da construção) e demais equipamentos e materiais.

- Um caso base de custo foi criado com referencias de mercado, orçamentos e levantamentos realizados por empresa atuante no setor de projeto e montagem de sistemas de grande porte.
- A partir deste caso base diferentes cenários foram criados simulando a variação percentual dos custos indicados acima;
- Em relação ao custo de integração e BOS do sistema:
    - A fundação da estrutura de suporte considerada é do tipo haste metálica cravada, para ambos os casos;
    - A diferença de montagem entre as opções de suporte foi considerada;
    - Diferenças de BOS, referente aos sistemas com módulos de filme fino e p-Si foram desconsideradas;
    - Diferenças de BOS referente à adoção da estrutura fixa ou *tracker* foram consideradas.
- Quando o valor referencial coletado tem vínculo ao dólar, como no caso dos módulos FV, foi considerada cotação vigente no momento desta análise (junho/2017) quando na média a relação era de 3,3 R$/US$. O valor em dólares por Wp adotado para os módulos FV corresponde a um custo CIF (já entregue em porto nacional), em cima deste foi aplicado uma alíquota média de 1,25, correspondente aos tributários, trâmites alfandegários e logísticos;
- O custo de O&M dos sistemas com estrutura fixa e com tracker foi de 1% do investimento inicial por ano de operação.
- Os números apresentados têm caráter comparativo, não tendo como objetivo formular orçamentos;
- O intuito deste trabalho é o de comparar uma mesma modalidade de geração, apenas com diferenças construtivas, assumindo-se tempos de vida útil e

capacidades instaladas iguais, apenas com diferentes custos de investimento inicial e de geração. A metodologia de comparação foi baseada no custo nivelado da energia (Levelized Cost of Energy - LCOE), métrica que é bastante utilizada em estudos comparativos entre fontes de geração de energia elétrica. A metodologia relaciona os custos durante a vida útil do sistema e a energia total gerada no mesmo período. (SAID, EL-SHIMY, ABDELRAHEEM, 2015). O LCOE pode ser calculado através da seguinte equação:

$$LCOE = \frac{C_0 + \sum_{t=1}^{T} \frac{C_t * (1+i)^t}{(1+j)^t}}{\sum_{t=1}^{T} \frac{E_t * (1+d)^t}{(1+j)^t}}$$ Equação 1

t: período considerado, onde T é tempo máximo de vida útil do empreendimento;

Ct: custos do empreendimento no período t;

i: inflação considerada;

Et: energia gerada pelo empreendimento no período t;

d: degradação do sistema FV;

j: taxa de desconto, onde pode ser considerada a TMA.

Em relação ao Ct (custos do empreendimento no período t) foi vinculado basicamente aos custos de O&M, com valores relacionados ao custo inicial de instalação.

Os valores adotados para as variáveis são listados a seguir:

- t= 20 anos
- Ct= Variável
- i= 6,5 %
- Et = Variável

- d= -0,5 %
- j= 9 %

3.2 FLUXOGRAMA DE TRABALHO DA ETAPA DE MONTAGEM MECÂNICA

Considerando o enfoque do trabalho na etapa de montagem mecânica, tem-se como objetivo elaborar um fluxograma ou procedimento de trabalho, contendo a sequência de atividades e orientações de montagem nesta seção, a partir de uma descrição das características do conjunto e principalmente das tolerâncias relacionadas ao alinhamento e estabilidade estrutural definidas na etapa de projeto, são apresentados os critérios e premissas de base que guiarão o procedimento de montagem a ser estabelecido.

Destaca-se que serão apresentadas instruções referentes a um seguidor multi-fileira, o qual apresenta critérios de montagem e alinhamento mais complexos em comparação ao modelo mono-fileira. Isto se deve basicamente pela movimentação simultânea de diversas fileiras, no entanto as orientações gerais de montagem e composição dos conjuntos são muito similares e podem ser consideradas.

3.2.1 DESCRIÇÃO TÉCNICA DO *TRACKER* CONSIDERADO

O *tracker* pode ser dividido em três partes:

- Fundação
- Estrutura de acionamento e suporte (mesas de suporte)
- Módulos e fixadores

Abaixo são indicadas as principais dimensões e características dos conjuntos e partes e outros subgrupos.

3.2.1.1 DIMENSÕES DO CONJUNTO

A planta geral do *tracker* e indicação das principais cotas são ilustradas na Figura 18.

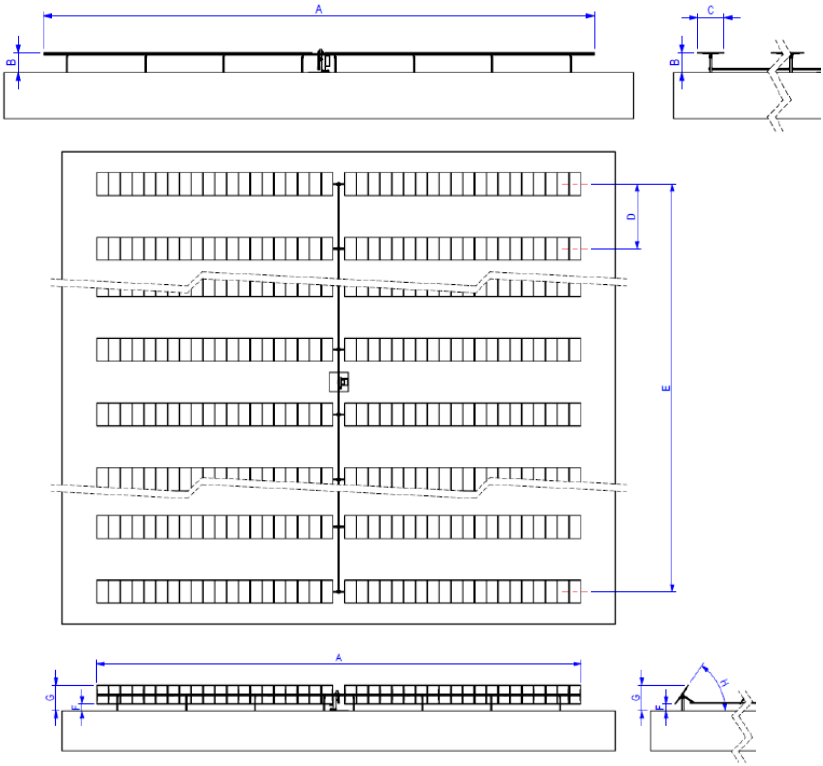


Figura 18–Planta e corte do tracker (STI, 2017 adaptado)

As cotas indicadas na Figura 18são tabeladas a seguir na Tabela 18 que contém todas as medidas fixas do *tracker* (A, D, C, F e H) e aquelas que podem variar (B, E e G) de acordo com ajustes de altura da fundação, sendo aqui apresentados os valores mínimos. Na segunda parte da tabela são indicados os valores da dimensão longitudinal (E – W) que é proporcional ao número de fileiras do *tracker*, 8, 12 ou 16.

Tabela 11 - Dimensões dos seguidores (*trackers)*

Dimensões gerais	Valores (mm)	Nº de Fileiras	E (mm)
A	36.920	16	102.345
B	1.550	12	75.053
C	2.487	8	47.761
D	6.823		
E	102.345		
F	475		
G	2.517		
H (º)	±55		

3.2.1.2 FUNDAÇÃO

Dentre as opções de fundação disponíveis, neste projeto considerou-se a aplicação da haste metálica cravada com possibilidade de três variações:

- Cravação direta
- Pré-furação e cravação
- Mini tubulão

Estas opções estão em ordem de prioridade e podem ser escolhidas de acordo as condições encontradas em campo, como por exemplo, locais com a presença de rochas.

Dois tipos de hastes são previstos para atender diferentes esforços resultantes do funcionamento do *tracker*. (1) Haste central que é aplicada nas duas linhas adjacentes ao eixo E –W e (2) demais hastes do conjunto. Um terceiro tipo de haste é projetado para fixação do conjunto de acionamento.

3.2.1.3 ESTRUTURA DE ACIONAMENTO E SUPORTE

A seguir através da Figura 19 é ilustrado um *tracker* multi-fileira padrão com a identificação dos seus principais componentes, com destaque para o acionamento central e conexão entre a biela (eixo EW) e vigas de torção (eixo NS). Na sequência da seção os componentes são

descritos em relação às suas características e função no movimento do *tracker*.

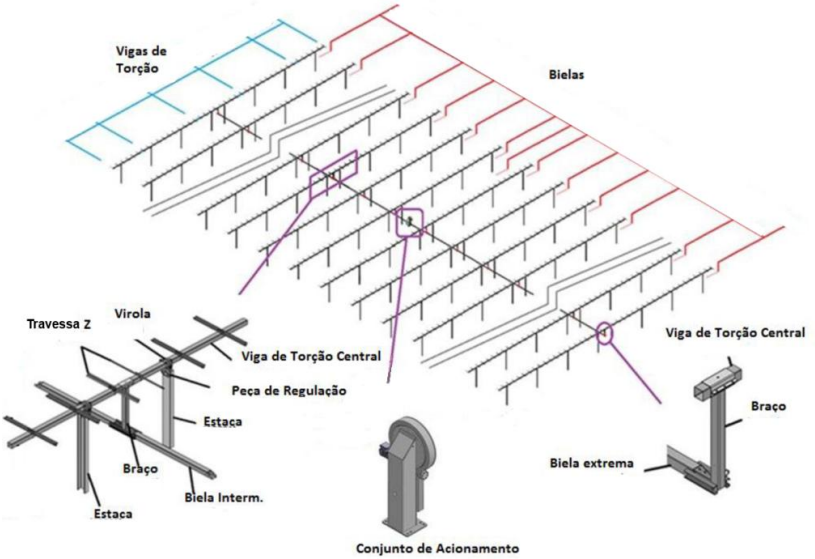


Figura 19 – Visão geral do *tracker* multifileira e seus princpais componentes. (STI, 2017 adaptado)

3.2.1.3.1 ACIONAMENTO

O conjunto de acionamento (Figura 20) é um sistema eletromecânico composto por um motor e sistema de rotação que move um braço que se une à biela que transmite a força para as demais peças. O conjunto é unido à fundação através de um suporte metálico que serve de apoio para as demais peças.

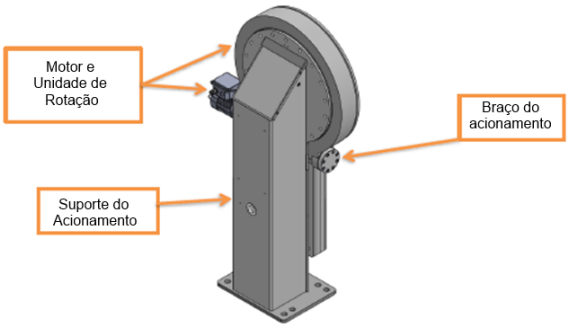


Figura 20 – Componentes do acionamento do *tracker* (STI, 2017 adaptado)

Junto ao sistema de acionamento uma unidade de controle, baseada em algoritmos relacionados à posição solar garantem alta precisão de movimentação leste-oeste do conjunto gerador.

3.2.1.3.2 SISTEMA DE REGULAÇÃO E ROTAÇÃO

As vigas de torção são unidas com as fundações de suporte através do sistema de regulação e rotação, o que permite o movimento do *tracker*. Ao mesmo tempo este sistema absorve possíveis desvios na posição do suporte.

3.2.1.3.3 VIGAS DE TORÇÃO E BRAÇOS

A viga de torção é formada por tubos unidos por presilhas de junção. Esta peça é responsável por transmitir o movimento para os módulos fotovoltaicos.

Na parte central da viga de torção são instalados os braços que transmitem o movimento da biela para as vigas de torção.

3.2.1.3.4 BIELA

A biela é o sistema que transmite o movimento entre o braço do acionador para as vigas de torção. A peça consiste em tubos de aço unidos por perfis C de junção.

3.2.1.3.5 TRAVESSAS DE SUPORTE DOS MÓDULOS

As travessas são as peças de suporte direto dos módulos fotovoltaicos. São unidos através de parafusos com as vigas de torção.

3.2.1.4 MÓDULOS FV (E PRESILHAS DE FIXAÇÃO)

Os módulos fotovoltaicos com molduras podem ser unidos diretamente às travessas através de parafusos. No contexto do presente projeto os módulos não possuem moldura, sendo obrigatoriamente necessária uma presilha especial fixada à travessa que permite a união dos módulos à estrutura.

3.2.2 CONDIÇÕES E TOLERÂNCIAS DE INSTALAÇÃO

Para que haja garantia de funcionamento contínuo e estável do *tracker*, condições e critérios instalação devem ser avaliados durante o projeto de instalação. Com implicações estruturais e de operação, condições do terreno e tolerâncias de funcionamento devem ser consideradas:

1) Altura máxima de instalação dos módulos;
2) Altura mínima de instalação dos módulos;
3) Declividade máxima do eixo de suporte dos módulos (viga de torção) no sentido NS;
4) Declividade máxima do eixo de acionamento dos módulos (biela) no sentido LO;
5) Cravação mínima da fundação metálica para garantia de atendimento dos esforços previstos.
6) Extensões disponíveis de hastes;
7) Topografia precisa do local de instalação
8) Movimentação e regularização do terreno

O item 1 é ditado normalmente por questões relacionadas à viabilidade e comodidade de montagem. Já o item 2 pode levar em consideração possibilidade de circulação de animais, eventos de

alagamentos, porém normalmente é limitado pela distancia mínima (em torno de 50 cm) do solo em condição de maior declividade da mesa.

Os itens3 e 4 são resultado dos estudos estruturais e de operação feitos pelo fabricante que permitem indicar condições limite de funcionamento em termos de alinhamento que não gerem esforços não projetados e desgastes nos acionamentos, conexões e peças de suporte.

O item 5 é resultado do estudo que tem como dados de entrada:

- Formato e material da haste metálica
- Caracterização do solo por meio de estudos geológicos
- Estudo estrutural de esforços variáveis e permanentes
- Atendimento dos critérios normativos e de segurança

Devido a desvios temporais entre o processo de fornecimento da estrutura e engenharia executiva, não é comum confirmar previamente ao início de fabricação, a extensão necessária de todas as hastes metálicas do projeto. Para que o processo de fabricação das peças inicie, uma modelagem preliminar normalmente é realizada gerando um número de hastes com variação de extensão para o projeto. O estudo de distribuição e uso das hastes para atendimento dos critérios de projeto, deve casar com o número disponível de cada tipo de haste.

Por fim para o estudo ser efetivo, informações topográficas precisas do local de instalação devem estar disponíveis. É importante que o levantamento seja realizado posteriormente às atividades de supressão vegetal e regularização do terreno. A precisão do levantamento das cotas é indispensável para o processo, para que se avaliem, considerando os critérios citados, opções possíveis de alinhamento, evitando a priori trabalhos de regularização e movimentação do terreno (item 8), necessários em certas ocasiões para criar condições mínimas de trabalho.

3.2.2.1 DECLIVIDADE DO TERRENO

O *tracker* é idealmente projetado para uma montagem em terreno totalmente horizontal (declive de 0%) na direção N - S, e sem declive ou declive constante no sentido L - O.

No entanto, o *tracker* pode operar mecanicamente em terreno com os seguintes declives máximos:

- DIREÇÃO L-O: Inclinação máxima permitida em uma direção de até 5%.
- DIREÇÃO N-S: Inclinação máxima permitida de até 5%.

O *Tracker* não é perfeitamente horizontal quando se usufrui dos declives mencionados. Outras inclinações podem ser usadas com o estudo prévio do fabricante.

3.2.2.2 INCLINAÇÃO DOS EIXOS

- Biela: declividade L – O deve ser retilínea, com inclinação máxima de 5%.
- Viga de torção:
    - A declividade N – S deve ser retilínea, com inclinação máxima de 5%.
    - A declividade de dois eixos adjacentes deve ter variação máxima de 0,5%.
    - Todas as vigas de torção devem girar em torno do seu ponto médio ou eixo central, que é a linha de inclinação da biela.

3.2.2.3 FUNDAÇÃO (HASTES METÁLICAS)

Os suportes têm tolerâncias de instalação relacionadas à profundidade de cravação, verticalidade, rotação e posicionamento.

3.2.2.3.1 PROFUNDIDADE DE CRAVAÇÃO

Para cada um dos dois tipos de hastes previstos, uma profundidade mínima de cravação é necessária, que pode aumentar de acordo com a altura externa prevista e se o solo no local sofreu intervenção.

3.2.2.3.2 VERTICALIDADE

No caso de qualquer suporte estar inclinado mais de 2º da sua posição vertical na direção N - S, ou superior a1 º na direção L - O, o suporte afetado deve ser extraído e substituído por um novo.

- Desvio Vertical Máximo N - S: ± 2º
- Desvio Vertical Máximo L - O: ± 1º

3.2.2.3.3 ROTAÇÃO

No caso de qualquer suporte ter rodado mais de 3º de sua posição teórica, esse deve ser extraído e substituído.

- Desvio Máximo de Rotação: ± 3º

3.2.2.3.4 POSICIONAMENTO

Se os suportes forem instalados deslocados da sua posição teórica, descumprindo as tolerâncias a seguir indicadas nas Tabela 12 e Tabela 13, devem ser instalados novamente.

- Desvio do Eixo X (L - O)máximo: ± 50 mm
- Procedimento de verificação: Desvio com base na verticalidade:

Tabela 12 – Desvio máximo do perfil de suporte – Direção L-O

0°	0,25°	0,5°	0,75°	1°
50mm	45mm	40mm	35mm	30mm

- Desvio do Eixo Y (N - S) máximo: ± 50 mm
- Procedimento de Verificação: Desvio com base na verticalidade conforme Tabela 13.

Tabela 13 – Desvio Máximo do Perfil de Suporte – Direção N-S

0°	0,25°	0,5°	0,75°	1°	1,25°	1,5°
50mm	45mm	40mm	35mm	30mm	25mm	20mm

No caso de qualquer suporte exceder a sua profundidade acima ou abaixo de 30 mm da sua posição teórica, rejeitada ou não, deve ser cravado o comprimento restante ou extraído e inserido novamente até a correção.

- Desvio do eixo Z máximo: ± 30 mm

3.2.3 PROCESSO DE MONTAGEM

No contexto deste trabalho, a montagem mecânica refere-se ao posicionamento e instalação das estruturas metálicas que dão suporte aos módulos fotovoltaicos. São instaladas estruturas seguidoras com eixo móvel N-S, que direciona o plano das placas para o leste no início do dia, com 55º de inclinação, finalizando o ciclo no fim do dia na direção oeste com a mesma inclinação final. Através do estudo do material técnico disponibilizado pelo fornecedor dos *tracker*s foram organizadas as informações a respeito das especificações e instruções montagem seguindo as características principais a seguir:

1) Projeto e engenharia
    a. Testes geológicos e estudos para definição das fundações
    b. Estudo da topografia e alinhamento das estruturas frente às tolerâncias funcionais
2) Etapas principais de montagem
    a. Hastes de fundação
        i. Posicionamento georreferenciado dos locais de cravação das hastes metálicas de fundação
        ii. Alinhamento dos eixos de cravação
        iii. Cravação das hastes
        iv. Conferência do resultado e ajustes

b. Travessas e eixos de acionamento
    i. Posicionamento das estruturas
    ii. Instalação e fixação
    iii. Pré-testes
c. Fixação dos módulos
    i. Pré-instalação: descarregamento, coleta e posicionamento.
    ii. Posicionamento e encaixe
    iii. Fixação
    iv. Conferência de torque

3.3 PLANO DE CONSTRUÇÃO DE UMA UFV DE GRANDE PORTE

Para que as questões relacionadas à implantação de uma usina fotovoltaica com foco no plano de construção fossem analisadas, utilizaram-se dados originários de uma obra real com características que serão predominantes nos empreendimentos que vêm sendo instalados no Brasil como segue:

- Localização distante de áreas metropolitanas;
- Terreno predominantemente plano;
- Uso de estrutura móvel do tipo *tracker* de eixo horizontal;
- Utilização de inversores centralizados;
- Uso de hastes metálicas cravadas como elemento de fundação das estruturas;
- Aplicação restrita de concreto;

A partir dos dados da empresa responsável pela construção serão elaborados os seguintes produtos referentes ao plano de construção.

3.3.1 ESCOPO DO PROJETO

O principal elemento a ser apresentado para caracterizar este produto será a EAP (Estrutura Analítica do Projeto). Com ela será ilustrado o escopo previsto do empreendimento e delimitação considerada para este estudo atendendo os requisitos do projeto.

No caso base considerado para este estudo a empresa responsável pela integração e construção da usina foi contratada para as seguintes atividades:

- Gerenciar, projetar, prestar serviços de engenharia, fornecer, transportar, descarregar, construir, montar, instalar, comissionar, testar, concluir e reparar, e demais atividades que se fizerem necessárias à completa implantação da Usina Solar, atendendo a Especificação Técnica anexa ao contrato.

Para este trabalho as atividades de construir, montar e instalar foram estudadas em específico, direcionando o foco do trabalho para a etapa construtiva da obra. Abaixo são listadas as informações base de escopo no contexto desta proposta de estudo.

- Informações de base
    - Local do projeto: área rural de município no interior do Rio Grande do Norte;
    - A unidade geradora deverá possuir 30MW de potência instalada (soma da potência nominal dos inversores); do ponto de vista elétrico o projeto será dividido em 10 subparques de 3 MWac;
    - A potência de pico (c.c.) instalada é equivalente a 36,7 MWp (soma da potência nominal dos módulos fotovoltaicos);
    - O período total de obra deve ser de oito meses;

Com essas considerações foi apresentada a estruturação da fase de implantação do empreendimento, destacando todas as atividades necessárias para conclusão desta etapa. Foram também apresentadas resumidamente as fases prévias à construção, contextualizando o processo completo de viabilização de uma usina solar de grande porte.

