

AVALIAÇÃO DA GESTÃO DA CONSTRUÇÃO DE UMA USINA SOLAR FOTOVOLTAICA

Júlia Possebon Spellmeier – juliapossebon4@gmail.com

Natália Gava Gastaldo – nataliagastaldo@hotmail.com

Paula Donaduzzi Rigo – pauladonaduzzi@gmail.com

Graciele Rediske – gra_rediske@hotmail.com

Carmen Brum Rosa – carmen.b.rosa@ufsm.br

Julio Cezar Mairesse Siluk – jsiluk@ufsm.br

Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas

Resumo. *O mercado de energia solar experimentou um crescimento recorde nos últimos anos em todo o mundo. Consequentemente, o número de empresas integradoras - que comercializam, projetam e instalam usinas fotovoltaicas - também tem crescido em várias regiões. Para que os integradores atendam à demanda do mercado de usinas fotovoltaicas, seus processos devem ser realizados de forma eficiente, principalmente no tempo de execução do projeto. Porém, muitas dessas empresas são jovens, inexperientes e com seus processos internos ainda em desenvolvimento. Assim, esta pesquisa tem como objetivo avaliar a gestão do processo de construção de uma usina fotovoltaica por meio de um estudo de caso. O estudo de caso é uma planta fotovoltaica instalada por uma empresa integradora em Santa Maria, RS, Brasil. O sistema fotovoltaico está instalado no solo, com 990 módulos de 360W cada, totalizando 356 kWp. A estimativa é que a usina produza 551.628,9 kWh por ano. Mapeamento de processos e abordagens de diagrama de rede PERT/CPM foram usadas. A avaliação gestão do processo de construção promoveu uma otimização do tempo de construção de 42 dias úteis para 36 dias úteis. O processo apresentado pode ser usado como base para integradores, uma vez que as plantas fotovoltaicas crescem linearmente. Este estudo ajuda os gerentes e instaladores a refletirem sobre a eficiência de seu processo de construção de usinas fotovoltaicas.*

Palavras-chave: *Energia Solar Fotovoltaica, Caminho Crítico, Otimização de Processos*

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento da demanda global de energia, e escassez de combustíveis fósseis, um dos desafios mais significativos que a sociedade atual enfrenta é a transição para modelos de energia mais sustentáveis. Diante deste contexto, as energias renováveis se destacam, e entre elas, a tecnologia solar fotovoltaica (FV) apresenta crescimento acelerado nos últimos anos (Uriona-Maldonado et al., 2021). A fonte solar se caracteriza por ser uma fonte renovável, barata e ambientalmente aceita, que se tornou muito popular devido à diminuição do seu custo de investimento nos últimos anos (Rediske et al., 2020). Muitos países estão fazendo esforços significativos para aproveitar seu potencial solar FV, formulando melhores estratégias de planejamento, bem como, propondo incentivos para promover a sua expansão na matriz elétrica (Rosa et al., 2018). Para atender a essa demanda por construção de usinas FV, os interessados no crescimento deste setor devem planejar seus projetos em energia solar FV de forma mais eficiente.

Entretanto, se por um lado o mercado exige cada vez mais um construções de usinas FV, por outro lado, as empresas prestadoras desse serviço – chamadas de integradoras ou instaladoras fotovoltaicas – são majoritariamente jovens e com seus processos internos ainda em fase de ajustes. Um exemplo de país que se encontra nessa fase do mercado de construção de usinas FV é o Brasil.

O Brasil apresenta condições geográficas favoráveis para a exploração de fontes renováveis de energia. Embora a matriz elétrica nacional seja predominantemente de base hidroelétrica, tem-se observado uma participação crescente da energia solar (Medeiros et al., 2021). Uma das opções para aumentar a participação na matriz energética brasileira de forma mais rápida é investir em Geração Distribuída (GD). No Brasil, a definição de GD consiste na geração de energia por fontes renováveis com conexão em redes de distribuição próximas ao consumidor, que podem atender a demanda local (Rigo et al., 2019).

Em abril de 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012) elaborou a Resolução Normativa nº 482/2012, regulamentando a GD de pequena escala, que se denomina Microgeração e Minigeração Distribuída (MMGD). Essa norma viabilizou a instalação de sistemas fotovoltaicos, permitindo a conexão desses sistemas na rede de distribuição, classificada como GD. A MMGD consiste na produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais geradoras, as quais utilizam fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada. Essas centrais geradoras são conectadas à rede de distribuição por meio das instalações nas unidades consumidoras. Há certa diferença entre as modalidades de MMGD. A micro refere-se a uma central geradora, com potência instalada menor ou igual a 75 quilowatts (kW), enquanto a minigeração diz respeito às centrais geradoras com potência instalada superior

a 75 kW e menor ou igual a 5 MW. Também existem diferentes classes de instalação MMDG, que podem ser residenciais, comerciais, industriais, rurais ou públicas. A fonte solar FV representa mais de 95% de toda a GD (ANEEL, 2021).