3.3.2 CRONOGRAMA DO PROJETO

Para avaliação deste item no projeto em questão foi realizada uma comparação do cronograma pré-executivo, o qual gerou a linha de base do projeto em fase anterior à construção (em torno de seis meses), com o cronograma aplicado em obra, após emissão dos projetos executivos e consolidação das informações técnicas aplicadas.

Na sequência foi proposto método de planejamento e realizada comparação com as versões geradas durante o projeto. Foram comparados os tempos adotados por etapa, número e rendimento das equipes e forma de estruturação das atividades.

Em concernência com o direcionamento indicado para o escopo do projeto, a análise do cronograma e plano de ataque foi focada na etapa construtiva, em especial na parte de montagem civil mecânica das estruturas de suporte e módulos. As demais etapas, predecessoras e posteriores a esta fase, são indicadas no cronograma, porém não são avaliadas em específico.

Para esta etapa de análise do cronograma foi aplicada a seguinte sequencia:

- Verificação das definições e sequenciadas atividades
- Análise dos recursos e durações das atividades
- Análise do plano de ataque e formato geral do cronograma

O processo foi realizado com auxilio da ferramenta MS Project e Excel.

3.3.2.1 ESTRUTURAÇÃO DE EQUIPES E PLANO DE ATAQUE

A etapa de montagem mecânica representa o maior período dentro do cronograma. Nesta etapa a obra aflora e aparecemos maiores desafios de logística e estratégia de execução; representa uma etapa diferencial e foi analisada em específico. Seguem considerações sobre o processo metodológico adotado para esta etapa.

- Um modelo específico de *tracker* de eixo horizontal multi-fileira com acionamento central, foi considerado para o estudo;
- O plano de ataque de montagem foi estudado confrontando cenário baseado em blocos padrão de 1,0 e 3,0 MW de potência, com potência c.c., ou seja, número de módulos fotovoltaicos variável;
- Quanto à referência de índices de produtividade de montagem, foram consultados vídeos e relatórios de empresas do setor e fornecedores de estruturas de suporte do tipo *tracker*s.
- Com base nas metas de prazo do estudo de caso apresentado foi adotado período máximo esperado para finalização de cada etapa;
- O período de tempo a que se refere o levantamento é definido como diário ou semanal, (9 horas trabalhadas a cada dia);
- Equipe considerada: montadores, ajudantes e condutores (mão de obra direta);
- Foi utilizada a ferramenta de gerenciamento "linha de balanceamento" para avaliar o fluxo das equipes;
- Tem-se como objetivo alcançar sincronia entre as etapas subsequentes, analisando o número de equipes, produtividade e período de obra para caso colocado.
- O processo foi realizado com auxilio da ferramenta Excel
- Três etapas intermediárias durante o processo de montagem mecânica, listadas a seguir, são consideradas;

Tabela 14- Etapas da implantação da montagem mecânica

ETAPAS DE MONTAGEM CIVIL MECÂNICA DO *TRACKER*
Fundações (cravação de hastes metálicas)
Estruturas de acionamento e suporte (mesas)
Módulos Fotovoltaicos

A unidade produtiva aplicada foi a seguinte:

a. Fundação: número de hastes cravadas ou fileiras (compostas por oito hastes)

b. Mesas: número de fileiras montadas;

c. Módulos FV: número de módulos ou fileiras (composta apor cento e vinte módulos)

3.4 ACOMPANHAMENTO DO PLANO E ANALISE DE FATORES DE INTERFERÊNCIA NA ETAPA DE MONTAGEM MECÂNICA

A partir dos dados que serão cedidos pela empresa responsável pela construção da usina, serão analisadas as seguintes variáveis referentes à fase de implantação:

1. Logística e gestão dos materiais no local
2. Produtividade de Montagem;
3. Estratégias de implantação;
4. Composição de equipes;
5. Atendimento e ajustes do cronograma;
6. Interferências climáticas e força maior;
7. Experiência e treinamento

Os itens serão abordados de maneira descritiva com intuito de destacar o impacto na frente de obra e como cada tópico foi trabalhado durante a execução do empreendimento. Serão identificados padrões e especificidades que caracterizem as usinas solares, bem como similaridades com empreendimentos compatíveis, através da análise de referências bibliográficas.

Quanto ao acompanhamento e analise da produtividade física relacionada à mão de obra na etapa de montagem mecânica, as etapas já citadas serão consideradas e analisadas de maneira separada.

Pretende-se realizar a aferição da produtividade de maneira direta conforme Souza (2000) apresenta, a qual diz respeito à quantificação da mão-de-obra necessária (expressa em homens-hora) para se produzir uma unidade da saída.

Definiram-se algumas regras para mensuração das entradas e saídas:

- O período de tempo a que se refere o levantamento será definido como semanal (6 dias úteis e 9 horas trabalhadas a cada dia); serão desconsideradas horas extras e períodos de improdutividade forçada devido a quebras de equipamentos e problemas de ordem maior, quantificando-se apenas o tempo útil da mão de obra;
- O cálculo do número de homens-hora demandados é fruto da multiplicação do número de homens envolvidos pelo período de tempo de dedicação ao serviço.

Ao observar diretamente, medir e documentar o avanço físico da etapa citada do processo de instalação, a pesquisa irá identificar fatores relevantes que afetam a produtividade da instalação.

O método de coleta de dados das atividades no local será através de relatórios de avanço da obra e imagens adquiridas por dispositivo fotográfico, com utilização de foto e vídeo.

4 RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados da pesquisa, primeiramente em relação ao objetivo inicial referente à comparação do sistema de suporte fixo e *tracker*, demostrando os resultados de geração de energia e desempenho para diferentes regiões do Brasil. Em seguida, por meio da análise econômica, o intuito foi verificar diferenças entre as regiões analisadas quando aplicadas algumas variações de custos no principais itens do orçamento.

Sobre o fluxograma de trabalho da etapa de montagem mecânica, foram apresentadas as características do processo aplicado para instalação do sistema seguidor, dando instruções gerais quanto à instalação da fundação, da estrutura de acionamento e suporte e dos módulos FV, com intuito de demonstrar especificidades aplicadas a este tipo de instalação.

Em relação ao plano de construção, o objetivo foi apresentar o escopo de projeto previsto e atividades que compõe a construção de uma usina solar de grande porte. Foram também mostradas etapas gerais presentes anteriormente a fase executiva que permitem a estruturação de um projeto com tais características.

Na sequência foi apresentado o cronograma geral de construção do empreendimento, demonstrando a sequência das atividades, com foco na etapa de montagem mecânica que engloba basicamente a instalação completa da estrutura de suporte. Neste item foi estudado e proposto um método de formulação de plano de ataque e também comparado o cronograma pré-executivo e executivo de um empreendimento em construção.

Por fim sobre o acompanhamento do plano foi apresentado o progresso semanal da montagem mecânica registrado em obra até o momento da conclusão deste trabalho, realizando também a análise de fatores de interferência aplicados aos resultados.

4.1 COMPARAÇÃO DO SISTEMA DE SUPORTE FIXO E *TRACKER*

Nesta seção são apresentados os resultados de desempenho dos sistemas simulados para os distintos locais e são analisadas as diferenças encontradas entre as opções selecionadas, em termos técnicos e

geográficos. Na sequência os dados energéticos são modelados juntamente com os cenários orçamentários para verificação da atratividade das opções de suporte para diferentes localidades analisadas.

4.1.1 GERAÇÃO DE ENERGIA E DESEMPENHO

Abaixo na Tabela 15 são listadas as cidades simuladas e informações de localização e recurso solar.

Tabela 15 – Locais simulados- Dados de localização e recurso solar

Local	Latitude	Longitude	Irrad. Global (kWh/m².ano)	Irrad. Difusa (kWh/m².ano)
Florianópolis	-27,59	-48,55	1567	790,7
Chapecó	-27,1	-52,62	1764,4	736,5
Vitória	-20,3	-40,3	1842	793,6
Campo Grande	-20,47	-54,62	1934,4	761,5
Caetité	-14,06	-42,49	2059,3	792,4
Cuiabá	-15,6	-56,09	1857,4	855,8
Maceio	-9,65	-35,71	2005,8	869,5
Palmas	-10,25	-48,32	1857,8	815,9
Natal	-5,78	-35,2	2214,3	818,7
Teresina	-5,09	-42,8	2113,4	809,1

Na Tabela 16 são apresentados os valores de produção de energia, yield e PR para os sistemas simulados com a estrutura fixa, para as duas tecnologias estudadas.

Tabela 16 - Resultados energéticos – Sistemas com Estrutura Fixa - Produção (MWh/ano) Yield (MWh/MWp) e PR

		Filme fino			p-Si		
Local	inclin. (fixa) (°)	Prod.	Yield	PR	Prod.	Yield	PR
Florianópolis	20	1816	1443	0,858	1793	1423	0,846
Chapecó	20	2020	1604	0,848	1985	1576	0,833
Vitória	20	2078	1649	0,849	2030	1611	0,83
C. Grande	20	2185	1735	0,846	2133	1693	0,825
Caetité	15	2288	1817	0,853	2240	1778	0,834
Cuiabá	15	2058	1635	0,850	2004	1590	0,827
Maceió	10	2180	1732	0,858	2138	1689	0,837
Palmas	10	2052	1630	0,855	2002	1588	0,833
Natal	5	2409	1913	0,860	2340	1857	0,835
Teresina	5	2279	1810	0,850	2211	1755	0,824

Os resultados apontam para um desempenho em média de 2,4 % maior para os sistemas com tecnologia filme fino de CdTe, variando de 1,4% até 3%%. Em linhas gerais, as maiores diferenças são identificadas para os locais com menores latitudes e maiores índices de irradiação, no entanto, o fato principal é relacionado à temperatura média do local, devido os diferentes coeficiente de temperatura das duas tecnologias estudas. Verifica-se que na cidade de Caetité-BA, por exemplo, que apresentou uma alta produção de energia, reflexo da elevada irradiação no local, teve menor diferença entre as tecnologias do que Vitória-ES, com um índice menor de irradiação. Este fato deve-se à menor temperatura média encontrada na localidade no estado baiano em comparação com a capital capixaba.

Em termos de produção geral de energia, os resultados para os diferentes locais são basicamente proporcionais à irradiação. Vale destacar, porém, uma exceção importante, novamente citando Caetité, onde a produção para ambas as tecnologias foi maior em comparação à Teresina-PI, por exemplo, mesmo apresentando uma incidência solar menor.

Na Tabela 17 são apresentados os valores de produção de energia, yield e PR para os sistemas simulados com a estrutura do tipo *tracker*, para as duas tecnologias estudadas.

Tabela 17 - Resultados energéticos – Sistemas com *Tracker* - Prod. (MWh/ano) Yield (MWh/MWp) e PR

	Filme fino			p-Si		
Local	Prod.	Yield	PR	Prod.	Yield	PR
Florianópolis	2059	1635	0,851	2025	1607	0,836
Chapeco	2347	1864	0,838	2302	1827	0,82
Vitória	2431	1929	0,842	2370	1881	0,819
Campo Grande	2568	2040	0,837	2501	1985	0,813
Caetité	2719	2160	0,836	2657	2109	0,814
Cuiabá	2405	1911	0,838	2334	1852	0,811
Maceió	2621	2082	0,841	2550	2024	0,816
Palmas	2411	1915	0,838	2343	1859	0,813
Natal	2943	2338	0,842	2851	2263	0,814
Teresina	2756	2189	0,832	2663	2114	0,802

Os resultados expostos na Tabela 17 seguem a mesma tendência apresentada anteriormente, porém neste caso a diferença identificada é substancialmente maior, atingido 2,7 % entre as duas tecnologias estudadas.

Vale destacar que há incertezas associadas à expectativa de geração de energia, relacionadas aos fatores de perdas dos sistemas FV e modelagem utilizada, bem como dos dados de irradiação e variabilidade interanual dos mesmos. Neste trabalho o intuito das simulações foi meramente comparativo, as incertezas se aplicam assim, para ambos os cenários estudados, sendo válidas as diferenças percentuais apresentadas.

Os números expostos foram resumidos em índices comparativos entre as tecnologias na Tabela 18, onde os percentuais citados foram apresentados.

Tabela 18 - Índices comparativos entre tecnologias com mesma estrutura de suporte

Locais	Latitude	*Tracker* (p-Si/filme fino)		Fixo (p-Si/filme fino)	
		Yield (MWh/MWp)	PR	Yield (MWh/MWp)	PR
Florianópolis	-27,59	0,983	0,982	0,986	0,986
Chapeco	-27,1	0,980	0,979	0,983	0,982
Vitória	-20,3	0,975	0,973	0,977	0,978
C. Grande	-20,47	0,973	0,971	0,976	0,975
Caetité	-14,06	0,976	0,974	0,979	0,978
Cuiabá	-15,6	0,969	0,968	0,972	0,973
Maceió	-9,65	0,972	0,970	0,975	0,976
Palmas	-10,25	0,971	0,970	0,974	0,974
Natal	-5,78	0,968	0,967	0,971	0,971
Teresina	-5,09	0,966	0,964	0,970	0,969
Média		0,973	0,972	0,976	0,976

Na Tabela 19 são apresentados os índices comparativos entre os sistemas com *tracker* e estrutura fixa para cada local e tecnologia estudada.

Tabela 19 - Índices relativos de desempenho do sistema tracker sobre o fixo – geração e performance

Locais	Latitude	Filme fino		p-Si	
		Yield (MWh/MWp)	PR	Yield (MWh/MWp)	PR
Florianópolis	-27,59	1,133	0,992	1,129	0,988
Chapecó	-27,1	1,162	0,988	1,159	0,984
Vitória	-20,3	1,170	0,992	1,168	0,987
Campo Grande	-20,47	1,176	0,989	1,172	0,985
Caetité	-14,06	1,189	0,980	1,186	0,976
Cuiabá	-15,6	1,169	0,986	1,165	0,981
Maceió	-9,65	1,202	0,980	1,198	0,975
Palmas	-10,25	1,175	0,980	1,171	0,976
Natal	-5,78	1,222	0,979	1,219	0,975
Teresina	-5,09	1,209	0,979	1,205	0,973
Média		1,181	0,985	1,177	0,980

É notório o aumento da diferença relativa de desempenho dos sistemas na medida em que o local se aproxima da linha equador, variando de 13 % até mais de 20% nos locais com menores latitudes. Vale destacar diferenças encontradas para locais com mesmas latitudes, como entre Florianópolis e Chapecó, bem como para Cuiabá e Caetité. Os dois primeiros locais, respectivamente, apresentam maior taxa relativa de irradiação difusa o que não favorece o sobredesempenho do seguidor. Entre Maceió e Palmas também houve significativa diferença, porém, verifica-se que neste caso as irradiações difusas são compatíveis, até mesmo sendo maior para a capital de Alagoas. Para este evento constata-se que o resultado foi motivado pelo pequeno ganho atingido com a inclinação do sistema fixo em Maceió, o qual normalmente permite maior aproveitamento do recurso solar nos meses de inverno, nos quais está localidade possui redução significativa de incidência solar, em comparação com a capital do Tocantins.

Na Tabela 20 são apresentadas as médias de desempenho entre as duas tecnologias e também a média para as duas localidades selecionadas para cada faixa de latitude. São então mostrados os índices comparativos, reforçando a tendência de aumento do desempenho do

tracker em relação à opção fixa na medida em que a latitude é reduzida. Este comportamento é ilustrado na sequência graficamente na Figura 21.

Tabela 20 – Resultados médios entre tecnologias e latitudes

Locais	Latitude	Fixo Yield médio (Local/Lat.)		*Tracker* Yield Médio (Local/Lat.)		Diferença. por local	Diferença. por latitude
Florianópolis	-27,59	1433	1512	1621	1733	1,131	1,147
Chapecó	-27,1	1590		1846		1,161	
Vitória	-20,3	1630	1672	1905	1959	1,169	1,172
C. Grande	-20,47	1714		2013		1,174	
Caetité	-14,06	1798	1705	2135	2008	1,187	1,178
Cuiabá	-15,6	1613		1882		1,167	
Maceió	-9,65	1711	1660	2053	1970	1,200	1,187
Palmas	-10,25	1609		1887		1,173	
Natal	-5,78	1885	1834	2301	2226	1,220	1,214
Teresina	-5,09	1783		2152		1,207	

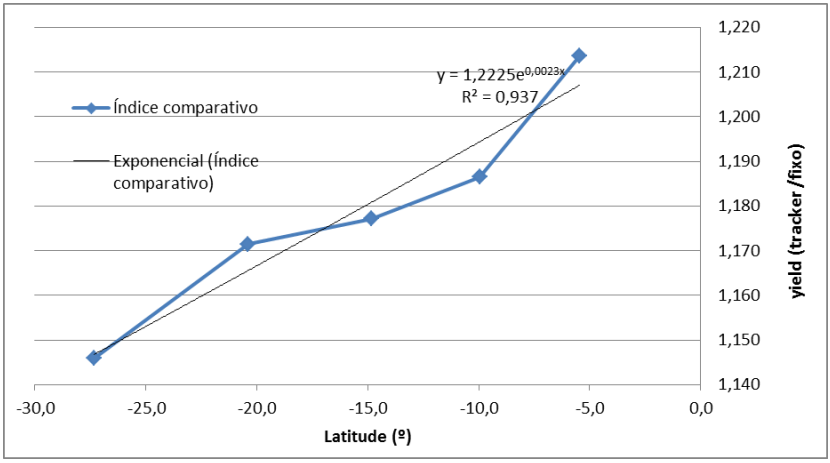


Figura 21 – Índice comparativo- desempenho do sistema com *tracker* sobre opção fixa.

4.1.2 ANÁLISE ECONÔMICA

Após verificação dos índices de desempenho do *tracker* em diferentes regiões do Brasil, foi realizada a análise econômica, pois são

verificados distintos orçamentos entre as opções de estrutura fixa e com *tracker*.

Optou-se por realizar a análise considerando o desempenho médio das duas tecnologias estudadas, bem como dos dois locais posicionados na mesma faixa de latitude. Assim em termos de desempenho cinco situações foram modeladas.

Em relação ao orçamento de construção, a composição de preços foi dividida em quatro itens: (1) módulos FV, (2) inversores [1], (3) estrutura de suporte e (4) BOS, este último relativo aos materiais complementares, obra civil e montagem. Desses quatro tem-se a seguinte avaliação referente aos respectivos orçamentos e influencia da opção de suporte:

(1) Módulos FV: Flutuação idêntica para os dois cenários, médio potencial de variação.

(2) Inversores: Flutuação identifica para os dois cenários, pequeno potencial de variação.

(3) Estrutura: Flutuação referente a cada opção, médio potencial de variação.

(4) BOS: Flutuação referente a cada opção, médio potencial de variação.

A análise foi realizada com foco comparativo, utilizando-se índices relativos. Tendo como base tais características formataram-se três cenários independentes para cada um dos itens, considerando os valores de orçamento do *tracker* fixados e realizando variações nos custos da opção fixa em termos percentuais em relação ao tracker onde tal influencia se constata (BOS e Estrutura). A seguir na Tabela 21 são apresentados os valores considerados para cada cenário, onde é possível conferir a estratégia de variação adotada. Os valores apresentados são relativos a uma planta com potência de 75 MWca, e 90 MWp cc.

[1] Resumido como inversores, este item representa toda estrutura de conversão e transformação nomeada como eletrocentro, skid ou cabine de conversão, composta por trafo de MT, sistema de comunicação e proteção.

Tabela 21 – Preços relativos para cada item do orçamento divididos em cenários A, B e C

	CENÁRIOS		A	B	C
		Unid			
1)	**Módulos FV**				
	TRACKER	R$/Wp	1,36	1,24	1,11
	FIXO	R$/Wp	1,36	1,24	1,11
	Preço Mód. FV (CIF)	US$/Wp	0,33	0,3	0,27
			110%	100%	90%
2)	**Estruturas de suporte**				
	TRACKER	R$/Wp	0,61	0,61	0,61
	FIXO	R$/Wp	0,427	0,366	0,305
			70%	60%	50%
3)	**Inversores**				
	TRACKER	R$/Wp	0,27	0,27	0,27
	FIXO	R$/Wp	0,27	0,27	0,27
			100%	100%	100%
4)	**BOS**				
	TRACKER	R$/Wp	0,88	0,88	0,88
	FIXO	R$/Wp	0,792	0,748	0,704
			90%	85%	80%

Verifica-se que os cenários para os módulos FV variam de igual maneira para as duas opções e que para os inversores optou-se por fixar o índice tendo em visto o reduzido potencial de variação. Reforça-se que o caso base considerado é relativo a uma instalação na opção com *tracker*, ou seja, como método comparativo, fixaram-se os valores da Estrutura e BOS, apresentando-se cenários de variação para a opção fixa, neste caso com menores valores relativos (porcentagem apresentadas na Tabela 21).

Interpreta-se como base a coluna do cenário B, sendo a combinação mais provável atual (valores 07/17), porém as simulações foram realizadas mesclando os cenários para cada item, como por

exemplo, mantendo itens 2, 3 e 4 no cenário B e variando item 1 entre os três cenários.

Abaixo são ilustrados os cenários simulados, os resultados são dados por meio do LCOE, tendo como dados de entrada o desempenho relativo apresentado na seção anterior.

Na Tabela 22 é apresentado o Capex para a chamada variação tipo 1 de cenários, onde se manteve o cenário central, com variação dos valores dos módulos fotovoltaicos. As legendas de cada cenário simulado refletem quais valores foram adotados a partir da Tabela 21. Na Tabela 23 são apresentados os valores do LCOE e na Tabela 24 em valores percentuais.

Tabela 22 – Capex relativo (R$/Wp)- Variação TIPO 1 (módulos FV)

CENÁRIOS	**1A**-2B-3B-4B				**1B**-2B-3B-4B				**1C**-2B-3B-4B			
	Tracker		Fixo		*Tracker*		Fixo		*Tracker*		Fixo	
Mód. FV	1,36	44%	1,36	50%	1,24	41%	1,24	47%	1,11	39%	1,11	45%
Estru-tura	0,61	20%	0,37	13%	0,61	20%	0,37	14%	0,61	21%	0,37	15%
Inver-sor	0,27	9%	0,27	10%	0,27	9%	0,27	10%	0,27	9%	0,27	11%
BOS	0,88	28%	0,75	27%	0,88	29%	0,75	29%	0,88	31%	0,75	30%
CAPEX (R$/Wp)	3,12		2,75		3,00		2,62		2,87		2,50	

O preço dos módulos fotovoltaicos varia de maneira igualitária para sistemas com as duas opções de suporte, para as usinas com estrutura fixa, no entanto, com tendência de menor investimento relativo

nos demais itens, esta variação trás impacto mais significativo. Nos três cenários modelados, à medida que o preço relativo do módulo é reduzido, o capex da opção fixa é proporcionalmente menor em relação ao tracker. Em média para os três cenários o capex para o sistema fixo foi 12,5% menor.

Tabela 23 – LCOE – Comparação *tracker* x fixo - Variação TIPO 1 (módulos FV)

LOCAL	CENÁRIOS	**1A-2B-3B-4B**		**1B-2B-3B-4B**		**1C-2B-3B-4B**	
	Lat. méd.	*Tracker*	Fixo	*Tracker*	Fixo	*Tracker*	Fixo
Fpolis/ Chap.	-27,3	237	239	228	229	219	218
Vitória/Campo Grande	-20,4	210	217	202	207	193	197
Caetité /Cuiabá	-14,8	205	212	197	203	189	193
Maceió / Palmas	-10,0	209	218	201	208	192	198
Natal / Teresina	-5,4	185	197	178	189	170	180

Na Tabela 24 valores mais altos significam uma energia mais cara, ou seja, uma opção menos vantajosa, assim conclui-se que apenas para o local "Fpolis/Coo" no cenário C de preços de módulos fotovoltaicos a estrutura fixa seria mais lucrativa.

Na Tabela 24 através dos índices percentuais é facilmente observável o comportamento do custo de energia com a mudança da latitude, como esperado sendo mais atrativo o uso do tracker em latitudes menores, onde em termos financeiros, atinge atratividade 5 % maior.

Tabela 24 – Índices percentuais – LCOE *tracker*/Fixo - Variação TIPO 1 (módulos FV)

LOCAL	CENÁRIOS	**1A**-2B-3B-4B		**1B**-2B-3B-4B		**1C**-2B-3B-4B	
	Lat méd	*Tracker*	Fixo	*Tracker*	Fixo	*Tracker*	Fixo
Fpolis/ Chap.	-27,3	99%		100%		100%	
Vitória/ Camp. G	-20,4	97%		98%		98%	
Caetité/ Cuiabá	-14,8	97%		97%		98%	
Maceio / Palmas	-10,0	96%		96%		97%	
Natal / Teresina	-5,4	94%		94%		95%	

Da mesma maneira realizada no caso acima, comparou-se em uma variação intitulada tipo 2, cenários com o valor dos módulos e estrutura fixados e realizando a variação do BOS. Optou-se neste exercício fixar o preço da estrutura de suporte no cenário C, considerando a atual possibilidade verificada de redução significativa do valor das soluções de estrutura fixa em relação ao tracker. A seguir na Tabela 25 são apresentados as composições de orçamento e os pesos relativos percentuais de cada item para a variação tipo 2.

Tabela 25 - Capex relativo - Variação TIPO 2 (BOS)

CENÁRIOS	1B-2C-3B-**4A**				1B-2C-3B-**4B**				1B-2C-3B-**4C**			
	Tracker		Fixo		*Tracker*		Fixo		*Tracker*		Fixo	
Módulo FV	1,24	41%	1,24	48%	1,24	41%	1,24	48%	1,24	41%	1,24	49%
Estruturas	0,61	20%	0,31	12%	0,61	20%	0,31	12%	0,61	20%	0,31	12%
Inversor	0,27	9%	0,27	10%	0,27	9%	0,27	11%	0,27	9%	0,27	11%
BOS	0,88	29%	0,79	30%	0,88	29%	0,75	29%	0,88	29%	0,70	28%
CAPEX (R$/Wp)	3,00		2,60		3,00		2,56		3,00		2,52	

Com as condições acima esclarecidas, o valor do sistema com *tracker* se manteve constante e não houve variação do preço do sistema com estrutura fixa três cenários. Em média o capex para o sistema fixo foi 14,6 % menor, variando de 13,3 a 16% em relação ao *tracker*.

NaTabela 26 e Tabela 27 são apresentados os resultados vinculados a essa variação. Nessas condições modelas percebe-se que o sistema fixo já aparece como a melhor opção em 80% dos locais se for considerado o cenário1B-2C-3B-4C, onde há 16% de diferença de orçamento entre as opções.

Destaca-se nesta modelagem o resultado paraVitória /Campo Grande,que ilustra um exemplo de ponto de equilíbrio do estudo realizado;para esta localidade em termos de geração, alcançou-se 17 % a mais de rendimento para a opção *tracker*,no entantocom um custo 14,6 % menor para a opção fixo, tornou as duas opções equivalentes financeiramente.

Tabela 26 - LCOE – Comparação *tracker* x fixo - Variação TIPO 2 (BOS)

CENÁRIOS		1B-2C-3B-**4A**		1B-2C-3B-**4B**		1B-2C-3B-**4C**	
LOCAL	Lat méd	*Tracker*	Fixo	*Tracker*	Fixo	*Tracker*	Fixo
Fpolis/Chap.	-27,3	228	227	228	223	228	220
Vitória /C.G	-20,4	202	205	202	202	202	198
Caetité/Cuiabá	-14,8	197	201	197	198	197	195
Maceio / Palmas	-10,0	201	207	201	203	201	200
Natal / Teresina	-5,4	178	187	178	184	178	181

Tabela 27 - Indices percentuais – LCOE *tracker*/Fixo - Variação TIPO 2 (BOS)

CENÁRIOS		1B-2C-3B-**4A**		1B-2C-3B-**4B**		1B-2C-3B-**4C**	
LOCAL		*Tracker*	Fixo	*Tracker*	Fixo	*Tracker*	Fixo
Fpolis/Chap	-27,3	100%		102%		104%	
Vitória /C. G	-20,4	98%		100%		102%	
Caetité/Cuiabá	-14,8	98%		99%		101%	
Maceió/Palmas	-10,0	97%		99%		100%	
Natal/Teresina	-5,4	95%		96%		98%	

Verificou-se por meio dos resultados obtidos que a posição geográfica do empreendimento solar é de suma importância para verificação da opção de suporte, sendo essencial a precisão dos levantamentos energéticos e orçamentários em casos de latitudes intermediárias para que seja possível a tomada de decisão apenas de forma técnica e financeira. No cenário atual constata-se que a opção com seguidor é mais atrativa, com possíveis exceções em locais com

latitudes maiores, nos quais, no entanto, não há grande probabilidade de instalação de grandes centrais. Percebeu-se, todavia, que pequenas variações que tornem a composição de preço mais atrativa para o sistema fixo, justificam sua utilização em latitudes médias.

4.2 FLUXOGRAMA DE TRABALHO DA ETAPA DE MONTAGEM MECÂNICA

A seguir será descrito e ilustrado o procedimento aplicado de execução de cada etapa de montagem da estrutura de suporte do tipo *tracker*. A apresentação desta informação é relevante para o maior entendimento das etapas e complexidades envolvidas neste relativamente novo ramo da construção civil no Brasil.

- Instalação da fundação
- Instalação da estrutura de acionamento e suporte
- Instalação dos Módulos FV e fixadores

4.2.1 INSTALAÇÃO DA FUNDAÇÃO

A etapa de fundação pode ser classificada como a mais importante fase de execução. É onde o maior trabalho de engenharia é aplicado, em termos principalmente de estudos topográficos e de alinhamento para garantir que o conjunto seja posicionado dentro das condições de tolerância. Cada unidade deve ser estudada separadamente, considerando as condições precisas do terreno resultando em uma medida exata em termos de profundidade de cravação e altura externa.

O seguinte procedimento descreve e dá instruções para a implantação adequada da fundação metálica por cravação direta e / ou perfuração prévia para o *tracker* de eixo horizontal N-S. A seguir é definida a sequência de implementação e etapas para concluir a fundação e configurá-la para a montagem sequente da estrutura. As fundações devem ser instaladas por pessoal com experiência e conhecimento de atividades topográficas, bem como utilizados ferramentas e maquinário adequados.

O procedimento apresentado é uma orientação para a instalação da fundação. De acordo com a habilidade e conhecimento dos operadores e condições encontradas no local é possível ocorrerem ajustes no procedimento.

No processo de locação dos pontos de fundação, a codificação dos tipos e posicionamento das fundações representa relevante importância. A seguir na Figura 22 são estabelecidos os códigos aplicados, os quais têm sequência crescente numérica a partir do eixo central NS e alfabética a partir do eixo WE.

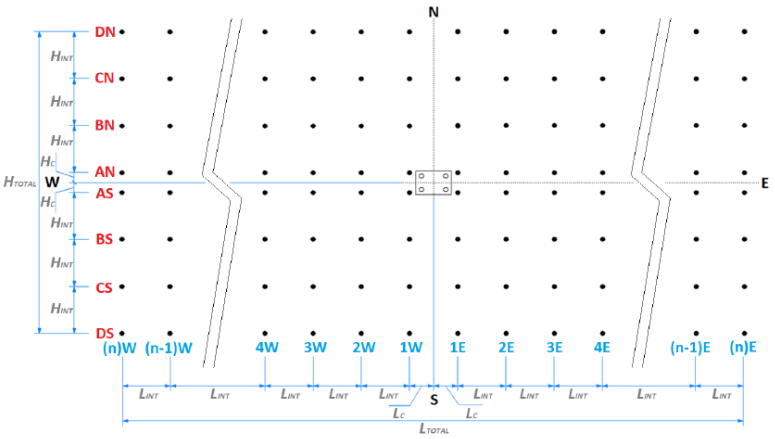


Figura 22 – Visão geral do posicionamento e codificação das fundações (STI, 2017 adaptado)

4.2.1.1 PROCESSO DE ENGENHARIA PRÉVIO

Um processo de engenharia prévio é realizado composto pelas etapas de:

(1) Levantamento topográfico para aferição exata das condições do terreno em momento pré-instalação;

(2) Definição da altura externa das estacas;

(3) Análise de dados e definição do declive para a biela (E–W) e viga de torção (N–S).

A seguir são dadas orientações para cada uma destas etapas.

4.2.1.1.1 LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

Antes do início da execução, deve ser feito um mapeamento topográfico que cubra 100% das estacas de fundação e do conjunto de acionamento para analisar os declives e atribuir a cada estaca uma dimensão de nivelamento.

Estas dimensões são necessárias para nivelar a altura de cada estaca e evitar excessos nas inclinações das vigas de torção e biela que possam prejudicar o bom funcionamento do *tracker* horizontal.

4.2.1.1.2 ALTURA EXTERNA DA ESTACA

A dimensão teórica da estaca para fora do terreno (H) deve ser calculada previamente. Esta dimensão (H) deve situar-se entre valores mínimos e máximos, com base na concepção e cálculo das estacas das fundações e na distância mínima entre os módulos PV e o solo.

4.2.1.1.3 ANÁLISE DE DADOS E DEFINIÇÃO DO DECLIVE PARA A BIELA (E–W) E VIGA DE TORÇÃO (N–S)

A equipe encarregada pela execução das fundações deve estudar o terreno e montar cada um dos *tracker*s, atendendo às seguintes condições:

- O declive da biela (E-W) deve ser uma linha reta e não pode ser dividido. Este declive não excederá 5%.
- Cada declive da viga de torção (N-S) deve ser retilíneo e não pode ser dividido. Este declive não excederá 5%.
- A inclinação de uma única viga de torção só pode variar 0,5% para as inclinações das fileiras adjacentes. Recomenda-se que para cada t*racker* todas as vigas de torção tenham a mesma inclinação.

- Todas as linhas de inclinação das vigas de torção devem girar em torno de seu ponto médio ou eixo central, que é a linha de inclinação da biela.
- A altura máxima (Hmax) das Estacas deve ser respeitada para garantir os critérios na concepção e cálculo das fundações.
- Os módulos PV devem respeitar a distância mínima do solo estabelecida (Hmin).

Uma dimensão (H) que satisfaça todas as condições estabelecidas deve ser atribuída a cada estaca, consequentemente os declives E-W e N-S são definidos.

4.2.1.2 PIQUETAGEM

Caso as inclinações E-W e N-S forem diferentes de zero, deve-se corrigir as coordenadas teóricas (X, Y) de todas as estacas (desenhadas num plano horizontal) colocando-as num plano inclinado com a inclinação E - W atribuída à biela e com as inclinações N - S dadas a cada viga de torção. Mais especificamente, se a distância entre as estacas é D e houver um declive α, a distância D deve ser paralela à inclinação e não localizar a estaca na projeção horizontal de D.

Após a verificação da correção citada, a equipe de topografia fará o levantamento dos pontos detalhados no desenho técnico. Uma corda é posta na altura de cada marca topográfica, para ser usada mais tarde para cravar as estacas.

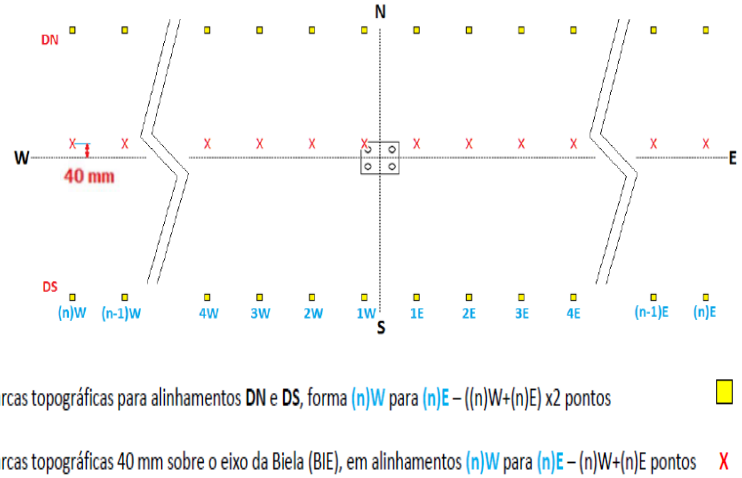


Figura 23 – Orientação para disposição das marcas topográficas para alinhamento dos eixos (STI, 2017 adaptado).

4.2.1.3 CRAVAÇÃO DE ESTACAS – PRIMEIRA ESTACA DE ALINHAMENTO

Marcos topográficos de referência, destacados em amarelo na Figura 23, deverão ser locados por topógrafo para alinhamentos DN e DS para cada um dos eixos (n)W e (n) E. Assim como marcas topográficas centrais (indicadas em vermelho) a 40 mm do eixo W-E (biela). Estas marcas deverão ser unidas por cordas que devem permanecer tensas durante o período de instalação, sem embarrigar ou apresentar interferências com o terreno, marcando o alinhamento das estacas.

A cravação começa na posição DS.01, a um metro a partir da marca topográfica de referência, posicionando a estaca com a corda passando pelo exterior, de acordo com o seguinte esboço.

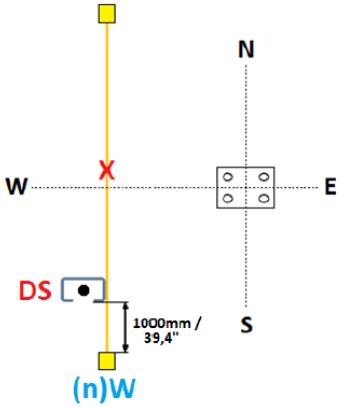


Figura 24 – Esquema demarcações topográficas para instalação das hastes

Como opção é possível locar diretamente o ponto de cravação das estacas DS e DN (n)W e (n) e cravá-las de acordo com indicação de projeto e também usá-las para amarração da corda.

A altura (H) de cada estaca será determinada a partir da análise de dados como explicado no item 4.1.1.1.3 anteriormente. Uma marca (linha) deve ser feita em cada estaca, colocando a distância **d** da profundidade de cravação de acordo com o seguinte esboço. Esta marca coincide com a corda e sua altura é determinada. Segue ilustração do processo na Figura 25.

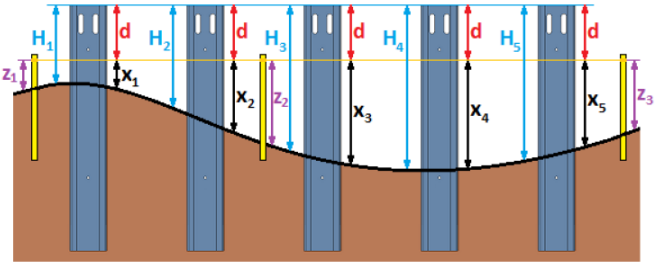


Figura 25 - Esquemático de marcação da altura de cravação (STI, 2017)

4.2.1.4 CRAVAÇÃO DAS ESTACAS– LINHA 01 (N-1)W A (N)E

Com ajuda de um espaçador ou gabarito padrão (Figura 26) com a distância entre as hastes no eixo N-S, a partir das estacas DS.(n)W ou DN.(n)W as seguintes estacas serão cravadas (CS.(n)W e BS.(n)W ou CN.(n)W e BN.(n)W). As estacas AS.(n)W e AN.(n)W serão as últimas a serem cravadas.

É importante destacar que as estacas mudam de orientação para cada lado do eixo da biela do *Tracker*.

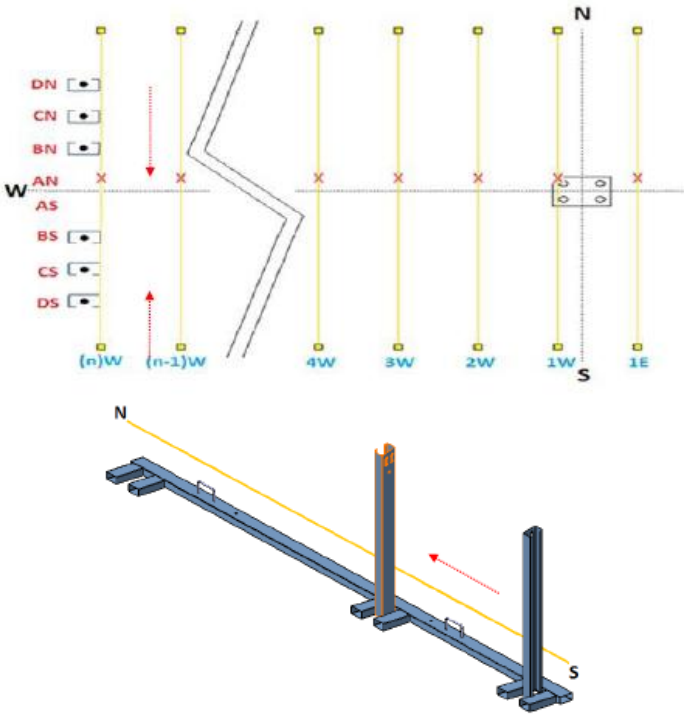


Figura 26 – Ilustração do espaçador e sequência de locação com o uso da ferramenta.(STI, 2017, adaptado)

Uma vez o alinhamento (n)W esteja executado, repete-se o procedimento nos alinhamentos, de (n-1)W a (n)E.

Na Figura 27 são apresentadas imagens de uma máquina de cravação de estacas metálicas, especialmente concebida para o processo de instalação das fundações de estruturas de suporte de uma usina solar. É possível perceber a extensão total das hastes na esquerda, com metros e diferentes comprimentos externos, variando normalmente entre 1,5 e 2 metros. A amplitude do equipamento em termos de altura das estacas deve ser compatível; o exemplar neste caso é habilitado para estacas com no máximo 4,5 metros de comprimento.

Figura 27 – Ilustração do processo de cravação de estacas com máquina cravadora

Abaixo na Figura 28 está ilustrado o fluxograma do processo de instalação das estacas metálica de fundação, destacando a etapa de engenharia prévia e posterior cravação.

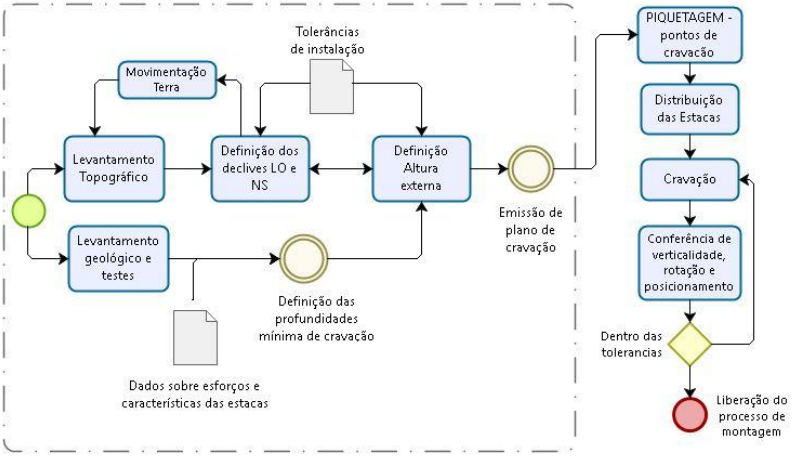


Figura 28 – Fluxograma do processo de instalação das estacas metálica de fundação – engenharia prévia e cravação

4.2.2 INSTALAÇÃO DAESTRUTURA DE ACIONAMENTO E SUPORTE (MESAS)

Esta etapa consiste na montagem dos seguintes componentes:

- Acionamento
- Sistema de regulação e rotação
- Vigas de torção e braços
- Biela
- Travessas de suporte dos módulos

Antes desta etapa de montagem devem ser verificados as dimensões e níveis atribuídos a cada estaca. Estas medidas deveriam ter sido determinadas na execução da fundação.