Segundo a Associação Brasileira de Geração Distribuída (ABGD) (ABGD, 2021), o Brasil atingiu o marco de 5 GW de potência instalada de geração distribuída de energia elétrica em 2020, apesar do momento de crise provocada pela pandemia COVID-19. E acredita-se que a GD continuou crescendo por ser uma alternativa para reduzir custos para o consumidor. Pelas projeções da ABGD, até o final de 2021, a potência instalada de GD no Brasil pode chegar a 7GW. Para aproveitar essa oportunidade de mercado, o número de empresas integradoras de sistemas fotovoltaicos no Brasil – que projetam, vendem e instalam sistemas FV – também apresentaram alta taxa de crescimento, passando de 2.741 em janeiro de 2018 para 14,7 mil no mesmo período de 2021 (GREENER, 2020).

Diante do intenso crescimento do mercado de energia FV no Brasil, surge o questionamento quanto a organização e gestão de projetos dentro das empresas integradoras, e como elas podem tornar seus processos mais eficientes. Para atender as demandas do mercado, as empresas integradoras podem não ter conseguido estruturar e otimizar seus processos, o que é essencial para manter a viabilidade da prestação de seus serviços. Com isso, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a gestão do processo de construção de uma usina de energia fotovoltaica, a fim de otimiza-lo. Para atingir esse objetivo foi necessário escolher um estudo de caso, mapear o processo de construção da usina FV, analisar e mensurar os tempos e sequenciamentos, construir a Rede PERT/CPM e realizar as análises necessárias para a otimização.

Este trabalho é justificado sob dois âmbitos: a perspectiva das empresas integradoras de geração de energia fotovoltaica e a perspectiva acadêmica. Com a grande inserção de empresas concorrentes no setor, é importante que as integradoras mantenham seus processos organizados e otimizados, para que assim entreguem o melhor resultado para seus clientes. Investir na adoção de técnicas e ferramentas de gerenciamento de projetos é fundamental para manter as empresas competitivas no mercado (Hanfang Li et al., 2020). Além disso, com o processo otimizado, pode-se dar uma previsão precisa da data de entrega do empreendimento ao cliente. O sucesso de um projeto depende principalmente de um processo eficaz de gerenciamento (Silva, Silva, Turet, 2018). Ademais, em projetos de grande escala, é essencial a coordenação das atividades da organização (Lee et al., 2017).

Quanto a perspectiva acadêmica, realizou-se uma pesquisa nas bases *Scopus* e *Web of Science* com a seguinte *string*: “*power plant*” AND (*solar OR photovoltaic*) AND *optimization* AND (*Building OR construction*)”, resultando em 171 artigos relacionados. Ao realizar uma análise dos títulos dos artigos encontrados na pesquisa realizada, percebe-se uma carência de estudos que se concentram nos processos das empresas integradoras, principalmente o processo de construção de usinas FV. Elencou-se dois estudos que apresentam sinergia a este: Mishakova et al. (2016) escreve sobre a aplicação da ferramenta PERT em processos de construção, porém não apresentaram o processo em questão e seu mapeamento. Os autores Lee et al., (2017) aplicam a ferramenta Fuzzy PERT em processos de construção de plantas de energia renovável, realizando um estudo de caso em uma planta de energia eólica. O estudo apresentou uma metodologia pertinente a análise, porém, como o estudo anterior, não dá foco ao processo em questão.

2. MÉTODO

Esta pesquisa é composta por um estudo de caso e a aplicação das técnicas de mapeamento de processos e diagrama de rede PERT/CPM. O procedimento foi dividido em duas fases. A primeira fase tratou do acompanhamento da construção da usina do estudo de caso e a segunda fase versou a busca pela otimização da construção, com vistas a ser aplicado em futuras construções.

Por meio do contato com as empresas integradoras, foi selecionada uma usina que atendesse aos requisitos do estudo: usina instalada em solo, na modalidade GD e com construção não iniciada. A escolha de usina em solo e de GD baseou-se na representatividade desse tipo de instalação para a integradoras brasileiras, que atuam principalmente com projetos de GD (GREENER, 2020). E a construção não poderia estar iniciada pois os pesquisadores precisam acompanhar, sem interferir, todo o processo. O acompanhamento do processo permitiu o seu mapeamento, a coleta dos sequenciamentos das atividades e dos tempos de duração. Em posse desses dados, foi construída a rede PERT/CPM da situação atual.

A segunda fase do estudo foi a busca pela otimização, analisando o processo atual. Para isso, foi realizado um grupo focal com o gestor da empresa, um projetista de usinas FV, dois instaladores e os quatro pesquisadores. Com esse grupo focal, foi possível identificar as melhorias do processo e propor uma nova Rede PERT/CPM a ser aplicada em novos projetos de construções de usinas FV.

2.1 Cenário do Estudo de Caso

Esta pesquisa foi realizada em uma usina em construção na cidade de Santa Maria, no estado do Rio Grande do Sul. O Rio Grande do Sul é o terceiro estado do Brasil em número e potência instalada. Possui 51.051 instalações, o que corresponde a 574.232,51 kW de potência (ANEEL, 2021). A usina FV deste estudo de caso é de Micro e Minigeração de Geração Distribuída de responsabilidade uma empresa integradora da cidade de Santa Maria – RS.

A empresa foi fundada no ano de 2005 na cidade de Santa Maria e atualmente conta com aproximadamente 180 funcionários e atua em 13 estados brasileiros. O projeto escolhido, ilustrado na Figura 1, faz parte de uma fazenda solar de minigeração distribuída. A usina FV é instalada no solo, possui 990 módulos de 360W cada, totalizando em 356 kWp

e 10 inversores de 27kW e 1 inversor de 20kW, totalizando em 290kW. Estima-se que a usina produzirá 551.628,9 kWh por ano.



Figura 1 - Usina do estudo de caso. Fonte: Empresa (2020).

2.2 Rede PERT/CPM

As empresas estão enfrentando intensa concorrência no mercado atual. Portanto, tempo de entrega reduzido, redução de custos, produtos diferenciados e maior qualidade são essenciais para a sobrevivência de uma empresa (Chen and Pang, 2010). A eficiência relacionada ao tempo de execução e aos recursos relacionados ao projeto são itens essenciais a serem gerenciados (García-Nieves et al., 2019). O gerenciamento de projetos consiste na organização e controle de atividades, de forma que o projeto possa ser concluído em tão pouco tempo quanto possível (Chen and Huang, 2007; Shtub, 1997). O principal motivo para se otimizar um processo do ponto de vista das empresas é reduzir os custos do projeto e o finalizar no tempo previsto. Há diversas técnicas matemáticas e serem utilizadas para fim de otimização como programação linear, entre outras (Hsie et al., 2009). O presente trabalho aborda a otimização de processos através de mapeamento de processos e diagrama de redes, juntamente com a aplicação dos métodos PERT e CPM.

O Program Evaluation and Review Technique (PERT) e o Critical Path Method (CPM) são métodos de gerenciamento de projetos. PERT é um método que pode ser usado para estimar a duração da atividade e calcular a probabilidade de conclusão do tempo do projeto, enquanto CPM é um método de agendamento usado para encontrar o caminho crítico e descrever a relação entre as atividades (Baits, H.A., Puspita, I.A., Bay, 2020). A combinação PERT/CPM busca identificar as atividades que consomem mais tempo na rede de atividades que representa um projeto. A ferramenta PERT pode trazer muitos benefícios às organizações, como proporcionar uma melhor visualização das etapas e atividades do projeto, estimar o tempo de execução e indicar quais são as atividades críticas para a conclusão do projeto (Azaron et al., 2006; Chen and Huang, 2007).

O procedimento utilizado para a aplicação dos métodos PERT e CPM pode ser caracterizado em cinco etapas: (1) Identificar as atividades, seus tempos e seu sequenciamento; (2) Representar a rede; (3) Identificar o caminho crítico; (4) Determinar os parâmetros: Início ou término mais cedo, início ou término mais tarde e folgas de tempo das atividades; e (5) Interpretar os resultados.

A representação de redes expressa a sequência de atividades de um projeto em termos de nós e setas (Fitzsimmons and Fitzsimmons, 2020). Essa representação pode ser feita como atividades sobre nós (AON, activity on node), onde os nós representam as atividades (A_{ij}) e as setas o seu fluxo, ou como atividades sobre as setas (AOA, activity on arrow), onde as setas representam as atividades (A_{ij}) e os nós são os eventos (E_j) que expressam seu início e término. Este trabalho usou a representação AOA. A Figura 2 ilustra as duas representações citadas acima.



Figura 2 – Representações para a Rede PERT/CPM. Fonte: (Battesini, 2019)

O caminho crítico de um processo pode ser determinado a partir da análise dos tempos das atividades. Para Fitzsimmons e Fitzsimmons (2020) um dos mais importantes aspectos da análise do caminho crítico é a identificação das folgas, uma vez que as atividades com folga zero são críticas e não podem ser atrasadas sem que o projeto também atrase. Para determinar as folgas, primeiramente devem ser identificados os tempos de Início Cedo (IC) e Início Tarde (IT) ou Término Cedo (TC) e Término Tarde (TT). O IC é o tempo mais cedo que uma atividade pode ser iniciada, determinado pela Equação 1. TC é o tempo mais cedo que uma atividade pode ser terminada, determinado pela Equação 2. IT, tempo mais tarde que uma atividade pode ser iniciada, determinado pela Equação 3. TT é o tempo mais tarde que uma atividade

pode ser terminada, determinado a partir da Equação 4. Os tempos mais cedo são calculados da frente para trás e os tempos mais tarde de trás para frente. As folgas das atividades podem ser calculadas de duas formas: pela diferença entre IC e IT, (Equação 5) ou pela diferença de TC e TT (Equação 6).

$$IC_i = TC_{predecessor} \quad (1)$$

$$TC_i = IC_i + t_i \quad (2)$$

$$IT_i = TT_i - t_i \quad (3)$$

$$TT_i = IT_{sucessor} \quad (4)$$

$$F_i = IT_i - IC_i \quad (5)$$

$$F_i = TT_i - TC_i \quad (6)$$

As atividades do caminho crítico possuem folga nula, pois se essas atividades atrasarem, atrasa todo o projeto (Battesini, 2019).