Antes de montar o *tracker*, todos os orifícios devem ser verificados e limpos para que não haja interferências sólidas, tais como rebarbas ou resíduos galvanizados.

Os passos são os seguintes:

- PASSO 1: Montagem do Conjunto de Acionamento (CAC001)
- PASSO 2: Virolas e Peças de Regulação (PRE001).
- PASSO 3: Montagem e Alinhamento das Vigas de torção (VIT) 1E.
    - PASSO 3.1: Viga de torção Seção 1 (VIT001).
    - PASSO 3.2: Viga de torção Seção 2 (VIT002).
    - PASSO 3.3: Viga de torção Seção 3 (VIT003).
- PASSO 4: Montagem e Alinhamento da Viga de torção (VIT) 1W
- PASSO 5: Viga de torção (VIT) de Alinhamento 2W e assim sucessivamente.
- PASSO 6: Montagem e Alinhamento do Braço (BRA001) 1W e 1E.
- PASSO 7: Montagem do Conjunto de Acionamento da Biela (BIE001).
- PASSO 8: Montagem do Braço (BRA001) de Alinhamento 2W.
- PASSO 9: Montagem da Biela (BIE001) entre Alinhamentos 2W-1W.
- PASSO 10: Montagem e Alinhamento do Resto das Vigas de torção (VIT), Braços (BRA001) e Bielas (BIE001).
- PASSO 11: Posição de Precisão da Biela (BIE001)
- PASSO 12: Montagens das travessas Z (CZE001)
- PASSO13: Montagem da Parada Mecânica (TOM001)

- PASSO 14: Teste de Movimento
- PASSO 15: Aplicar torção à Junta #12: Virola (VIR001) – Peças de Regulação (PRE001).

A seguir na Figura 29 é ilustrado um fluxograma da etapa de montagem da estrutura de acionamento e suporte indicando as relações sequenciais e de dependência. Esta fase de montagem é iniciada após a validação do processo de cravação e alinhamento das fundações metálicas.

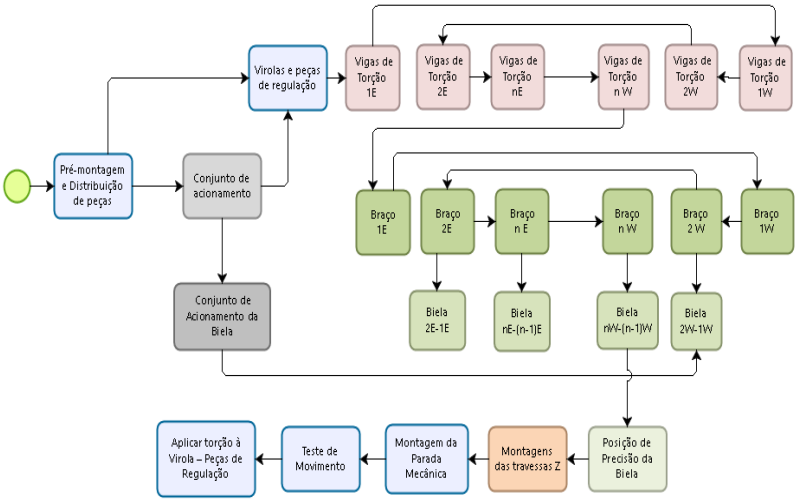


Figura 29 – Fluxograma de instalação da estrutura de acionamento e suporte

4.2.3 INSTALAÇÃO DOS MÓDULOS FV E FIXADORES

Os módulos PV a serem instalados são do tipo filme fino(CdTe) com as seguintes dimensões físicas estabelecidas:

- Comprimento: 1200 mm (-0,79mm/+5 mm)
- Largura: 600 mm (-0,79mm/+5 mm)
- Espessura 6.8mm (±0.2mm)
- Peso: 12,5kg

- Área: 0.72m²

De acordo com as dimensões, há furos em posições variáveis nas travessas de forma que abranja o desvio mecânico do módulo do fabricante (+5 mm).

4.2.3.1 PRESILHAS DE FIXAÇÃO

As presilhas previstas para fixação de módulos sem moldura do tipo vidro-vidro (Figura 30) são aparafusadas na travessa e subsequentemente os painéis PV são encaixados nas mesmas. As abraçadeiras são compostas de alumínio com uma dimensão de 60mm de comprimento. Internamente à estrutura de alumínio é instalado com uma peça de borracha.

O módulo FV, cuja espessura é de 6.8mm,é posicionado dentro da peça de borracha com espaçamento de 5.75mm, isto significa que a borracha comprime a estrutura do módulo PV ao redor de 15%, a fim de não permitir nenhum deslocamento durante o ciclo de vida.

Figura 30 – Modelo da presilha selecionada para o projeto

Os painéis são dispostos em paisagem com quatro módulos de largura e quinze módulos de comprimento por viga de torção. As seguintes etapas são previstas para o procedimento de montagem:

1) Encaixar duas presilhas médias no orifício das duas travessas de suporte e atarraxar os parafusos.

2) Encaixar aborda horizontal do módulo FV nas presilhas já montadas, então encaixar outras duas presilhas médias na outra borda do Módulo FV e posicionar ambas no orifício correspondente na travessa;

3) Apertar os parafusos das presilhas médias e as travessas.

4) Montar outro Módulo PV repetindo o procedimento descrito acima, usando duas presilhas finais.

5) Apertar os parafusos das presilhas finais

6) Repetir o procedimento no outro lado da viga de torção.

7) Continuar montando o resto das colunas de módulos da viga de torção, seguindo o mesmo procedimento.

Abaixo na Figura 31 é ilustrada da esquerda para a direita o procedimento descrito acima.

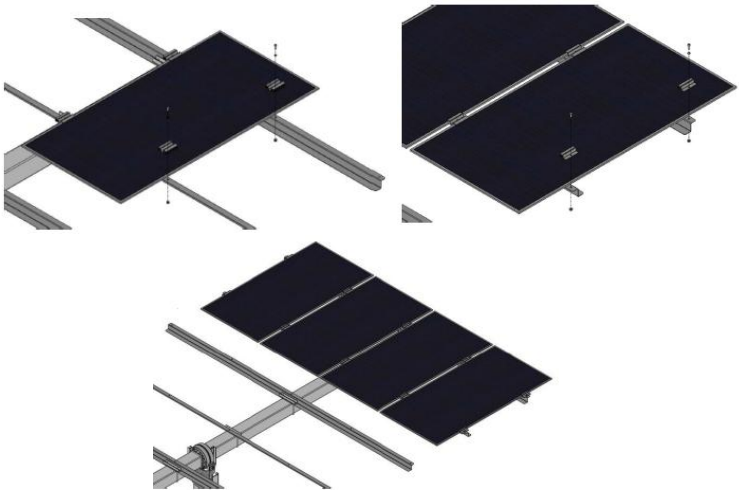


Figura 31 – Ilustração sequência do processo de instalação dos módulos fotovoltaicos

4.3 PLANO DE CONSTRUÇÃO DE UMA UFV DE GRANDE PORTE

O plano de construção da usina fotovoltaica foi focado no trabalho de delimitação do escopo do projeto, e principalmente na elaboração do cronograma. Este item é resumidamente apresentado considerando todas as etapas de execução, porém a análise de sua elaboração é detalhada para a fase de montagem mecânica, onde são apresentadas maiores informações.

4.3.1 ESCOPO DO PROJETO

Neste item foram estabelecidas a descrição geral, objetivos e requisitos do produto esperado com este planejamento. Na descrição foram delineadas as fases pré-executivas posicionando a etapa de construção abordada dentro do contexto do projeto.

Na sequência são indicadas as premissas adotadas e os principais marcos de entrega previstos no projeto, bem como seus critérios de aceitação.

4.3.1.1 DESCRIÇÃO GERAL DO PROJETO

A estruturação de um empreendimento de geração fotovoltaica de grande porte pode ser ilustrada através das seguintes quatro etapas apresentadas na Figura 32. Hoje no Brasil a viabilidade de construção de uma planta solar centralizada se dá por meio de leilões de energia, o qual representa um marco no desenvolvimento do projeto antes do início da fase executiva de implantação, a qual representa o foco deste trabalho.

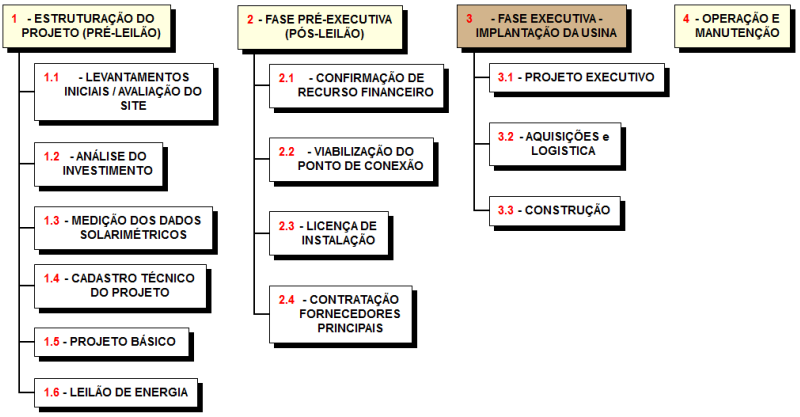


Figura 32 – Fases de desenvolvimento de projeto fotovoltaico de grande porte.

Cada item listado em segundo nível no esquema anterior pode ser aberto em subatividades. Abaixo na Figura 33 segue abertura das etapas de (1) projeto executivo, (2) aquisições e logística e (3) construção presentes durante a fase de implantação.

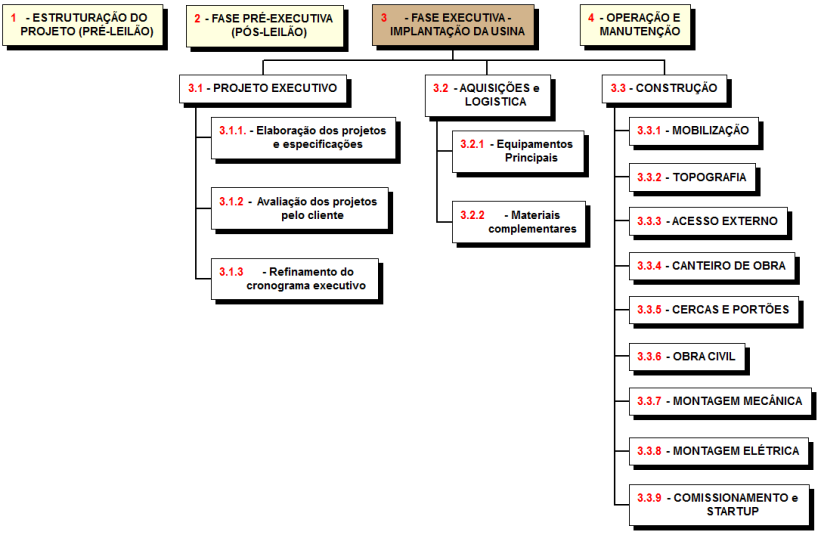


Figura 33 – Atividades de segundo nível da fase de implantação.

O estudo proposto aborda especialmente a fase de construção, que apresenta como etapas principais, em termos orçamentários e executivos, a (1) Obra civil, (2) Montagem Mecânica e (3) Montagem Elétrica, as quais são executadas em ordem sequencial, com as seguintes subatividades listadas a seguir.

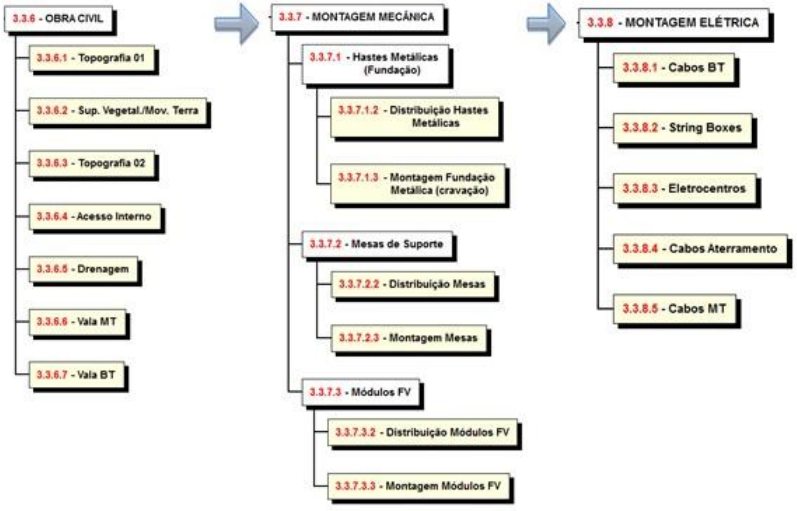


Figura 34 Abertura em terceiro nível – atividades das fases de construção

As atividades de construção podem também ser divididas da seguinte forma conforme Tabela 28.

Tabela 28 – Distribuição alternativa de atividades de construção

ETAPAS	
INSTALAÇÕES PRELIMINARES	Mobilização Acesso Externo Cercas E Portões Canteiro De Obra
OBRA CIVIL	Supressão e terraplenagem Acessos internos, drenagem e valas
MONTAGEM MECÂNICA	Fundação Mesas

MONTAGEM ELÉTRICA	Módulos FV
	Baixa tensão
	Média tensão e aterramento
	Eletrocentros
FINALIZAÇÃO	Comissionamento

Em termos gerais o escopo do projeto para a empresa responsável pela integração e construção do projeto pode ser resumido de acordo com os seguintes itens.

- Entregar uma usina fotovoltaica com capacidade de 30 MWac e 36,708 MWp

- Realizar as etapas de Topografia, Execução do Acesso Interno, Cercas e Portões, Canteiro de Obra, Obras Civis, Montagem Mecânica, Montagem Elétrica, Comissionamento.

O escopo de implantação considerado neste trabalho não inclui os seguintes aspectos:

- Processo de aquisição do terreno onde será instalada a obra;
- Trâmites fundiários, comercialização de eletricidade e licenciamentos;
- Aquisições de equipamentos e materiais e logística externa;
- Construção da subestação de conexão e edifício de comando/O&M;
- Manutenção e operação da usina;
- Contratação de pessoal responsável pela administração da obra em regime operacional;
- Serviços de compensação ambiental, tais como reflorestamento, recuperação das áreas degradadas, etc.;

Neste trabalho a única etapa estudada será a de Montagem Mecânica, as outras partes da construção serão apenas apresentadas, porém sem detalhes específicos.

4.3.1.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA USINA FV

As características gerais dos principais elementos que compõe a usina fotovoltaica são descritas a seguir.

4.3.1.2.1. MÓDULO FOTOVOLTAICO

O elemento base do sistema é o módulo fotovoltaico que constitui a unidade produtiva do sistema. Cada módulo é montado e ligado eletricamente em série de forma a conferir a potência e a tensão exigidas.

O módulo utilizado neste empreendimento é da tecnologia de Telureto de Cádmio (CdTe) da serie 4 do fabricante First Solar, com 115 Wp de potência média. As quantidades previstas estão listadas na Tabela 29.

Tabela 29 –Características dos módulos previstos no projeto e quantidades

Tipo de Módulo	Quant. prevista em projeto	Potência (kWp)
112,5Wp	32.160	3.618
115Wp	254.880	29.311
117,5Wp	32.160	3.779
TOTAL	319.200	36.708

4.3.1.2.2 SUBESTAÇÕES UNITÁRIAS (INVERSORES + ESTAÇÃO ELEVADORA)

O principal elemento presente na subestação unitária é o inversor, equipamento eletrônico que converte a energia gerada pelos módulos de corrente contínua (c.c.) para corrente alternada (CA). A topologia adotada é de inversores centrais, formando com o transformador elevador para média tensão (MT) e dispositivos de proteção e controle um *Skid* ou Eletrocentro, aqui denominado Subestação Unitária.

4.3.1.2.3 STRINGS (SÉRIES FOTOVOLTAICAS)

A união em série de certo número de módulos é chamada string (ou série fotovoltaica). As strings terão 15 módulos em série e serão ligadas em paralelo ainda na mesa de suporte através de conectores especiais, formando um circuito de 8 strings antes do encaminhamento para as string boxes.

4.3.1.2.4 CABOS DE BAIXA TENSÃO (BT), MEDIÇÃO E CONTROLE

Os cabos das séries fotovoltaicas serão encaminhados através da estrutura de suporte dos módulos por meio de calhas metálicas. Os circuitos c.c. serão então paralelizados nas caixas de junção (*String Box*) e então encaminhados através de valas até o inversor. Os cabeamentos nesta etapa serão protegidos por eletrodutos. Circuitos de comunicação e força deverão ter encaminhamentos distintos, assegurando distância apropriada para evitar possibilidade de interferências (>30 cm). Em relação ao sistema de comunicação a principal infraestrutura é relativa à rede de fibra que interliga as subestações unitárias.

4.3.1.2.5 CABOS DE MÉDIA TENSÃO (MT)

As ligações de MT em 34,5 kV serão realizadas de forma radial formando três circuitos, dois de 9 MW e um de 12 MW de potência.

As valas terão uma profundidade em média de aproximadamente 1,2 m, enquanto a largura das mesmas poderá variar entre 0,6 e 1,0 metros de largura em decorrência da quantidade de cabos que passarão pela mesma.

4.3.1.2.6 ESTRUTURA DE SUPORTE

A estrutura de suporte para os módulos fotovoltaicos é do tipo *tracker* já descrito nas seções anteriores, com fundação metálica do tipo haste cravada. Foram previstos três tipos de *tracker*s em relação à dimensão dos mesmos, conforme divisão apresentada na Tabela 30. Os *tracker*s possuem a mesma largura (eixo norte-sul) e diferentes

comprimentos no sentido leste-oeste, devido ao número distinto de fileiras.

Tabela 30 – Tipo e quantidades de *tracker*s aplicados no empreendimento em questão

Tipo de *tracker* (nº de fileiras/mesas)	**Dimensões aproximadas (m)**	**Quantidades**
16	37 x 100	94
12	37 x 75	73
8	37 x 50	35
Total de *tracker*s		202
Total de mesas		2660

4.3.1.2.7 DADOS PRINCIPAIS DA USINA SOLAR

Para o dimensionamento das equipes de trabalho, sequência de montagem e histograma da usina solar fotovoltaicas foram considerados os seguintes dados (Tabela 31).

Tabela 31 – Dados principais da UFV

Potência UFV (MWp):	36,708 MWp
Módulos FV	319.200
*Tracker*s	202
Mesas	2.260
Hastes	22.088
String Box	180 unid.
Cabos BT	372.000 m
Cabos de MT	22.000 m
Inversores	30 unid.
Acesso Interno	3.180 m
Valas de cabos	14.300 m
Cerca	6.850 m

4.3.1.3 OBJETIVO E REQUISITOS DO PRODUTO

O objetivo principal do projeto é construir um parque solar fotovoltaico na área rural de um município no interior do Rio Grande do Norte. O projeto é dividido em 10 subparques de 3 MWac, totalizando 30 MWac. A potência de pico (c.c.) instalada é equivalente a 36,7MWp, utilizando 319.200 módulos fotovoltaicos com potência média de 115 Wp do tipo filme fino.

A usina deve gerar energia esperada referente à potência total projetada após prazo previsto de execução, atendendo o orçamento previsto, ocupando área disponível através de um processo de execução que atenda as normas técnicas e legais relativas às atividades de projeto, obra civil, montagem mecânica e elétrica.

A seguir são listados os requisitos previstos para o projeto:

- A unidade geradora deverá possuir 30MW de potência instalada.
- As instalações deverão atender aos requisitos ambientais vigentes.
- A central deverá ser montada em um terreno de propriedade da empresa, sendo o mesmo apto a receber o projeto.
- O comissionamento deve ser realizado e pode ser certificado por instituição independente de acordo com critério do cliente para caracterizar a entrega final das unidades;
- Montar uma equipe dedicada a gerenciar o projeto
- A entrega da usina deve ocorrer até 01/12/2017.
- Membros que integrarão a equipe de gerenciamento do projeto devem ter, no mínimo, um ano de experiência em gerenciamento de projeto.

4.3.1.4 PREMISSASE RISCOS INICIAIS

•A empresa integradora terá apoio irrestrito de todas as partes interessadas;

- A equipe do projeto receberá o terreno totalmente apto para receber o empreendimento, livre de qualquer empecilho técnico ou administrativo;
- Os fornecedores cumprirão os prazos estipulados;
- A subestação e rede elétrica externa estarão disponíveis para comissionamento da usina e startup;
- Será disponibilizado relatório geológico do local, confirmando ausência de blocos de rochas e condições restritivas ao trabalho de movimentação de terra;

Abaixo (Tabela 32) são listados alguns riscos identificados e uma classificação quanto ao seu grau de impacto.

Tabela 32 – Riscos previstos e impactos associados

Descrição do Risco	Impacto
Atraso na mobilização de equipamentos	Alto
Falta de conformidade do material especificado	Médio
Condições meteorológicas desfavoráveis	Médio
Acidentes pessoais e incidentes	Baixo
Descoberta de sítios arqueológicos	Baixo
Paralizações e reinvindicações trabalhistas/ sociais	Baixo

4.3.1.5 CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO

O projeto será aceito quando:

• A documentação do fluxo de processo, modelos de documentos, relatórios e manuais for disponibilizada para uso geral da unidade produtiva;

• Usina deve ser entregue com nenhuma pendência relatada pela equipe de comissionamento;

• A unidade geradora com capacidade instalada de 30MW, estiver concluída com aprovação da equipe fiscal da contratante, instalação comissionada e sem pendências identificadas no processo de finalização da execução;

• A unidade geradora estiver conectada e entregando energia elétrica ao sistema de transmissão de energia.