3. RESULTADOS

Este capítulo tem por objetivo apresentar os resultados obtidos durante a aplicação do estudo de caso e está dividido em três seções: o mapeamento do processo de construção da usina FV; a análise da situação atual; e a otimização do processo.

3.1 Mapeamento do Processo

A Figura 3 apresenta o processo. O processo de execução da obra tem início com a etapa de topografia, realizada exclusivamente por uma empresa terceirizada. Em seguida, é feita a marcação do local das cavas, definido com base no projeto solar. Com a marcação realizada é feita a abertura das cavas, utilizando um perfurador de solo helicoidal. Então, as bases da estrutura são alocadas nas cavas e realiza-se o nivelamento. Após, é realizada a concretagem das bases, onde deve-se levar em consideração o tempo de cura do concreto, para que seja possível passar para a próximas etapas deste processo.

Na próxima etapa é realizada a montagem da estrutura. Com a estrutura devidamente montada, podem ser instalados os módulos e realizar a instalação elétrica. Finalizada as etapas anteriores, é feita a conexão dos cabos e módulos. A partir disso, faz-se a instalação dos inversores e sua devida configuração. A última etapa é a configuração do aplicativo *SolarWeb*, utilizado pela empresa para monitoramento remoto da planta e da sua geração de energia.

Em paralelo o processo tem as atividades de empedramento do terreno, o cercamento e instalação dos dispositivos de segurança. Os dispositivos de segurança instalados na obra são dispositivos de proteção contra sobre corrente e dispositivos de proteção contra surtos (DPS), além disso é realizado o aterramento de todas as estruturas. Com todas as etapas de execução da obra finalizadas, é feita a solicitação de vistoria, a qual é realizada pela concessionária de energia elétrica local. Se a obra estiver adequada é feita a solicitação da troca do medidor, se não, são feitas as adequações necessárias e solicita-se novamente a vistoria da obra.



Figura 3 – Usina do estudo de caso

3.2 Situação Atual

Após o desenvolvimento do mapeamento do processo de construção da usina FV, a próxima etapa deste estudo consistiu em mensurar os tempos e sequenciamentos. No tempo de execução de cada uma das etapas, foi descontado o tempo de preparação e tempo de deslocamento. O tempo de preparação refere-se ao tempo que os funcionários utilizam para organizar as ferramentas e equipamentos necessários para a execução da atividade, considerado 30 min. Já o tempo de deslocamento, refere-se ao tempo que os funcionários utilizam para ir da empresa até a obra, considerado 20 min, pois a distância da empresa até a obra é de cerca de 8 km. O APÊNDICE A apresenta a quantidade de preparações e

deslocamentos necessários para cada atividade, sendo que a última coluna apresenta o tempo total de preparação e deslocamento.

As atividades são executadas sequencialmente ou paralelamente, por isso, a análise sobre a dependência entre atividades foi realizada. Na Tabela 1 constam as dependências das atividades e seu respectivo tempo de execução, mensurado em horas. A execução das atividades depende do clima, sendo que em algumas são possíveis executar em dias chuvosos e outras não.

Tabela 1 – Dependência e tempo de execução das etapas.

Atividade	Atividade Precedente	Atividade Sucessora	Tempo de Execução (horas)
A	Marcar os locais para a abertura das cavas	-	3
B	Abrir as cavas	A	13
C	Nivelar as bases para a estrutura	B	33
D	Concretar as bases	C	31
E	Montar a estrutura	D	13
F	Instalar os módulos	E, G, L	112
G	Realizar a instalação elétrica	E	40
H	Conectar os cabos solares e módulos	F, G	3
I	Instalar os inversores	H	7
J	Configurar os inversores	I	7
K	Configurar o app <i>solarweb</i>	J	7
L	Realizar o empedramento	E	198
M	Realizar cercamento	-	66
N	Instalar os dispositivos de segurança	G, M	92
O	Solicitar vistoria	K, L, N	0

Duas atividades não possuem precedentes, A e M, o que significa que podem iniciar ao mesmo tempo e serem executadas paralelamente. Da atividade A até a E, as atividades ocorrem sequencialmente. Quando executada a atividade E, três atividades podem ser executadas paralelamente: F, G e L. Porém, as atividades F e G devem estar finalizadas para a continuação da obra, com a atividade H. A partir, a atividade H até a K ocorre sequencialmente.

É importante ressaltar que a atividade final que marca a finalização da obra é a solicitação da vistoria (Atividade O). Como essa atividade não faz parte da obra, é utilizada como marco de finalização, em que três atividades a precedem, a K, L e N. As atividades que mais demandam tempo são as atividades de empedramento (L), instalação dos módulos (F) e instalação dos dispositivos de segurança (N). Em contrapartida, algumas atividades podem ser executadas rapidamente, demandando apenas meio dia de trabalho. A Tabela 2 apresenta uma análise dos parâmetros TC, TT e F, para cada uma das atividades do processo de construção, mensurado em horas.