4.3.1.6 ENTREGAS E MARCOS DO PROJETO

A seguir (Tabela 33) são colocados os principais marcos definidos para acompanhamento e medição da produção do empreendimento.

Tabela 33 – Marcos contratuais do projeto

1	MARCOS CONTRATUAIS	
1.1	Conclusão de supressão vegetal e limpeza do terreno Unidades 1, 2 e conclusão da mobilização	05/17
1.2	100% dos projetos executivos em conformidade pela contratante	06/17
1.3	Conclusão da escavação de todas as valas e reaterro dos cabos	07/17
1.4	Conclusão da fundação dos skids de todas as unidades	07/17
1.5	Conclusão da fixação dos módulos das unidades 4 primeiras unidades	08/17
1.6	Conclusão da cravação das estacas (fundação) dos *tracker*s (todas as unidades)	08/17
1.7	Conclusão da montagem elétrica das string boxes das 4 primeiras unidades	09/17
1.8	Conclusão da montagem das estruturas e dos motores dos *tracker*s de todas as unidades	10/17
1.9	Conclusão da montagem da usina solar	10/17
1.10	Conclusão do comissionamento da Usina Solar	11/17

4.3.1.7 EAP (ESTRUTURA ANALÍTICA DO PROJETO)

A seguir é definida a EAP do projeto (Tabela 34), como o sequenciamento lógico das atividades necessárias para cumprir o escopo descrito. Estão destacadas as etapas que serão abordadas em detalhes neste trabalho.

Tabela 34 – Etapas de construção – segundo nível de atividades

	Nome da tarefa
1	**ENGENHARIA**
1.1	Especificação dos Serviços de Ensaios de Arrancamento e Derrubamento
1.2	Plano de Levantamento Topográfico
1.3	Canteiro de Obras
1.4	Recebimento do Projeto Definitivo do *Tracker*
1.5	Recebimento do Manual de Montagem do Módulo
1.6	Recebimento do Manual de Montagem do *Tracker*
1.7	**Projetos Civis**
1.8	**Projetos Mecânicos**
1.9	**Projeto Elétrico**
1.10	**Projeto Comunicação**
1.11	**Sistema Segurança**
2	**FORNECIMENTO**
2.1	**Estruturas metálicas, *tracker*s e presilhas**
2.1.1	Entrega em Obra das Hastes
2.1.2	Entrega em Obra das Mesas
2.1.3	Entrega em Obra das presilhas
2.1.4	Entrega em Obra dos Acionamentos
2.2	**Painéis Solares**
2.2.1	Entrega em Obra dos Módulos FV
2.3	**Skids (inversores, trafos, cubículos)**
2.3.1	Entrega em Obra do Skid

Tabela 34 (continuação)

2.4	**String Box**
2.4.1	Pedido de Compra
2.4.2	Fabricação
2.4.3	Transporte
2.4.4	Entrega em Obra String Box
2.5	**Cabos Elétricos**
2.5.1	Cabos Solares
2.5.2	Cabos de Força BT
2.5.3	Cabos de Força MT
2.5.4	Cabos CA para Serviços Auxiliares
2.5.5	Cabos p/ Aterramento
2.5.6	Cabos Sistema de Comunicação/Dados
2.6	**Miscelâneas**
2.6.1	Cercas (Mourões, Telas, Fios, Esticadores, Hastes de Aterramento, Portão)
2.6.2	Eletrodutos
2.6.3	Caixa de Passagem - Materiais
2.6.4	Fundação dos Skids - hastes metálicas
2.6.5	Estação Solarimétrica
2.6.6	Abraçadeiras/Conectores/Terminais/Soquetes/Tomadas/Luminárias
3	**OBRA CIVIL**
3.1	**Geral**
3.1.1	Construção do Canteiro de Obras
3.1.2	Cercas e Portão de Acesso
3.1.3	Construção da Guarita
3.1.4	Construção dos Acessos Internos
3.1.5	Recuperação da Área Degradada do Bota Fora
3.2	Limpeza do Terreno e Retirada da Camada Vegetal
3.3	Escavação das Valas de BT, Lançamento de Eletrodutos e Reaterro

Tabela 34(continuação)

3.4	Execução das Caixas de Passagem de BT
3.5	Escavação das valas de MT, Lançamento de Eletrodutos e Reaterro
3.6	Execução das Caixas de Passagem de MT
3.7	Locação das Fundações dos *Tracker*s
3.8	Cravação das Fundações dos *Tracker*s
3.9	Fundação dos Skids
3.10	Fundação dos Acionadores
4	**MONTAGEM MECÂNICA**
4.1	Montagem das Mesas
4.2	Posicionamento dos Módulos
4.3	Fixação dos Módulos
4.4	Montagem Completa das Estações String Box (Fixação da Barra Metálica, Fixação da SB)
4.5	Montagem dos Motores *Tracker*
4.6	Posicionamento do Skid
4.7	Montagem da Estação Meteorológica
5	**MONTAGEM ELÉTRICA**
5.1	Aterramento das Estruturas
5.2	Lançamento dos Cabos (Strings - String Box)
5.3	Conexão dos Módulos (Formação das Strings)
5.4	Conexão das Strings em Paralelo
5.5	Montagem Elétrica das Strings Boxes
5.6	Lançamento dos Cabos (String Box - Skid)
5.7	Lançamento de Cabos MT
5.8	Lançamento dos Cabos de Comunicação
5.9	**Instalação dos skids**
5.9.1	Instalação elétrica QDCA
5.9.2	Instalação elétrica dos transformadores
5.9.3	Instalação elétrica inversores centrais

Tabela 34 (continuação)

5.9.4	Instalação elétrica cubículos de proteção
5.9.5	Conexão elétrica dos cabos c.c. e CA
6	**COMISSIONAMENTO**
6.1	**Geral**
6.1.1	Scada
6.1.2	Teste de Confiabilidade
6.2	Limpeza dos Módulos
6.3	Termografia
6.4	Curva IV
6.5	Polaridade e Condutividade
6.6	String Box
6.7	Estruturas Metálicas e Fixação dos Módulos
6.8	Medição de Resistividade
6.9	Quadros, Cubículos, Trafo
6.10	Inversores
6.11	Teste de Isolação dos Cabos

4.3.2 CRONOGRAMA DO PROJETO

A seguir serão apresentados os cronogramas desenvolvidos para o empreendimento em questão. Houve duas versões em diferentes momentos do desenvolvimento do projeto que serão analisadas e descritas, considerando as principais atividades a serem desenvolvidas na implantação da usina.

Com foco na etapa de montagem mecânica, referente à instalação da estrutura de suporte, será proposto um método de dimensionamento de equipes e sequência de atividades para execução da montagem destacando suas principais etapas.

4.3.2.1 LINHA DE BASE E CRONOGRAMA EXECUTIVO

Abaixo na Tabela 35 é apresentado o cronograma base pré-executivo considerando as principais atividades e datas de início e término que permitem cumprir os marcos de entrega previstos no projeto. Na sequência é ilustrado através da Figura 35 o gráfico de barras de gantt do projeto considerando as principais atividades.

Tabela 35 – Cronograma geral de atividades – linha base

Nome da tarefa	Duração (dias)	Início	Término
PROJETO UFV	289	12/16	11/17
ENGENHARIA	223	12/16	09/17
FORNECIMENTO	216	12/16	09/17
OBRA CIVIL	121	04/17	08/17
MONTAGEM MECÂNICA	115	06/17	10/17
MONTAGEM ELÉTRICA	151	05/17	10/17
COMISSIONAMENTO	107	07/17	11/17

Verifica-se que todo o processo tem duração prevista de doze meses, porém o período de obra efetivamente é projetado para ser concluído dentro de um período de oito meses, sendo a montagem mecânica finalizada em cinco meses. As atividades pré-construtivas são referentes às etapas de engenharia executiva e processos de fornecimentos de equipamentos e materiais, os quais devem ter inicialização prévia para permitir o cumprimento das etapas posteriores.

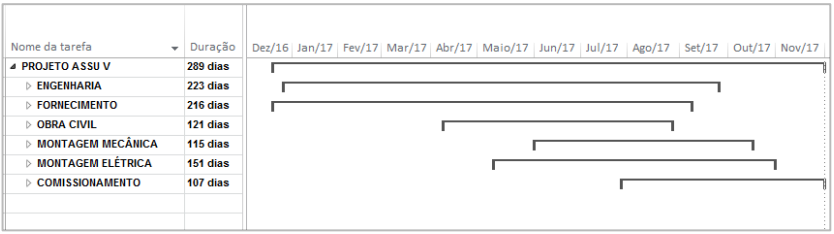


Figura 35 – Gráfico de barras gantt- principais atividades Usina Solar

Percebe-se o sequenciamento lógico de engenharia, fornecimento, obra civil, montagem eletromecânica e comissionamento. As etapas normalmente se sobrepõem, não sendo necessária a finalização prévia completa para inicialização das demais, podem-se verificar pequenos desvios temporais de início e fim devido algumas atividades específicas.

A seguirna é apresentado o cronograma de barras com abertura das principais etapas da obra. Verifica-se a aplicação da divisão do empreendimento em 10 blocos, reflexo da configuração elétrica adotada em projeto. Destaca-se que as principais etapas foram planejadas com essa divisão, ou seja, a obra civil como um todo seria realizada bloco por bloco, considerando todas as atividades que são contempladas nesta etapa finalizadas para um bloco, para posterior início das atividades no próximo local.

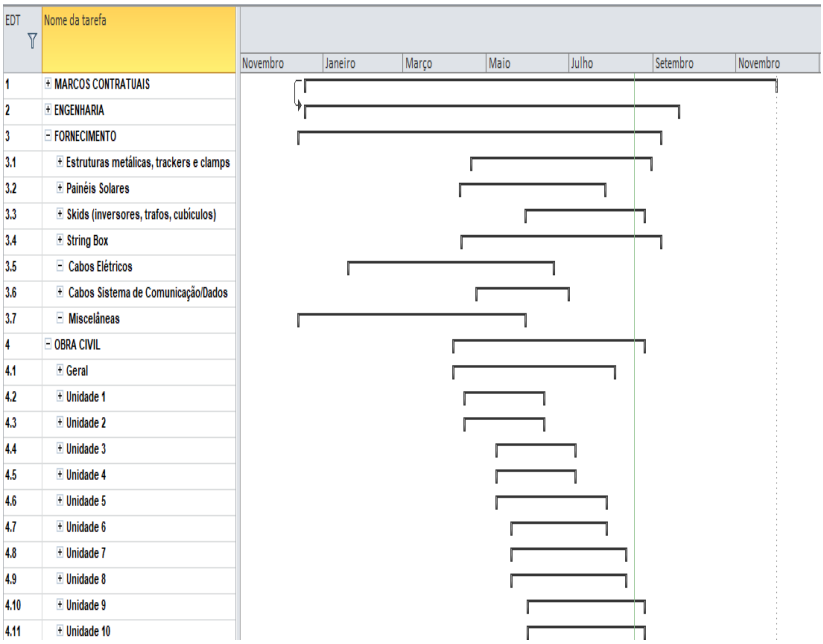


Figura 36 Cronograma em barras - principais etapas do projeto – fase pré-executiva

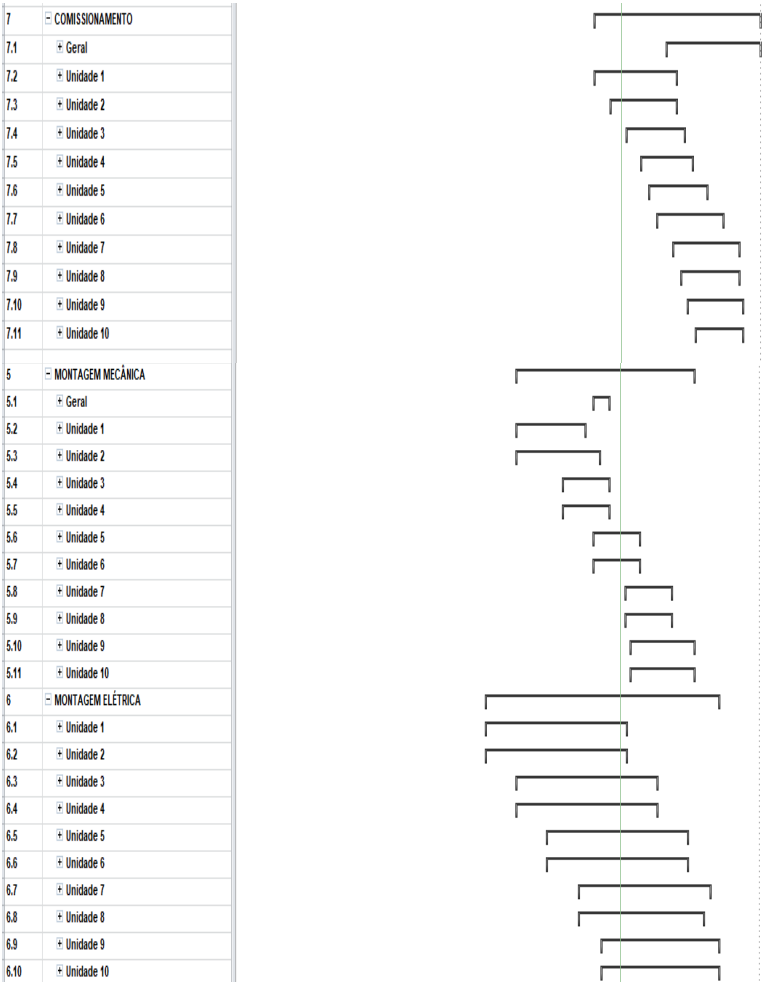


Figura 36 (continuação)

Este tipo de abordagem se adequa com o conceito "*location-based*" citado nas referencias bibliográficas, e encaixa com o formato de obra de usinas solares, que apresentam características modulares, sendo possível compará-las a condomínios horizontais, em termos de construção civil. A seguir é ilustrado o layout do empreendimento, onde podem ser observados os dez blocos referenciados no cronograma.

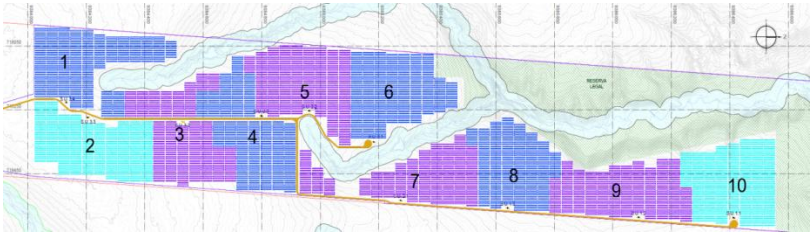


Figura 37 – Layout do empreendimento dividido em 10 blocos de geração

É importante destacar a simultaneidade aplicada entre diversas atividades, onde o sincronismo das etapas subsequentes e precisão de fornecimento são essenciais para o fluxo projetado. Pode ser observado que o plano considerava equipes em paralelo atuando em dois blocos distintos. Verificam-se pequenos desvios deste formato na obra civil, porém é bem nítido este formato na montagem elétrica e mecânica. Este tipo de abordagem é motivada, além da necessidade de produção, para que se tenha parâmetros comparativos entre duas frentes de serviço.

A seguir na Figura 38 é ilustrado o cronograma inicialmente previsto para entregas dos principais equipamentos envolvidos na montagem do *tracker*: hastes, mesas e presilhas, bem como os módulos fotovoltaicos. Percebe-se o sequenciamento planejado para casamento com as atividades de montagem relacionadas.

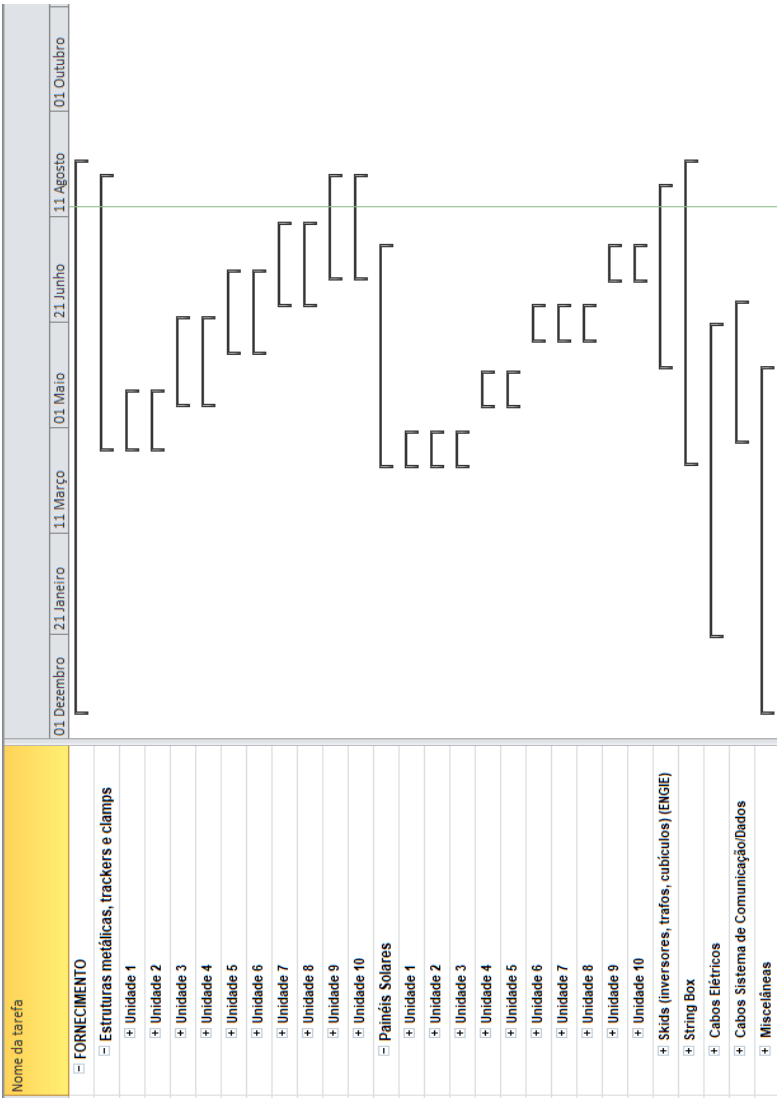


Figura 38 – Cronograma previsto de entrega dos materiais e equipamentos principais

Nota-se uma deformação no item cabos elétricos, com uma antecipação frente aos demais fornecimentos; isto é previsto devido à necessidade de especificação após projeto, pedido de compra e processo de fabricação, visto as características exclusivas necessárias. Este processo deve ser iniciado previamente para que as remessas estejam em obra no momento previsto de instalação. Já as miscelâneas têm seu inicio antecipado, pois neste item está incluso materiais relativos a cercas, por exemplo, que representa uma etapa inicial no canteiro.

A seguir será analisada a etapa de montagem mecânica, foco deste trabalho. Na Figura 39 é apresentada a sequencia temporal inicialmente prevista para a montagem mecânica. Destaca-se que a cravação das hastes está alocada como uma atividade de obra civil, apesar de representar além de um elemento de fundação, diretamente vinculado a parte civil, um pilar metálico que dá sustentação ao restante das peças de apoio.

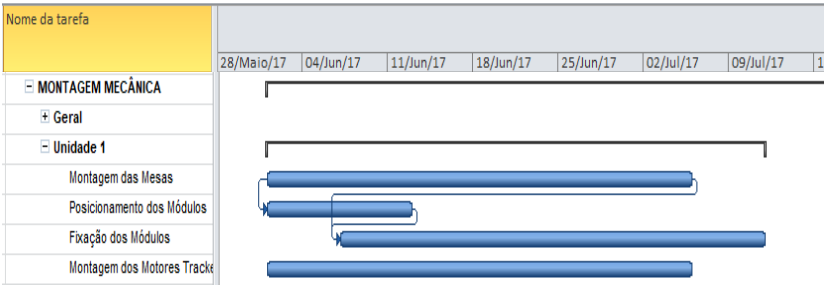


Figura 39 – Sequencia temporal prevista para montagem mecânica de uma unidade

A seguir na Figura 40 está ilustrado o cronograma de barras do processo completo de montagem dos *tracker*s. O cronograma foi reduzido para ser possível a observação da sequência lógica que defina a montagem da estrutura de suporte, na etapa de obra civil, por exemplo, demais atividades civis necessárias para finalização de um bloco foram ocultadas.

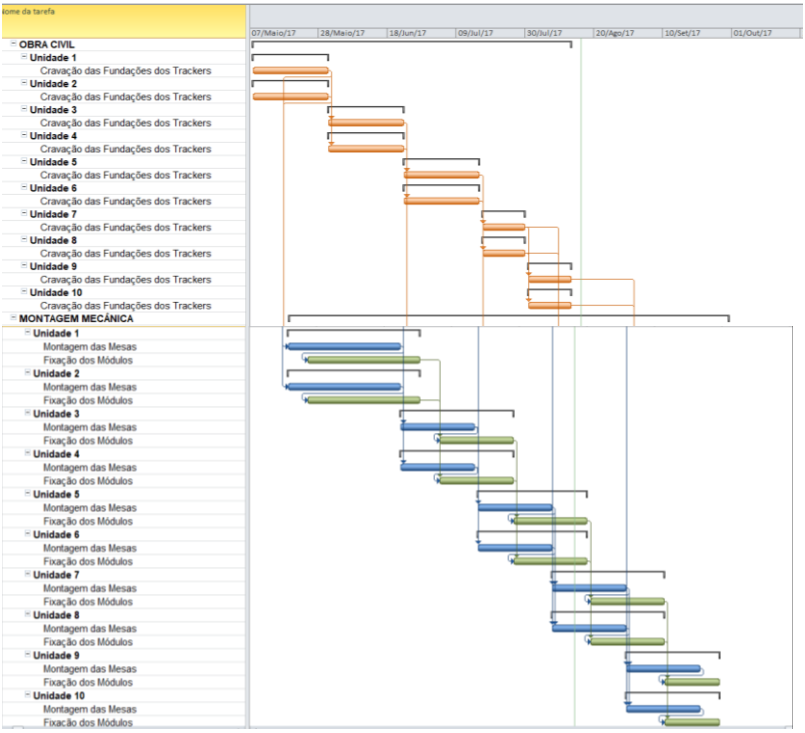


Figura 40 – Cronograma de barras - cravação e montagem de mesas e módulos – fase pré-executiva

O plano para esta etapa foi a adoção de duas frentes simultâneas atuando em blocos distintos. Em termos de desempenho, foi considerada uma curva de aprendizado, avaliando que o ritmo inicial seria menor, com ganho posterior de produtividade.

A seguir é apresentada uma segunda abordagem da estruturação do cronograma adotada no início da execução das obras, onde as etapas de montagem mecânica e elétrica foram unificadas em uma fase intitulada eletromecânica. Porém a principal alteração refere-se à inserção dos blocos dentro de cada atividade, conforme ilustrado a seguir.

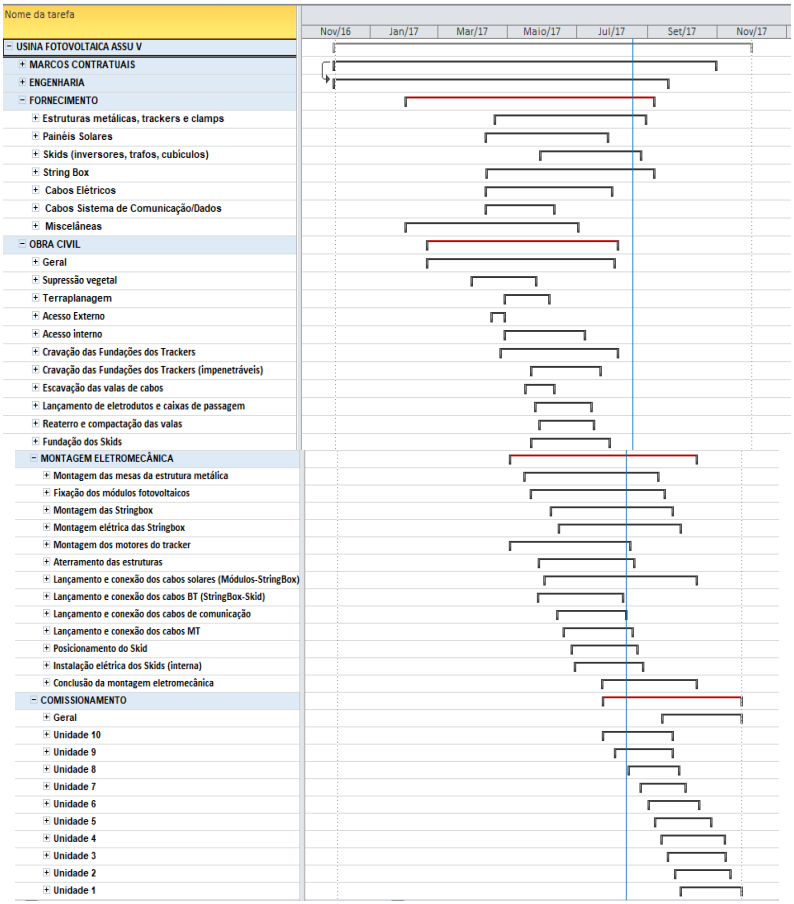


Figura 41 – Cronograma em barras –principais etapas - fase executiva

Em relação ao formato geral do cronograma, referente às linhas temporais, não houve mudanças significativas.

A seguir na Figura 42 é exibido o cronograma das etapas de cravação e montagem de mesas e módulos aplicado na fase executiva. Como citado a estruturação das atividades foi alterada, com as unidades características da divisão do empreendimento sendo inseridas dentro de cada atividade; não retirado, todavia, o vínculo característico entre as

tarefas, ainda sendo visíveis as ligações predecessoras e sucessoras entre as etapas. O plano considerando duas equipes simultâneas foi também mantido.

Esta abordagem foi indicada pelos fiscais e responsáveis pela produção em campo como mais apta para controle das atividades de maneira segregada, conforme será mostrado no próximo capitulo do trabalho.

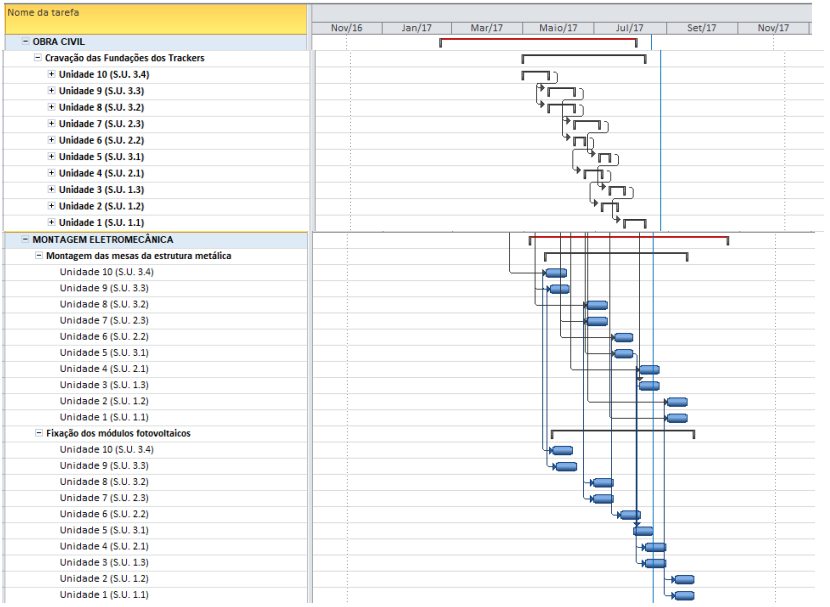


Figura 42 – Cronograma de barras -etapas de cravação e montagem de mesas e módulos – fase executiva.

Abaixo nas Tabela 36 e Tabela 37 são apresentados os períodos projetados para as etapas que compõe a montagem mecânica nos dois cenários.

Tabela 36 – Características das atividades de montagem – plano pré-executivo

Nome da tarefa	**Cravação das Fundações**	**Montagem das Mesas**	**Fixação dos Módulos**
Início	08/05/2017	19/05/2017	25/05/2017
Término	12/08/2017	29/09/2017	29/09/2017
	Duração (dias)		
Unidade 1	20	30	30
Unidade 2	20	30	30
Unidade 3	20	20	20
Unidade 4	20	20	20
Unidade 5	20	20	20
Unidade 6	20	20	20
Unidade 7	12	20	20
Unidade 8	12	20	20
Unidade 9	12	20	15
Unidade 10	12	20	15
Total	84	110	110
Média	17	22	21

Percebe-se que houve alteração entre os dois planos:

a) Mudança na execução sequencial dos blocos (inicialmente é previsto o início da execução pela seção norte do empreendimento, na prática a instalação iniciou pelo sul);

b) Aumento médio do período de cravação por unidade (nesta etapa foram consideradas as dimensões reais de cada bloco, na etapa anterior de planejamento pré-executivo, os blocos foram modelas com iguais dimensões);

c) Redução média do período nas etapas de montagem das mesas e fixação dos módulos.

Tabela 37 – Características das atividades de montagem – plano executivo

Nome da tarefa	**Cravação das Fundações**	**Montagem das Mesas**	**Fixação dos Módulos**
Início	25/04/2017	19/05/2017	25/05/2017
Término	05/08/2017	16/09/2017	29/09/2017
	Duração (dias)		
Unidade 10	20	15	15
Unidade 9	20	16	16
Unidade 8	21	15	15
Unidade 7	19	15	15
Unidade 6	17	14	14
Unidade 5	16	14	15
Unidade 4	21	15	15
Unidade 3	20	15	15
Unidade 2	20	15	15
Unidade 1	24	15	15
Total	84	104	104
Média	20	15	15

Um fato relevante que motivou a modificação, principalmente do plano de cravação, foi a atualização das condições geológicas pontuais no terreno, onde foram mapeadas mais precisamente regiões com ocorrência do leito rochoso de arenito a profundidades menores, intitulado neste processo de “impenetrável”. Esta condição inviabiliza o processo normal de cravação interferindo no método e tempos desta atividade, pois a camada rígida não permite a cravação suficiente em camada de solo. Desta forma um plano intermediário desta etapa foi composto, o qual é apresentado a seguir na Tabela 38.

Tabela 38 – Plano de cravação regiões com impenetrável.

Cravação das Fundações dos *Tracker*s (impenetráveis)	Duração (dias)	Estacas	Porcentagem em relação ao total
Unidade 10	1	4	0%
Unidade 9	0	-	0%
Unidade 8	1	31	1%
Unidade 7	1	66	3%
Unidade 6	10	920	42%
Unidade 5	7	555	25%
Unidade 4	8	590	27%
Unidade 3	9	600	27%
Unidade 2	9	600	27%
Unidade 1	9	600	27%
Total			
Média			18%

Os períodos indicados acima já estão inclusos nos números apresentados na Tabela 37.

. As campanhas de reconhecimento nas áreas listadas permitiram a elaboração extrapolada de mapas, porém sem precisão pontual. No momento deste replanejamento não haviam sido feitas campanhas para as unidades 1, 2 e 3, sendo os valores indicados de forma estimativa.

A seguir são apresentadas as Tabelas indicando a produtividade prevista para as etapas citadas.

Tabela 39 – Produtividade atividades de montagem – plano pré-executivo

Nome da tarefa	**Cravação das Fundações dos *Trackers***	**Montagem das Mesas**	**Fixação dos Módulos**
	Produção (unidades / dia)		
Unidade 1	**110**	**9**	**1064**
Unidade 2	**110**	**9**	**1064**
Unidade 3	**110**	**13**	**1596**
Unidade 4	**110**	**13**	**1596**
Unidade 5	**110**	**13**	**1596**
Unidade 6	**110**	**13**	**1596**
Unidade 7	**184**	**13**	**1596**
Unidade 8	**184**	**13**	**1596**
Unidade 9	**184**	**13**	**2128**
Unidade 10	**184**	**13**	**2128**
Média	**140**	**12**	**1596**

Tabela 40 – Produtividade atividades de montagem – plano executivo

Nome da tarefa	**Cravação das Fundações dos *Tracker*s**	**Montagem das Mesas**	**Fixação dos Módulos**
	Produção (unidades / dia)		
Unidade 10	**110**	**18**	**2128**
Unidade 9	**110**	**17**	**1995**
Unidade 8	**105**	**18**	**2128**
Unidade 7	**116**	**18**	**2128**
Unidade 6	**130**	**19**	**2280**
Unidade 5	**138**	**19**	**2128**
Unidade 4	**105**	**18**	**2128**
Unidade 3	**110**	**18**	**2128**
Unidade 2	**110**	**18**	**2128**
Unidade 1	**92**	**18**	**2128**
Média	**113**	**18**	**2130**

No momento da consolidação desta versão do cronograma executivo, já estavam disponíveis informações sólidas a respeito dos fornecimentos, as hastes metálicas, por exemplo, já estavam disponíveis e optou-se por adiantar o início da etapa de cravação das fundações, porém sem antecipação significativa da finalização. Assim foi prevista uma produtividade menor, a qual também foi condizente com a dificuldade encontrada nas regiões com identificação da camada impenetrável. Para a montagem das mesas e módulos, também foi projetada uma produtividade maior, com manutenção geral do período de término, considerando, no entanto, maiores folgas entre a finalização de cada bloco.

4.3.2.2 PLANO DE ATAQUE PROPOSTO

Nesta seção foi elaborado um plano de ataque, independente das informações acima expostas, o qual foi concentrado na etapa de montagem mecânica. A seguir são apresentados os principais números, divididos dentre as etapas da montagem mecânica e também de acordo

com a divisão realizada para basear o plano de ataque. A Usina foi projetada com 10 blocos de 3MWca, porém distribuídos em áreas com diferentes formatos, devido à característica do terreno onde o empreendimento está instalado. Desta forma o número de módulos fotovoltaicos instalados por bloco não é idêntico, consequentemente o número de *tracker*s também é variável, em termos de número e formato. Na Tabela 41 é apresentada a divisão prevista para cada bloco.

Tabela 41 - Divisão do tipo de tracker por bloco na usina em estudo

	BLOCOS										
Tipo de *Tracker*	**10**	**9**	**8**	**7**	**6**	**5**	**4**	**3**	**2**	**1**	
16 fileiras	9	8	8	11	13	12	7	6	9	11	94
12 fileiras	9	11	10	7	5	6	8	9	5	3	73
8 fileiras	3	1	2	2	1	1	5	5	8	7	35
Total *Tracker*s	21	20	20	20	19	19	20	20	22	21	202
Total Fileiras	276	268	264	276	276	272	248	244	268	268	2660

Como método de análise do plano de ataque foram simulados dois cenários, dividindo a usina em 10 ou 30 blocos. Para este dimensionamento não foi considerada divisão física apresentada. A unidade base foi uma fileira do *tracker*, o número total de fileiras foi dividido por 10 ou 30, para alcançar a dimensão do bloco padrão. As duas divisões tem concernência com a estrutura elétrica da usina, a qual é composta por 10 subestações unitárias e 30 inversores.

A seguir (Tabela 42) seguem dados utilizados considerando as duas opções:

Tabela 42 – Números de hastes, mesas e módulos – divisão em 10 ou 30 blocos

	nº / mesa	Nº totais	Nº p/ 10 blocos	Nº p/ 30 blocos
Hastes	8	22.088	2.209	736
Mesas	1	2.660	266	89
Módulos FV	120	319.200	31.920	10.640

Cada uma das etapas de montagem mecânica (hastes metálicas de fundação, mesas e módulos fotovoltaicos) listadas foi dividida em distribuição e montagem. Cada etapa de montagem é dependente da distribuição das peças em campo e da etapa anterior, como ilustrado a seguir. No entanto, em um primeiro momento será apresentado o estudo já considerando as peças distribuídas, onde os gráficos ilustram a sequência para as três etapas de montagem citadas.

Inicialmente será apresentado o estudo realizado com a usina dividida em 10 blocos.

Abaixo são apresentadas na Tabela 43 as produtividades adotadas para o planejamento, estes índices são aplicados tanto para a simulação com 10 ou 30 blocos.

Tabela 43 – Atividades com número de unidades e produtividade prevista

	MONTAGEM MECÂNICA	Unid.	Produtividades		
	HASTES METÁLICAS		unid./h.Eq.	min/ unid.	unid./dia.Eq
A	Distribuição				
B	Montagem	22.088	18	3,33	162
	MESAS DE SUPORTE				
C	Distribuição				
D	Montagem	2.660	2,4	25,00	22

Tabela 43 (continuação)

	MÓDULOS FV				
E	Distribuição				
F	Montagem	319.200	85	0,71	765

Para a realização da linha de balanceamento considerando 10 blocos, os seguintes dados são considerados (Tabela 44).

Tabela 44 – Dados de entrada- cenário10 blocos

Nº de blocos	-	10,0
Prazo previsto	dias	120
Mobilização	dias	10
Tempo base	dias	45
TR (tempo restante)	dias	65
A (ritmo)	-	0,138

Tabela 45 - Dimensionamento das equipes -cenário 10 blocos

	MONTAGEM MECÂNICA	Unid./ bloco	Total por atividade./ Eq.(dias)	Depen-dência.	Nº Equi-pes cálc.	Nº Equip es adot.	Dura ção das ativ. Repe t.
	HASTES METÁLICAS						
A	Distribuição	2209					
B	Montagem	2209	13,80	A	1,91	2	69
	MESAS DE SUPORTE						

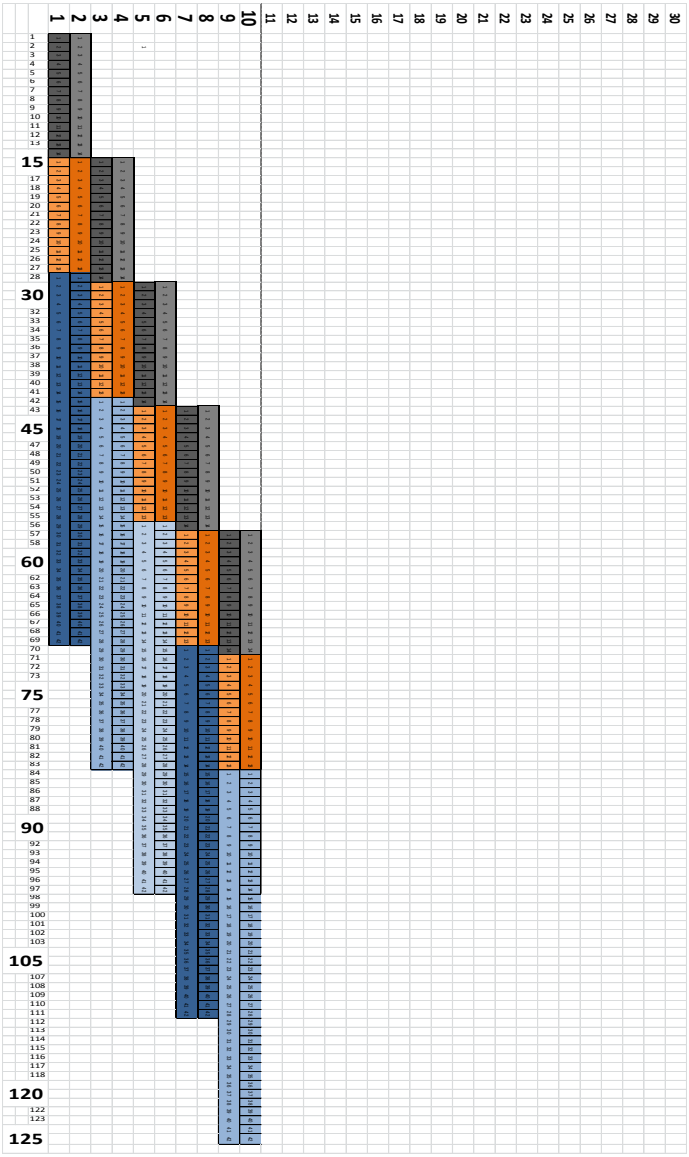
Tabela 45 (continuação)

C	Distribuição	266					
D	Montagem	266	12,60	B,C	1,74	2	63
	MÓDULOS FV						
E	Distribuição	31920					
F	Montagem	31920	42,00	D,E	5,82	6	70

A Tabela 45 mostra na primeira coluna o número de unidades por bloco, basicamente foram divididos, os números totais de hastes, mesas e módulos por dez. Considerando a produtividade adotada segunda Tabela 43, é estimado um tempo total por equipe para finalização de um bloco, exposto na coluna seguinte. O número de equipes calculado, indicado é obtido através da multiplicação deste período projetado pelo ritmo calculado e indicado na Tabela 44.

A seguir na é ilustrada o resultado obtido com o dimensionamento acima descrito. As cores utilizadas são os mesmos aplicados nas tabelas acima para diferenciar cada etapa de montagem. Os tons e diferenças nas bordas das barras indicam diferentes equipes atuantes na mesma atividades. A lógica aplicada é que após a finalização do bloco, no tempo previsto, a equipe se desloca para a próximo local. Optou-se por manter a identificação de trinta unidade no eixo vertical para melhor comparação com a seguinte simulação que considera tal número como divisão da obra.

Nº de unidades ou blocos



Nº de unidades ou blocos

Figura 43 - – Linhas de balanceamento montagem mecânica – 10 blocos

Os períodos e equipes calculados permitiram uma sincronização das etapas subsequentes, porém sem adoção de folgas, com exceção de um dia entre a finalização e início da montagem das mesas, atividade ilustrada em alaranjado.

A seguir é apresentado o resultado do estudo considerando a divisão da usina em 30 blocos.

Para a realização da linha de balanceamento considerando 30 blocos os seguintes dados são considerados (Tabela 46). Destaca-se que dados como prazo previsto, tempo de mobilização foram mantidos, porém os demais itens vinculados ao número de blocos adotado, foram proporcionalmente modificados, por meio dos cálculo relacionados.

Tabela 46 - Dados de entrada - cenário 30 blocos

Nº de blocos		30,0
Prazo previsto	dias	120
Mobilização	dias	10
Tempo base	dias	17
TR (tempo restante)	dias	93
A (ritmo)		0,312

Em conformidade com os dados apresentados para o cenário anterior, a Tabela 47 expõe as unidades por bloco, tempo previsto por atividade para cada equipe e o número de equipes.

Tabela 47 – Dimensionamento das equipes - cenário 30 blocos

	MONTAGEM MECÂNICA	Unid./bloco	Total por atividade./Eq.(d)	Dependência.	Nº Equipes calc	Nº Equipes adot	Duração das ativ. Repet.
	HASTES METÁLICAS						
A	Distribuição	736					
B	Montagem	736	4,60	B	1,43	2	69
	MESAS DE SUPORTE						
C	Distribuição	89					
D	Montagem	89	5,50	H,F	1,72	2	83
	MÓDULOS FV						
E	Distribuição	10640					
F	Montagem	10640	14,00	L, I	4,37	5	84

Do mesmo modo apresentado anteriormente, as cores e tons aplicados refletem as atividades e equipes distribuidas temporalmente para execução de cada bloco. Sendo o plano materializado através da Figura 44.

Após os resultados dos dois cenários modelados, constatou-se que para os números empregados no empreendimento em questão a divisão em trinta blocos seria mais vantajosa. O tempo total para finalização da etapa de montagem mecânica foi menor, com utilização de uma equipe a menos para montagem dos módulos.