Tabela 2 – Análise de TC, TT e F da situação atual.

Atividade	t	TC _i	TT _i	F _i
A	Marcar os locais para a abertura das cavas	3	3	0
B	Abrir as cavas	13	16	0
C	Nivelar as bases para a estrutura	33	49	0
D	Concretar as bases	31	80	0
E	Montar a estrutura	13	93	0
F	Instalar os módulos	112	205	62
G	Realizar a instalação elétrica	40	205	62
H	Conectar os cabos solares e módulos	3	208	62
I	Instalar os inversores	7	215	62
J	Configurar os inversores	7	222	62
K	Configurar o app <i>solarweb</i>	7	229	62
L	Realizar o empedramento	198	291	0
M	Realizar cercamento	66	66	108
N	Instalar os dispositivos de segurança	92	205	61

As atividades do caminho crítico possuem folga nula, ou seja, qualquer atraso nessas atividades pode acarretar um atraso em todo o projeto. Oito atividades do processo possuem folgas de execução: F, G, H, I, J, K, M e N. A Figura 4 apresenta a Rede PERT/CPM deste processo. O caminho crítico desse processo é o caminho em destaque na rede, composto pelas atividades: A – B – C – D – E – L. Para a execução das atividades pertencentes ao caminho crítico são necessárias 291 horas de trabalho. A atividade mais duradora do caminho crítico é a atividade de empedramento, a qual durou 198 horas. A atividade de empedramento teve grande demora devido à falta de planejamento e mapeamento do processo, pois se fosse realizada antes da etapa de montagem da estrutura, a atividade poderia ser finalizada em menos tempo.

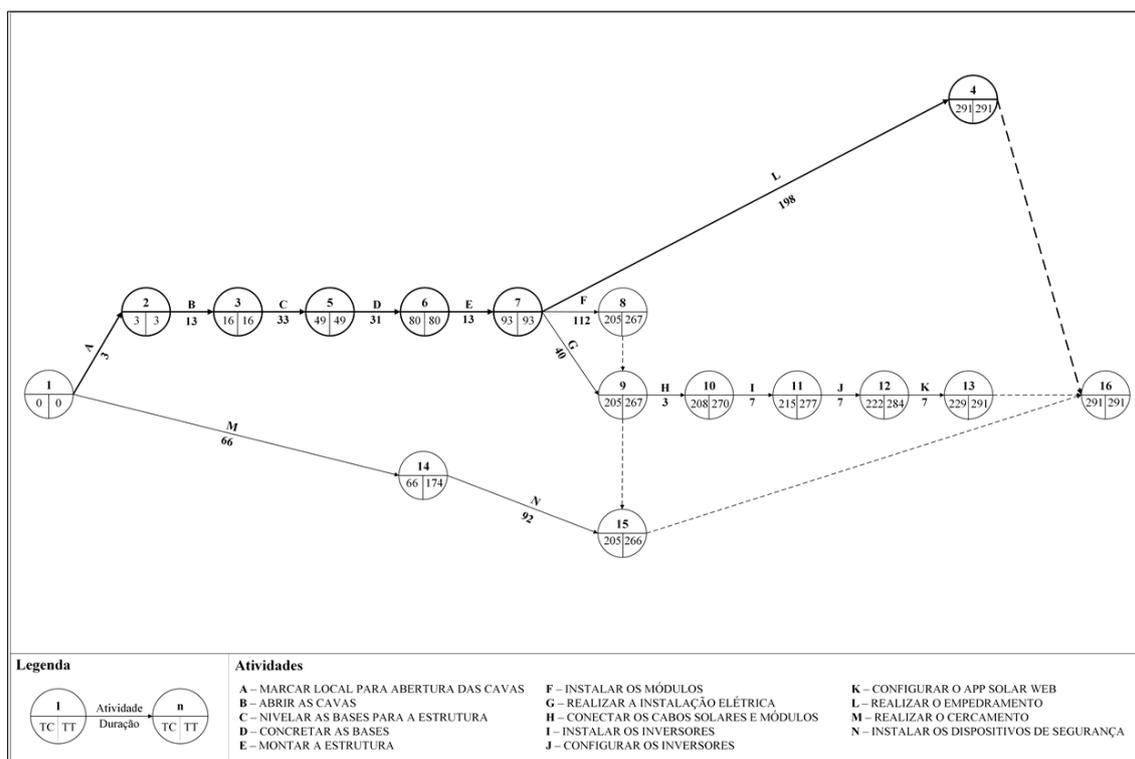


Figura 4 – Rede PERT/CPM da situação atual do processo de construção de usinas.