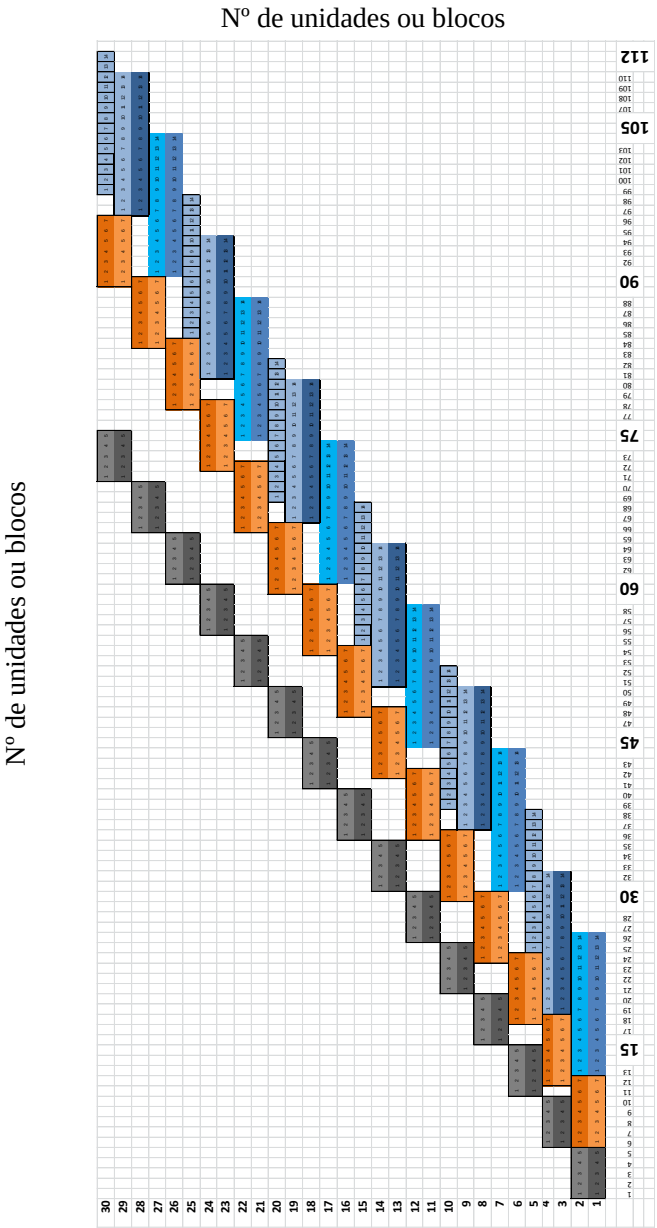


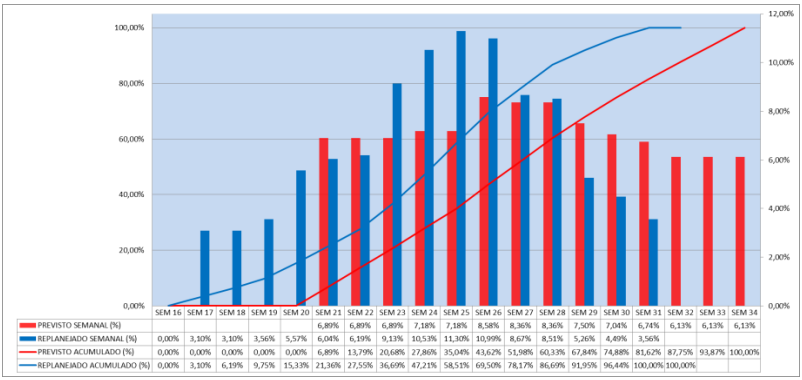
Figura 44 – Linhas de balanceamento montagem mecânica – 30 blocos

4.4 ACOMPANHAMENTO DO PLANO E ANÁLISE DE FATORES DE INTERFERÊNCIA

Nesta seção são apresentados em formato gráfico os planos e progressos semanais das atividades que compões a montagem mecânica, cravação de hastes, montagem de mesas e módulos. Serão também apresentadas as equipes consideradas para as tarefas e a produtividade média alcançada; bem como imagens da obra, ilustrando o avanço do processo de montagem.

4.4.1 CRAVAÇÃO DAS HASTES DE FUNDAÇÃO

Abaixo na Figura 45 segue a ilustração do plano de cravação das hastes de fundação referente à linha de base (em vermelho) e do planejamento executivo em azul.



	SEM 16	SEM 17	SEM 18	SEM 19	SEM 20	SEM 21	SEM 22	SEM 23	SEM 24	SEM 25	SEM 26	SEM 27	SEM 28	SEM 29	SEM 30	SEM 31	SEM 32	SEM 33	SEM 34
PREVISTO SEMANAL (%)						6,89%	6,89%	6,89%	7,18%	7,18%	8,58%	8,36%	8,36%	7,50%	7,04%	6,74%	6,13%	6,13%	6,13%
REPLANEJADO SEMANAL (%)	0,00%	3,10%	3,10%	3,56%	5,57%	6,04%	6,19%	9,13%	10,53%	11,30%	10,99%	8,67%	8,51%	5,26%	4,49%	3,56%			
PREVISTO ACUMULADO (%)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	6,89%	13,79%	20,68%	27,86%	35,04%	43,62%	51,98%	60,33%	67,84%	74,88%	81,62%	87,75%	93,87%	100,00%
REPLANEJADO ACUMULADO (%)	0,00%	3,10%	6,19%	9,75%	15,33%	21,36%	27,55%	36,69%	47,21%	58,51%	69,50%	78,17%	86,69%	91,95%	96,44%	100,00%	100,00%		

Figura 45 – Plano de cravação de hastes de fundação – avanço semanal previsto

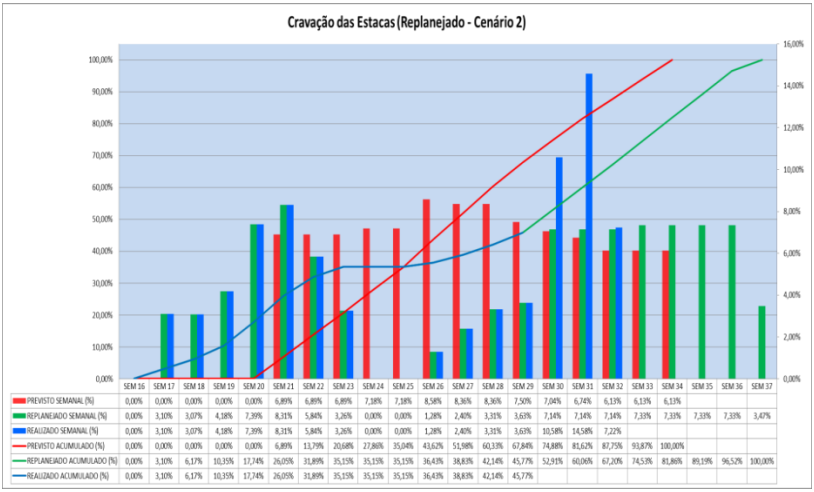
Verifica-se que o planejamento executivo foi realizado considerando o adiantamento da atividade de cravação em quatro semanas. Previa-se um pico de montagem mais acentuado para finalização com três semanas de antecedência em comparação com cronograma de base do projeto.

Abaixo na Figura 46 segue a ilustração do avanço efetivamente realizado de cravação das hastes de fundação (barras em azul), o

replanejamento realizado durante a execução da atividade e o progresso previsto na linha de base estão em verde e vermelho, respectivamente.

Destaca-se a redução da produção a partir da semana 22 e paralização da atividade nas semanas 24 e 25. Este fato ocorreu devido a problemas de fornecimento das hastes, o que culminou na necessidade de parar a atividade.Com a ocorrência deste evento foi necessário um replanejamento durante o processo executivo para que fosse possível retomar a linha de progresso prevista atendendo o marco de finalização projetado.

Verifica-se que com a quebra na produção uma retomada gradativa foi planejada, dilatando a finalização da atividade em três semanas.



	SEM 16	SEM 17	SEM 18	SEM 19	SEM 20	SEM 21	SEM 22	SEM 23	SEM 24	SEM 25	SEM 26	SEM 27	SEM 28	SEM 29	SEM 30	SEM 31	SEM 32	SEM 33	SEM 34	SEM 35	SEM 36	SEM 37
PREVISTO SEMANAL (%)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	6,89%	6,89%	6,89%	7,18%	7,18%	8,58%	8,36%	8,36%	7,50%	7,04%	6,74%	6,13%	6,13%	6,13%			
REPLANEJADO SEMANAL (%)	0,00%	3,10%	3,07%	4,18%	7,39%	8,31%	5,84%	3,26%	0,00%	0,00%	1,28%	2,40%	3,31%	3,63%	7,14%	7,14%	7,14%	7,33%	7,33%	7,33%	7,33%	3,47%
REALIZADO SEMANAL (%)	0,00%	3,10%	3,07%	4,18%	7,39%	8,31%	5,84%	3,26%	0,00%	0,00%	1,28%	2,40%	3,31%	3,63%	10,58%	14,58%	7,22%					
PREVISTO ACUMULADO (%)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	6,89%	13,79%	20,68%	27,86%	35,04%	43,62%	51,98%	60,33%	67,84%	74,88%	81,62%	87,75%	93,87%	100,00%			
REPLANEJADO ACUMULADO (%)	0,00%	3,10%	6,17%	10,35%	17,74%	26,05%	31,89%	35,15%	35,15%	35,15%	36,43%	38,83%	42,14%	45,77%	52,91%	60,06%	67,20%	74,53%	81,86%	89,19%	96,52%	100,00%
REALIZADO ACUMULADO (%)	0,00%	3,10%	6,17%	10,35%	17,74%	26,05%	31,89%	35,15%	35,15%	35,15%	36,43%	38,83%	42,14%	45,77%								

Figura 46 – Cravação de hastes de fundação – avanço e replanejamento

Nas semanas 30 e 31 ocorreu o pico de produção desta atividade, quando o avanço semanal realizado foi o dobro do projetado. Nesta semana a produtividade atingida em média por equipe de cravação foi de 250 hastes por dia, alcançando uma expressiva marca de cerca de uma haste a cada minuto, considerando as duas equipes. Na média, considerando as semanas que a atividade ocorreu normalmente, a média foi de 100 hastes por dia por equipe.

Abaixo na Tabela 48 seguem os dados das equipes envolvidas no processo de cravação.

Tabela 48 – Composição das equipes envolvidas no processo de cravação de hastes

	1 Topografia	**2 Distribuição**	**3 Cravação**	**4 Cravação**
Função	**Quantidade**			
Topógrafo	2	-	-	-
Auxiliar de Topografia	4	-	-	-
Servente de Obras	4	4	3	3
Líder de Montagem	-	1	-	-
Operador de Manipuladora	-	1	-	-
Montador Eletromecânico	-	5	-	
Operador de Martelo Hidraúlico	-	-	2	2
Nivelador	-	-	1	1

4.4.2. MONTAGEM DAS MESAS DE SUPORTE

Abaixo na Figura 47segue a ilustração do plano de montagem das mesas referente à linha de base (em vermelho) e do planejamento executivo em azul.

Para o planejamento executivo foi previsto uma produtividade semanal superior já no início da atividade, considerando semanas de folga durante os dois primeiros meses, projetando o adiantamento da finalização da atividade de três semanas frente o previsto na linha de base.

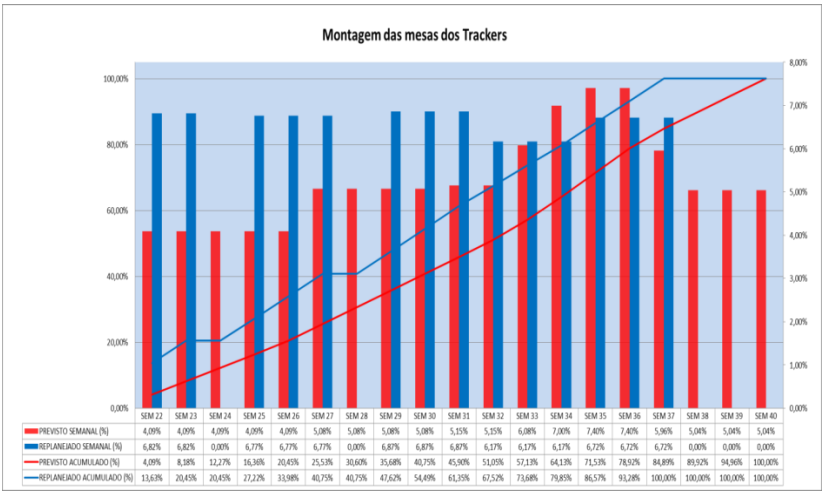


Figura 47 – Plano de montagem das mesas – avanço semanal previsto

Similar ao ocorrido com as hastes metálicas de fundação, as peças e equipamentos que permitem a montagem das mesas de suporte também foram entregues em obra em prazo posterior ao planejado. A diferença neste caso foi que esta atividade não havia iniciado e o replanejamento foi realizado considerando a postergação de cinco semanas para início e fim do processo. Não sendo neste caso previsto o aumento da produção média semanal.

Abaixo na Figura 48 segue a ilustração do avanço realizado na montagem das mesas em azul, em verde o replanejamento realizado durante a execução da atividade e o progresso previsto na linha de base em vermelho.

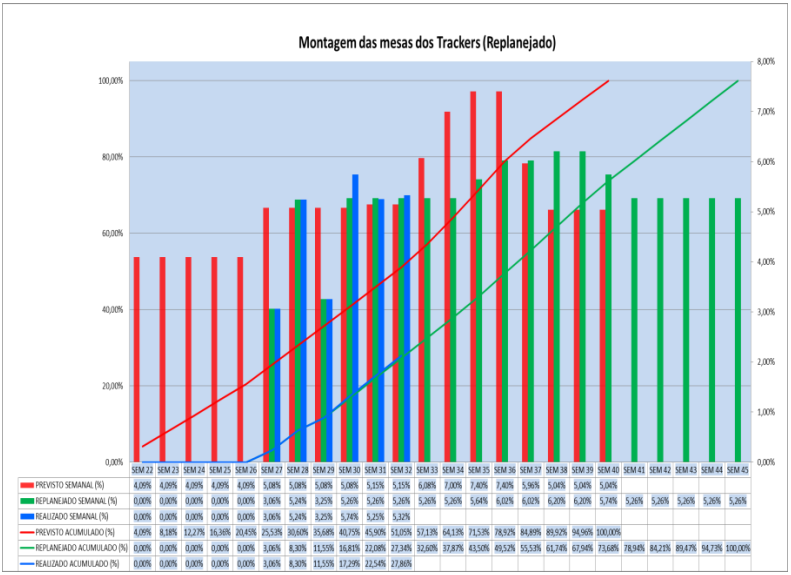


Figura 48 – Montagem das mesas – avanço e replanejamento

A produtividade atingida da equipe de montagem foi em média na primeira semana de montagem igual a 14 mesas por dia, atingindo no melhor dia a produção de 25 unidades, com média geral de 21 mesas por dia no período de coleta de dados.

Abaixo na Tabela 49 seguem os dados das equipes envolvidas no processo de montagem das mesas.

Tabela 49 - Composição das equipes envolvidas no processo de montagem das mesas

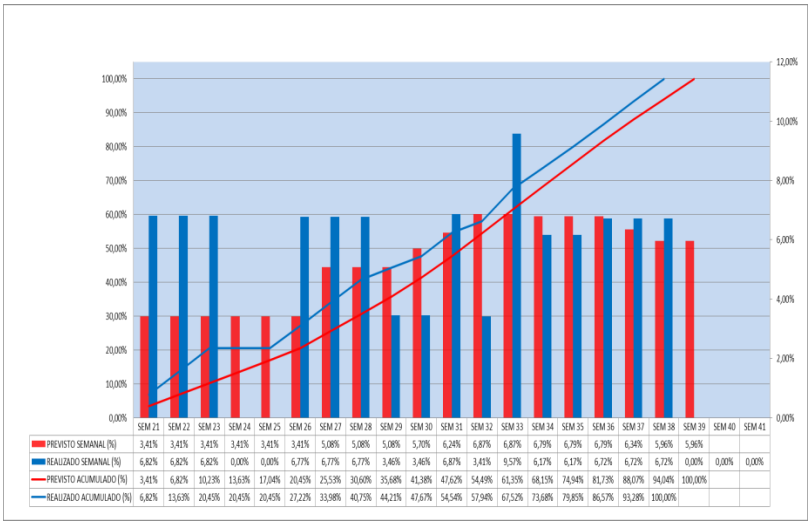
Funções	Quantidades				
Montagem das mesas	**Travessas**	**Virolas**	**Braços e bielas**	**Quadro e acionador**	**Torque**
Montador eletromecânico	10	4	2	1	10
Servente de obras	7	-	2	1	-
Pré-montagem					
Montador eletromecânico	9				
Servente de obras	10				

Abaixo segue ilustração de uma parcela da usina com a etapa de montagem das mesas concluída, observam-se as caixas dos módulos fotovoltaicos posicionadas para início da etapa seguinte.

Figura 49 – Área com a etapa de montagem das mesas concluída.

4.4.3 MONTAGEM E FIXAÇÃO DOS MÓDULOS FV

Abaixo na Figura 50 segue a ilustração do plano de montagem e fixação dos módulos FV da linha de base em vermelho e do planejamento executivo em azul.



	SEM 21	SEM 22	SEM 23	SEM 24	SEM 25	SEM 26	SEM 27	SEM 28	SEM 29	SEM 30	SEM 31	SEM 32	SEM 33	SEM 34	SEM 35	SEM 36	SEM 37	SEM 38	SEM 39	SEM 40	SEM 41
PREVISTO SEMANAL (%)	3,41%	3,41%	3,41%	3,41%	3,41%	3,41%	5,08%	5,08%	5,08%	5,70%	6,24%	6,87%	6,87%	6,79%	6,79%	6,79%	6,34%	5,96%	5,96%		
REALIZADO SEMANAL (%)	6,82%	6,82%	6,82%	0,00%	0,00%	6,77%	6,77%	6,77%	3,46%	3,46%	6,87%	3,41%	9,57%	6,17%	6,17%	6,72%	6,72%	6,72%	0,00%	0,00%	0,00%
PREVISTO ACUMULADO (%)	3,41%	6,82%	10,23%	13,63%	17,04%	20,45%	25,53%	30,60%	35,68%	41,38%	47,62%	54,49%	61,35%	68,15%	74,94%	81,73%	88,07%	94,04%	100,00%		
REALIZADO ACUMULADO (%)	6,82%	13,63%	20,45%	20,45%	20,45%	27,22%	33,98%	40,75%	44,21%	47,67%	54,54%	57,94%	67,52%	73,68%	79,85%	86,57%	93,28%	100,00%			

Figura 50 – Plano de montagem e fixação dos módulos – avanço semanal previsto

Os módulos fotovoltaicos diferentemente das peças dos *tracker*s tiveram fornecimento regular, até mesmo ocorrido de maneira antecipada ao início previsto de montagem. No entanto, esta fase final da montagem depende da finalização das duas anteriores (fundação e mesas), assim mesmo com material disponível, o plano de montagem e fixação dos módulos teve que ser reelaborado resultando em cinco semanas de postergação para alcançar 100% da montagem.

Abaixo na Figura 51 segue a ilustração do avanço realizado na montagem e fixação dos módulos FV em azul, em verde o replanejamento realizado durante a execução da atividade e o progresso previsto na linha de base em vermelho.

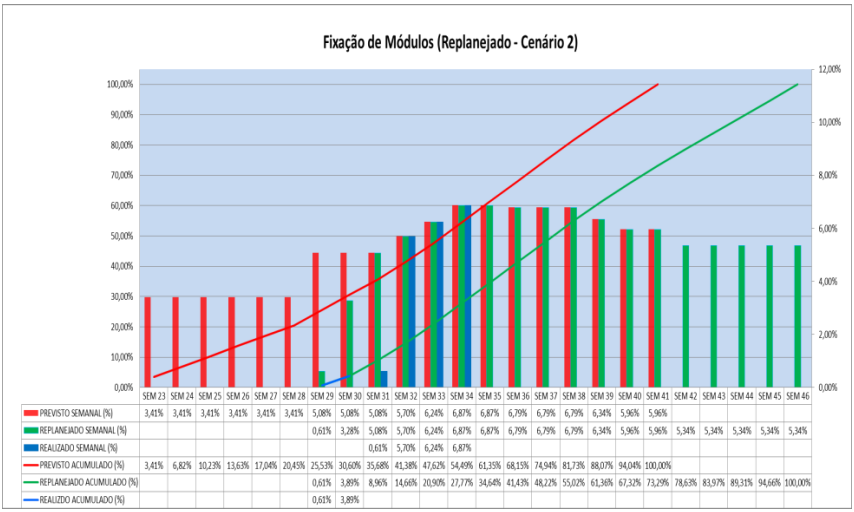


Figura 51 – Montagem e fixação dos módulos FV – avanço e replanejamento

Nas quatro semanas de montagem de módulos registradas até o momento do levantamento desta pesquisa, descartando a primeira semana que teve caráter experimental, obteve-se uma média de 2500 módulos montados por dia, com pico de 3500 na semana 34. A equipe envolvida nesta atividade é basicamente formada por montadores eletromecânicos, sendo 28 trabalhadores nesta função. As equipes foram subdivididas em pares, atuando de forma separada em cada mesa do *tracker*. Cada equipe atingiu em média a produtividade de 250 módulos por dia, sendo aproximadamente cada trabalhador responsável pela montagem de uma mesa composta por 120 módulos diariamente.

A seguir na, Figura 53, Figura 54 e Figura 55 são apresentadas imagens da obra ilustrando visualmente o avanço alcançado na sequência de instalação dos módulos fotovoltaicos.