3.3 Otimização

Durante o processo de discussão com os colaboradores da empresa que participaram da execução da obra e da percepção de que o sequenciamento de algumas atividades promoveu tempos de execução maiores que os necessários, foram assumidos alguns pressupostos para realizar a otimização do processo, como:

- 1) Realizar a atividade de empedramento antes da montagem da estrutura. Na obra analisada essa etapa foi realizada após a montagem da estrutura, dificultando o processo.
- 2) Propor a criação de um cronograma de compra, para que não haja atraso da obra falta de equipamentos. Foi constatada a falta de módulos para a instalação por três dias uteis.
- 3) Realizar as atividades de instalação e configuração dos inversores em paralelo.

Diante disso, foi realizada uma nova análise dos tempos e sequenciamentos, assumindo as três propostas citadas acima. Quanto aos tempos de preparação e deslocamentos descontados no tempo de execução das atividades foram atualizadas as modificações. A atividade de empedramento, que durou cerca de 198 horas, quando realizada antes da atividade de montagem da estrutura, passou a durar 13 horas, porque o fato de colocar as pedras antes da montagem das estruturas permite que essas sejam colocadas como auxílio de uma máquina e não por carrinhos de mão, como o ocorrido na situação atual. A atividade de instalação dos módulos, que durou 112 horas, sendo que os funcionários ficaram três dias de trabalho parados devido à falta de módulos, passou a durar 92 horas. A análise das dependências para a situação otimizada está ilustrada na Tabela 3.

Tabela 3 – Análise de dependência da situação otimizada.

Atividade	Atividade Precedente	Atividade Sucessora	Tempo de Execução (horas)
A	-	B	3
B	A	C	13
C	B	D	33
D	C	L	31
E	L	F, G	13
F	E	H	92
G	E	H	40
H	F, G	I, J	3
I	H	K	7
J	H	K	7
K	J	O	7
L	D	E, M	13
M	L	N	66
N	M	O	92
O	K, N	-	0

As Atividades A até a D ocorrem sequencialmente, seguido da Atividade L, a qual faz parte da proposta de otimização. A Atividade L possui duas ramificações, as quais acontecem em paralelo: Atividades E e M. A partir da Atividade E, duas atividades acontecem em paralelo, F e G, as quais precedem a Atividade H. Após a atividade H, as atividades I e J acontecem em paralelo e também fazem parte da proposta de otimização, seguidas da Atividade K. A partir da Atividade M, acontece apenas a atividade N. A Tabela 4 ilustra a análise dos parâmetros Término Cedo, Término Tarde e Folga, mensurados em horas.

Tabela 4 – Análise de TC, TT e F da situação otimizada

Atividade	t	TC _i	TT _i	F _i
A Marcar os locais para a abertura das cavas	3	3	3	0
B Abrir as cavas	13	16	16	0
C Nivelar as bases para a estrutura	33	49	49	0
D Concretar as bases	31	80	80	0
E Montar a estrutura	13	106	142	36
F Instalar os módulos	92	198	234	36
G Realizar a instalação elétrica	40	198	234	36
H Conectar os cabos solares e módulos	3	201	237	36
I Instalar os inversores	7	208	244	36
J Configurar os inversores	7	208	244	36
K Configurar o app <i>solarweb</i>	7	215	251	36
L Realizar o empedramento	13	93	93	0
M Realizar cercamento	66	159	159	0
N Instalar os dispositivos de segurança	92	251	251	0

O caminho crítico da Rede PERT/CPM otimizada, Figura 5, possui sete Atividades: A – B – C – D – L – M – N. Além disso, as atividades do caminho crítico podem ser concluídas em 251 horas. Sete atividades possuem folga de 36 horas, ou seja, podem atrasar até 36 horas que não atrasarão o término do projeto.

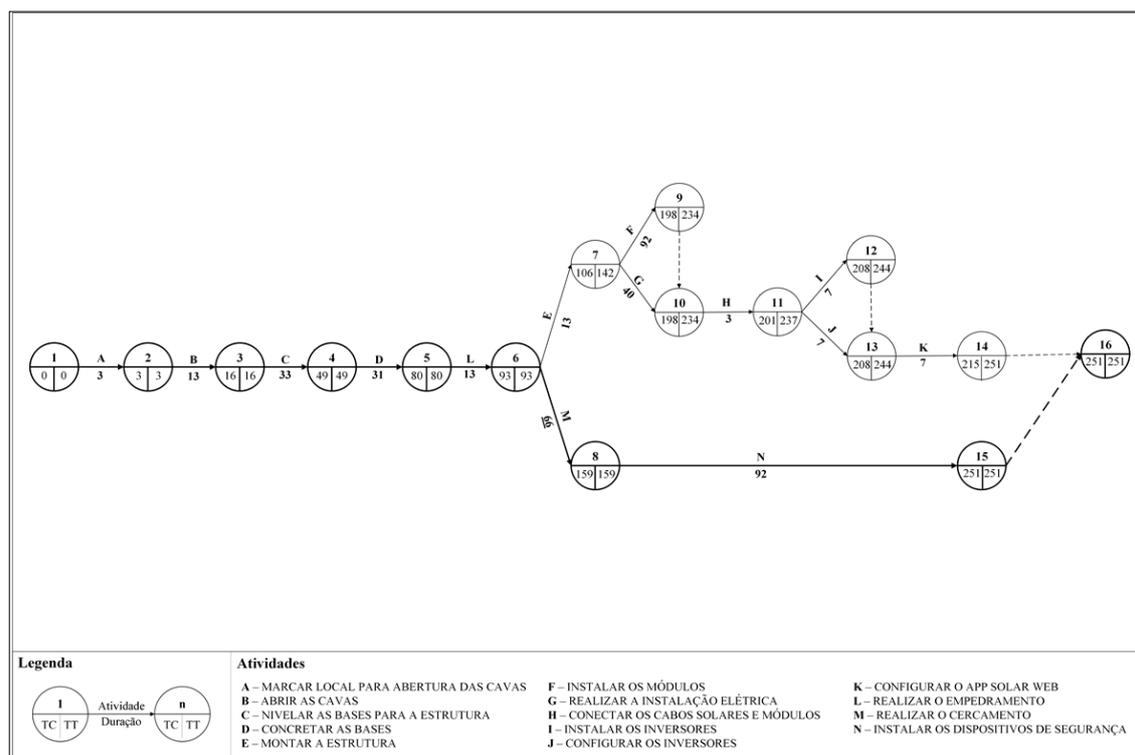


Figura 5 – Rede PERT/CPM da situação otimizada,

4. CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento da pesquisa foi possível analisar uma situação real, realizando o mapeamento de todo o processo de construção de usinas da empresa. Além disso, foi possível analisar os processos e discutir acerca de melhorias que visam contribuir para o melhor desempenho dos projetos realizados por empresas integradoras.

A partir do mapeamento das 15 atividades, de A até O, e mensuração dos seus tempos e sequenciamentos, foi possível identificar o caminho crítico do processo. Da situação atual, com caminho crítico de 291 horas, aproximadamente 42 dias uteis, foi possível chegar em uma situação otimizada, com caminho crítico de 251 horas, aproximadamente 36 dias uteis, para o referido estudo de caso, uma usina de 356kW instalados. O caminho crítico otimizado possui sete atividades, com

folgas nulas e as demais atividades tem 36 horas de folga.

A aplicação do estudo é necessária as empresas integradoras, visto que o mercado de energia FV está em alta e para suprir as necessidades do mercado, é fundamental que seus processos estejam sendo realizados de forma eficiente. O estudo foi realizado em uma única usina, mas como o processo é padronizado e os tempos mudam conforme o tamanho da usina, as usinas crescem linearmente, e por isso, a rede desenvolvida pode ser utilizada para demais projetos. Além disso, o mapeamento realizado possibilita aos projetistas maior conhecimento sobre o processo e a rede construída possibilita a visão quanto ao tempo necessário para a execução do projeto, facilitando na mensuração do tempo estimado para o cliente.

Sugere-se estudos futuros na área de otimização de construção de usinas fotovoltaicas, como a aplicação dessa metodologia em um número maior de usinas para continuar o processo de melhoria contínua.

APÊNDICE A

Tabela 5 – Tempo de preparação e deslocamento da situação atual

	Atividade	Preparações (Quantidade)	Deslocamentos (Quantidade)	Tempo descontado (min)
A	Marcar os locais para a abertura das cavas	1	2	70
B	Abrir as cavas	4	8	280
C	Nivelar as bases para a estrutura	10	20	700
D	Concretar as bases	4	8	280
E	Montar a estrutura	4	8	280
F	Instalar os módulos	34	68	2.380
G	Realizar a instalação elétrica	12	24	840
H	Conectar os cabos solares e módulos	1	2	70
I	Instalar os inversores	2	4	140
J	Configurar os inversores	2	4	140
K	Configurar o app <i>solarweb</i>	2	4	140
L	Realizar o empedramento	60	120	4.200
M	Realizar cercamento	20	40	1.400
N	Instalar os dispositivos de segurança	28	56	1.960