Figura 52 – Avanço da montagem dos módulos FV- 26/07 e 29/07

Figura 53 – Avanço da montagem dos módulos FV- 02/08 e 07/08

Figura 54 – Avanço da montagem dos módulos FV - 19/08 e 26/08

Figura 55 – Avanço da montagem dos módulos FV - 02/09 e 18/09

5 CONCLUSÕES

Em relação à comparação entre o uso de estrutura do tipo fixa e com seguimento, os resultados apontam, em termos energéticos, para um desempenho superior da opção com seguimento (média de 18 %) com aumento da diferença relativa na medida em que o local se aproxima da linha equador, variando de 13 % até mais de 20% nos locais com menores latitudes.

Referente à comparação entre tecnologias, o resultado energético foi em média de 2,5 % maior para os sistemas com tecnologia filme fino de CdTe, variando de 1,4% até 3% , sendo as maiores diferenças identificadas para os locais com maiores índices médios de temperatura. A diferença encontrada é ligeiramente superior quando se comparam as duas tecnologias com o uso do seguidor. Neste trabalho o intuito principal foi a comparação entre os tipos de estrutura de suporte, mas é relevante considerar em trabalhos futuros estudos a respeito dos ganhos em relação ao espectro da radiação que pode proporcionar variações adicionais de desempenho entre as tecnologias. A análise sobre detalhes de montagem diferenciados entre as tecnologias também pode resultar em ajustes nos levantamentos do custo de integração.

Concluiu-se que a variação de preço dos módulos fotovoltaicos é mais impactante na análise financeira das usinas com estrutura fixa, pois este item é mais representativo no orçamento global de sistemas com essa modalidade de suporte. No cenário central modelado o orçamento da opção fixa é 12,5 % menor em relação ao *tracker*, ou este 14,3 % maior em relação ao fixo.

Destaca-se um cenário modelado para o quase alcançou o ponto de equilíbrio, com as duas opções equivalentes financeiramente; neste caso em termos de geração, obteve-se rendimento 17,2 % superior para a opção *tracker*, no entanto com um custo 17,1 % maior em relação ao sistema fixo. Este resultado proporcional foi alcançado, pois a relação considerada de custo de O&M do sistema fixo e *tracker* foi proporcionalmente equivalente ao investimento inicial (1%). Caso o custo de O&M do seguidor fosse ajustado para 1,1%, por exemplo, este necessitaria de um rendimento 1,3 % superior para se alcançar a equivalência. Para o Brasil não existem dados reais de custos de O&M para sistemas com seguidores em plantas de grande porte, apenas informações dos próprios fabricantes, os quais indicam necessidade

mínima de intervenções, este levantamento pode ser tema de pesquisas futuras para calibração deste importante dado de entrada.

Verificou-se que a posição geográfica do empreendimento solar é de grande importância para verificação da opção de suporte, sendo essencial a precisão dos levantamentos energéticos e orçamentários para a tomada de decisão, principalmente em casos de latitudes intermediárias. No cenário atual projetado a usina com seguidor é financeiramente mais interessante nas regiões estudadas, atingindo nível igualitário apenas na faixa de latitude de Santa Catarina, sendo a energia gerada até 6 % mais barata na região com latitude de cinco graus. Já em um cenário com o preço relativo da estrutura fixa sendo igual a 50 % e a integração 80% em relação ao *tracker,* a usina com utilização da estrutura fixa é mais atrativa em todas as regiões, com exceção dos locais na faixa de cinco graus de latitude.

A opção de estrutura com seguidor vem sendo largamente adotada nos primeiros empreendimentos em construção no Brasil e através do estudo dos processos de montagem deste componente, verificaram-se características peculiares que devem ser consideradas; seja durante o processo de aprovação do seu uso, durante orçamento e dimensionamento da mão de obra de montagem, bem como no período de projeto executivo e processo de implantação.

A investigação das condições do terreno, em termos topográficos e geológicos, é decisiva para aprovar sua aplicação, pois os níveis de alinhamento exigidos e a necessidade da fundação ser fortemente engastada devidos os esforços aplicados durante seu funcionamento podem inviabilizar o seu uso em condições não favoráveis.

Durante o planejamento da etapa de cravação das hastes metálicas, tipo de fundação preferencialmente escolhido devido seu melhor custo benefício, um processo preciso de engenharia dever ser realizado sincronizando as necessidades estruturais e de alinhamento. Esta etapa é considerada a mais importante na instalação, quando há interação particular com o processo de engenharia, em termos geológicos e topográficos, proporcionando base de alinhamento para as demais etapas de montagem.

Em relação à sequência do processo de montagem, passos restritos devem ser seguidos para garantir o atendimento às tolerâncias de instalação e encaixe das peças. A instalação das mesas de suporte requer processo minucioso logístico, de pré-montagem e sincronismo

entre subetapas, demandando a maior carga de mão de obra durante o processo de montagem mecânica. Por fim, a montagem dos módulos fotovoltaicos, representa o passo final, no qual as relações de precisão e alinhamento são menores, porém o valor agregado, fragilidade e a quantidade de peças, requer atenção especial, para que se alcance uma alta produtividade e baixo índice de avarias. Vale destacar que de acordo com a altura de instalação do seguidor, a qual pode variar de 1,5 m até pouco mais de 2 metros no caso estudado, diferentes produtividades podem ser alcançadas, sendo necessários artifícios como uso de plataformas em certos locais para viabilizar a instalação.

Em relação ao escopo do projeto foram verificadas a existência das fases de estruturação do projeto (pré-leilão), a fase pré-executiva (atividades de subsídio à execução), implantação (construção) e por fim a operação e rotinas de manutenção. Em relação à fase de implantação, têm-se as etapas estruturais como projeto executivo, aquisições e logística, e fase efetivas de construção, divididas em obra civil, montagem mecânica e elétrica e comissionamento.

Verificou-se que o contrato principal de integração e construção é normalmente direcionado para as etapas e atividades descritas acima, não incluindo aquisições de equipamentos principais, apenas materiais complementares, como cabos e conectores. A subestação coletora da usina é uma parte da infraestrutura de conexão que normalmente é administrada através de outro contrato.

Na usina em estudo verificaram-se peculiaridades que podem ser comuns em outras obras similares, como adoção de diferentes potências dos módulos e dimensões dos *trackers*. Os números gerais aplicados à obra também foram expressivos, como o número de hastes metálicas que ultrapassou 20 mil unidades, alcançando o índice de 600 unidades por MWp instalado. A soma total de cabos utilizados foi na ordem de 400 mil metros, sendo aplicados quase 11 mil metros por MWp, instalados em quase 15 mil metros de valas escavadas no campo.

Em relação aos marcos contratuais, a finalização da preparação do terreno, entregas dos projetos executivos, lançamentos de todos os cabos, conclusão da fixação dos módulos, cravação das estacas e conclusão do comissionamento são exemplos que podem ser considerados em obras similares. Verificou-se que riscos listados como atraso na mobilização de equipamentos e condições meteorológicas desfavoráveis listadas com impacto médio-alto, aconteceram na prática

e devem ser previamente considerados, com plano de contingência para amenizar os impactos na obra.

A EAP do projeto, onde foram listadas todas as atividades da fase implantação, mesmo aquelas não pertencentes ao escopo de integração/construção, alcançou mais de 100 linhas. A inclusão do item fornecimento, onde estão listados os equipamentos principais, como inversores, estruturas de suporte e módulos, que no caso deste empreendimento foram de responsabilidade do proprietário da usina, tem relevante impacto na sequência construtiva e deve ser intimamente sincronizado com as etapas respectivas de montagem.

A respeito do cronograma do empreendimento estudado, é notório o curto período de obra (oito meses para a fase de construção, doze meses incluindo engenharia e processo de aquisição), visto sua dimensão com mais de 70 ha de área ocupada. Estas características impõem a necessidade de trabalhos paralelos, sendo indispensáveis frentes de serviço simultâneas, em diferentes atividades de montagem elétrica e mecânica. Foi importante identificar a estruturação do cronograma baseado em áreas do empreendimento referenciadas à configuração da usina e perceber a compatibilidade desta abordagem com outras modalidades de construção civil com etapas repetitivas e sequenciais, diferenciando significativamente o modelo de construção das usinas solares de outras modalidades de geração.

Em relação ao modelo proposto de planejamento das atividades de montagem mecânica, considerou-se um método satisfatório, que permite uma interpretação temporal e física do plano em termos gráficos. Foi importante verificar as possibilidades de divisão em diferentes blocos, que podem mudar o dimensionamento das equipes e melhorar a sincronia entre as etapas subsequentes.

Em relação aos resultados obtidos em campo, um fato relevante foi a composição da equipe de cravação que mesmo com a utilização de duas maquinas de cravação e respectivas equipes responsáveis, é composta em 60% pelo efetivo responsável pelos serviços de topografia e distribuição das hastes. Foi significante verificar o progressivo aumento de produtividade e os picos alcançados. A paralização da atividade devido à falta de material foi nitidamente ilustrada e consequente necessidade de replanejamento da atividade durante o processo executivo também foi um evento de destaque nos gráficos de progresso semanal.

6 RECOMENDAÇÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Esta pesquisa foi realizada abordando de maneira geral a estruturação de um empreendimento solar fotovoltaico de grande porte, com foco nas opções de suporte dos painéis, as quais tem influência significativa nas características da obra. Mesmo não tendo sido abordados alguns assuntos periféricos, muitos temas conexos a este trabalho podem ser desenvolvidos, seja para melhorá-lo ou para complementar, aprofundando a pesquisa em alguns assuntos citados a seguir:

- Custos de operação e manutenção em usinas de grande porte no Brasil;
- Confirmação de desempenho do tracker de eixo horizontal através de dados medidos;
- Aprofundar estudo sobre riscos e impactos durante a construção das usinas;
- Comparação de custos de montagem entre diferentes estruturas de suporte;
- Estudo sobre opções de fundações das estruturas, de acordo com diferentes esforços e condições do solo;
- Estudos sobre tempos e movimentos no processo de montagem mecânica das usinas;
- Aplicação de fundamentos BIM em usinas fotovoltaicas;
- Planos de comunicação e logística no processo de engenharia e suprimentos na construção de UFVs de grande porte.

REFERÊNCIAS

ALONSO-ABELLA, M. et al. Analysis of spectral effects on the energy yield of different PV (photovoltaic) technologies: The case of four specific sites. **Energy,** [s.l.], v. 67, p.435-443, abr. 2014. Elsevier BV.

ANEEL (Brasil). Mme (Comp.). **Matriz de Energia Elétrica.** 2016. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acesso em: 09 maio 2016.

ANEEL. BIG - Banco de Informações de Geração: Capacidade de Geração do Brasil. 2017. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm Acesso em: 12 set. 2017.

ARDITI, D., and MOCHTAR, K. (2000), "Trends in productivity improvement in the US construction industry", Constr. Manage. Econ., 18(1), 15–27.

AVILA, Antonio Victorino; JUNGLES, Antônio Edésio. **Gestão do Controle e Planejamento de Empreendimentos.** Florianópolis: Studio S, 2013. 512 p.

BARNES, R. M. **Estudo de Movimentos e Tempos**: projeto e medida do trabalho. São Paulo: Edgar Blucher, 1977.

BOLINGER, Mark; SEEL, Joachim. **Utility-Scale Solar 2014:** An Empirical Analysis of Project Cost, Performance, and Pricing Trends in the United States. Berkeley: Berkeley Lab, 2015. 49 p.

BOLINGER, Mark; WEAVER, Samantha; ZUBOY, Jarett. Is $50/MWh solar for real? Falling project prices and rising capacity factors drive utility-scale PV toward economic competitiveness. **Prog. Photovolt: Res. Appl.,** [s.l.], v. 23, n. 12, p.1847-1856, 22 maio 2015. Wiley-Blackwell.

BRASIL. Tribunal de Contas da União: Tcu. Secretaria de Fiscalização de Obras e Patrimônio da União. **Cartilha de Licenciamento Ambiental.** Brasília: Instituto Serzedello Corrêa, 2004. 57 p.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética - Epe. Ministério de Minas e Energia. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026.** Brasília: MME/EPE, 2017. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PDE/Documents/Arquivos/PDE2026/PDE2026_versao_para_ConsultaPublica.pdf>. Acesso em: 10 set. 2017.

LABORATÓRIO DE MODELAGEM E ESTUDOS DE RECURSOS RENOVÁVEIS DE ENERGIA(LABREN) / CCST (CENTRO DE CIÊNCIA DO SISTEMA TERRESTRE) / INPE (INTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS). . Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2. ed. São José dos Campos - Sp: Inpe, 2017.

BUCHMANN-SLORUP, R. **Criticality in Location-Based Management of Construction**.Denmark, 2012. 202 f. Thesis (Ph.D.) – Department of Management Engineering, Technical University of Denmark, Denmark, 2012.

BURGER, B.; RÜTHER, R. Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature. Solar Energy, v. 80, p. 32-45. 2006

DIEESE - DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS ECONÔMICOS. **Comportamento das tarifas de energia elétrica no Brasil:** Nota Técnica Número 147 - agosto 2015. São Paulo, Sp, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Ministério de Minas e Energia. Leilão de Energia de Reserva de 2014: Participação dos Empreendimentos Solares Fotovoltaicos: Visão Geral. Brasília: Epe, 2014. 22 p. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leilões 2014/NT_EPE-DEE-NT-150_2014.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Ministério de Minas e Energia. **2º Leilão de Energia de Reserva de 2015 – Participação dos Empreendimentos Solares Fotovoltaicos: Visão Geral.** Brasília – Df., 2016. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/leiloes/Documents/Leilão de Reserva (2015)/NT_EPE-DEE-NT-023_2016-r0_completo.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Ministério de Minas e Energia. . **Balanço Energético Nacional 2017:** Relatório Síntese | ano base 2016 |. Rio de Janeiro, Rj: Ben 2017, 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Ministério de Minas e Energia. Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira. Rio de Janeiro, 2012. 58 p. (Nota Técnica).

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Ministério de Minas e Energia. Balanceamento energético nacional - Relatório Síntese 2015 (ano-base 2014). Rio de Janeiro - RJ, 2015. 56 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Ministério de Minas e Energia. **Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica:** Janeiro de 2015. 88. ed. Rio de Janeiro – Rj: Copam/EPE, 2015.

EPIA-EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION (Org.). GLOBAL MARKET OUTLOOK for Photovoltaics 2016-2020. Bruxelas (Belgica): EPIA, 2016.

Finke, M. R. (1998), "A better way to estimate and mitigate disruption", J. Constr. Eng. Manage., 124(6), 490–497

FIRST SOLAR (Estados Unidos). **Module-Data-Sheet/Series-6.** 2017. Disponível em: <http://www.firstsolar.com/-/media/First-Solar/Technical-Documents/Series-6-Datasheets/Series-6-Datasheet.ashx >. Acesso em: 24 ago. 2017.

FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS (Freiburg -Alemanha). **PHOTOVOLTAICS REPORT.** 2017. Disponível em:

<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>. Acesso em: 15 set. 2017.

GOODMAN, J., Nagel, K., Wren, M., and Morris, J. (2014) Applying Lean Process Principles to Improve Labor Efficiency of Solar Photovoltaic Installations. Construction Research Congress 2014: pp. 709-718.

GÓMEZ-GIL, F. J.; WANG, X.; BARNETT, A. Energy production of photovoltaic systems: Fixed, tracking, and concentrating. Renewable and Energy Reviews, v. 16, p. 306313. 2012.

GREEN, Martin A. et al. Solar cell efficiency tables (version 50). **Progress In Photovoltaics: Research and Applications,** [s.l.], v. 25, n. 7, p.668-676, 21 jun. 2017. Wiley-Blackwell.

HORNER, R.M.W. and Duff, A.R. (2001), More for Less – a Contractor's Guide to Improving Productivity in Construction, CIRIA, London

ILUMINA - INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO ESTRATÉGICO DO SETOR ENERGÉTICO (Rio de Janeiro). **Situação da reserva e o "afogamento" da carga.** 2016. Disponível em: <http://ilumina.org.br/situacao-da-reserva-e-o-afogamento-da-carga/>. Acesso em: 16 jul. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Contas Nacionais Trimestrais:** Indicadores de Volume e Valores Correntes - 2016. Brasília - Df, 2016. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Contas_Nacionais/Contas_Nacionais_Trimestrais/Fasciculo_Indicadores_IBGE/pib-vol-val_201604caderno.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2017.

JOÃO TAVARES PINHO (Rio de Janeiro). Cepel - Cresesb (Org.). Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: Gtes, 2014.

JUNGLES, Antonio Edésio; AVILA, Antonio Victorino. Gerenciamento na construção civil. Chapecó: Argos, 2006.

KEMMER, S. L. *et al*. Using the Line of Balance For Production System Design. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, 16., Manchester, 2008. **Proceedings**… Manchester, 2008.

KENLEY, Russell; SEPPÄNEN, Olli. LOCATION-BASED MANAGEMENT OF CONSTRUCTION PROJECTS: PART OF A NEW TYPOLOGY FOR PROJECT SCHEDULING METHODOLOGIES. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 41., 2009, Austin, Tx, Usa. **Proceedings... .** Austin, Tx, Usa: Ieee, 2009. p. 2563 - 2570.

LOOSEMORE, Martin Improving construction productivity: a subcontractor's perspective", Engineering, Construction and Architectural Management, Vol. 21 Iss 3 pp. 245 – 260 , 2014

LORENZO, E.; NARVARTE, L.; MUÑOZ, J. Tracking and back-tracking. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 19, p. 747-753. 2011.

LOSSO, Iseu Reichmann; ARAÚJO, Hércules Nunes.Aplicação do Método da Linha de Balanceamento: Estudo de Caso. In: VI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 1995, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1995. V.1, p. 149-154.

MACÊDO, W. N.; ZILLES, R. Operational Results of GridConnected Photovoltaic System With Different Inverter's Sizing Factors (ISF). Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 15, p. 337-352. 2007.

MAZIERO, Lúcia Teresinha P. Aplicação do Conceito do Método da Linha de Balanceamento à Programação de Obras Repetitivas. Decisões Fundamentais para sua Aplicação. Dissertação (Mestrado em

Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1990. 147 p.

MENDES Jr., Ricardo. Programação da Produção de Edifícios de Múltiplos Pavimentos. Florianópolis, 1999. 252p. Tese (Doutorado em engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina.

MENDES JUNIOR, Ricardo. **Linha de Balanceamento - LOB:** Uma filosofia de programação de obras. Disponível em: <http://www.cesec.ufpr.br/~mendesjr/lob/>. Acesso em: 01 ago. 2016.

METEONORM – Meteonorm Software. Disponível em:<http://www.meteonorm.com/en/downloads>. Acessado em dezembro de 2016

MME; EPE. PDE 2023 - Plano Decenal de Expansão de Energia 2023. Brasília, 2014.434 p.

MYERS, Danny. **Construction Economics:** A New Approach. 3. ed. Nova Iorque: Routledge, 2013. 341 p.

NIEBEL, B.W. **Motion and time study,** 9th edition, Irwin, Illinois, 1993

OLIVIERI, H.; GRANJA, A. D.; PICCHI, F. A. Planejamento tradicional, Location-Based Management System e Last Planner System: um modelo integrado. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 16, n. 1, p. 265-283, jan./mar. 2016. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L. D.; RÜTHER, R. Atlas Brasileiro de Energia Solar: INPE. São José dos Campos - SP, 2006.

POLO, Jesús et al. Worldwide analysis of spectral factors for seven photovoltaic technologies. **Solar Energy,** [s.l.], v. 142, p.194-203, jan. 2017. Elsevier BV.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE (PMI). **Guia PMBOK.:** Um Guia do Conhecimento em Gerenciamento de Projetos. 5. ed. Newtown Square, Pennsylvania 19073-3299 Usa: Project Management Institute (pmi)., 2013. 567 p.

PV MAGAZINE (Alemanha). Pv Magazine. **China installed 24.4 GW of solar in first half of 2017.** 2017. Disponível em: <https://www.pv-magazine.com/2017/08/07/china-installed-24-4-gw-of-solar-in-first-half-of-2017-shows-official-nea-data/>. Acesso em: 15 set. 2017.

QUINTANILLA, Natalia et al. Time and motion study for solar contractors. In: CONSTRUCTION RESEARCH CONGRESS, 12., 2014, Atlanta, Georgia. **Proceedings... .** Atlanta: Asce, 2014. p. 817 - 827.

SAID, M.; EL-SHIMY, M.; ABDELRAHEEM, M. A. Photovoltaics energy: Improved modeling and analysis of the levelized cost of energy (LCOE) and grid parity – Egypt case study. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 9, p. 37-48, 2015.

SANTOS, Ísis Portolan dos. **DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA DE APOIO À DECISÃO EM PROJETOS DE INTEGRAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA À ARQUITETURA.** 2013. 278 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

SHAMIL George Naoum , (2016),"Factors influencing labor productivity on construction sites", International Journal of Productivity and Performance Management, Vol. 65 Iss 3 pp. 401 – 421

TCU - Tribunal de Contas da União (Org.). **Relatório Trimestral de Atividades:** 2º Trimestre. Brasília: Secretaria-geral da Presidência, 2014. Disponível em: <http://portal.tcu.gov.br/publicacoes-institucionais/relatorios/relatorios-de-atividades.htm>. Acesso em: 02 ago. 2015.

VERÍSSIMO, Pedro Henrique Alves. AVALIAÇÃO DE UMA USINA SOLAR FOTOVOLTAICA COMPARANDO DIFERENTES TOPOLOGIAS DE SISTEMAS DE FIXAÇÃO UTILIZANDO DUAS DIFERENTES TECNOLOGIAS FV. 2017. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

YUVENTI, J., Levitt, R., and Robertson, H. (2013)."Organizational Barriers to Productivity and Innovation in Large-Scale, U.S.-Based Photovoltaic System Construction Projects." J. Constr. Eng. Manage