REFERÊNCIAS

- ABGD, A.B. de G.D.-, 2021. Geração distribuída alcança 5 GW de potência instalada [WWW Document]. URL <http://www.abgd.com.br/portal/blog-pg/87/geracao-distribuida-alcanca-5-gw-de-potencia-instalada/>
- ANEEL, 2021. Geração Distribuída [WWW Document]. Agência Nac. Energ. Elétrica. URL <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiZjM4NjM0OWYtN2IwZS00YjViLTllMjItN2E5MzBkN2ZlMzVkIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzB1MSIsImMiOiR9> (accessed 11.11.21).
- ANEEL, 2015. Resolução Normativa nº687, de 24 de novembro de 2015. [WWW Document]. Agência Nac. Energ. Elétrica. URL <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf> (accessed 1.12.21).
- ANEEL, A.N. de E.E.-, 2012. Resolução Normativa nº482, de 17 de abril de 2012.
- Azaron, A., Katagiri, H., Sakawa, M., Kato, K., Memariani, A., 2006. A multi-objective resource allocation problem in PERT networks. *Eur. J. Oper. Res.* 172, 838–854. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.11.018>
- Baits, H.A., Puspita, I.A., Bay, A.F., 2020. Combination of program evaluation and review technique (PERT) and critical path method (CPM) for project schedule development. *Int. J. Integr. Eng.* 12, 68–75.
- Battesini, M., 2019. Programação Linear: Conceitos, modelagens e soluções no R, 1st ed. Editora UFSM, Santa Maria.
- Camilo, H.F., Udaeta, M.E.M., Gimenes, A.L.V., Grimoni, J.A.B., 2017. Assessment of photovoltaic distributed generation – Issues of grid connected systems through the consumer side applied to a case study of Brazil. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 71, 712–719. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.099>
- Chen, C.-T., Huang, S.-F., 2007. Applying fuzzy method for measuring criticality in project network. *Inf. Sci. (Ny)*. 177, 2448–2458. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ins.2007.01.035>
- Chen, H.H., Pang, C., 2010. Organizational forms for knowledge management in photovoltaic solar energy industry. *Knowledge-Based Syst.* 23, 924–933. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.knosys.2010.06.008>
- Ferreira, A., Kunh, S.S., Fagnani, K.C., De Souza, T.A., Tonezer, C., 2018. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 81, 181–191.
- Fitzsimmons, J.A., Fitzsimmons, M.J., 2020. Service Management: Operations, Strategy, Information Technology, 7th ed. McGraw-Hill, New York.
- García-Nieves, J.D., Ponz-Tienda, J.L., Ospina-Alvarado, A., Bonilla-Palacios, M., 2019. Multipurpose linear programming optimization model for repetitive activities scheduling in construction projects. *Autom. Constr.* 105, 102799. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.020>
- GREENER, 2020. Estudo Estratégico: Mercado Fotovoltaico de Geração Distribuída 1º Semestre de 2020.
- Hanfang Li, Lin, H., Tan, Q., Wu, P., Wang, C., Gejirifu De, Huang, L., 2020. Research on the policy route of China's distributed photovoltaic power generation. *Energy Reports* 6, 254–263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.12.027>
- Hanna, R., Leach, M., Torriti, J., 2018. Microgeneration: The installer perspective. *Renew. Energy* 116, 458–469. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.023>

- Hsie, M., Chang, C.-J., Yang, I.-T., Huang, C.-Y., 2009. Resource-constrained scheduling for continuous repetitive projects with time-based production units. *Autom. Constr.* 18, 942–949. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.04.006>
- José de Castro Vieira, S., Tapia Carpio, L.G., 2020. The economic impact on residential fees associated with the expansion of grid-connected solar photovoltaic generators in Brazil. *Renew. Energy* 159, 1084–1098. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.016>
- Jung, J., Han, S., Kim, B., 2019. Digital numerical map-oriented estimation of solar energy potential for site selection of photovoltaic solar panels on national highway slopes. *Appl. Energy* 242, 57–68. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.101>
- Lee, A.H.I., Kang, H.-Y., Huang, T.-T., 2017. Project Management Model for Constructing a Renewable Energy Plant. *Procedia Eng.* 174, 145–154. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.186>
- Lu, H., Zhao, W., 2018. Effects of particle sizes and tilt angles on dust deposition characteristics of a ground-mounted solar photovoltaic system. *Appl. Energy* 220, 514–526. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.095>
- Medeiros, S.E.L., Nilo, P.F., Silva, L.P., Santos, C.A.C., Carvalho, M., Abrahão, R., 2021. Influence of climatic variability on the electricity generation potential by renewable sources in the Brazilian semi-arid region. *J. Arid Environ.* 184, 104331. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104331>
- Mignon, I., Broughel, A.E., 2020. What interests do intermediaries prioritize during wind- and solar project development? *Environ. Innov. Soc. Transitions.* <https://doi.org/10.1016/j.eist.2020.01.014>
- Mishakova, A., Vakhrushkina, A., Murgul, V., Sazonova, T., 2016. Project Control Based on a Mutual Application of Pert and Earned Value Management Methods. *Procedia Eng.* 165, 1812–1817. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.927>
- Rediske, G., Siluk, J.C.M., Michels, L., Rigo, P.D., Rosa, C.B., Cugler, G., 2020. Multi-criteria decision-making model for assessment of large photovoltaic farms in Brazil. *Energy* 197, 117167. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117167>
- Rigo, P.D., Siluk, J.C.M., Lacerda, D.P., Rosa, C.B., Rediske, G., 2019. Is the success of small-scale photovoltaic solar energy generation achievable in Brazil? *J. Clean. Prod.* 240. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118243>
- Rosa, C.B., Rediske, G., Rigo, P.D., M. Wendt, J.F., Michels, L., M. Siluk, J.C., 2018. Development of a Computational Tool for Measuring Organizational Competitiveness in the Photovoltaic Power Plants. *Energies* 11. <https://doi.org/10.3390/en11040867>
- Sampaio, P.G.V., González, M.O.A., 2017. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 74, 590–601. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081>
- Shtub, A., 1997. Project segmentation—a tool for project management. *Int. J. Proj. Manag.* 15, 15–19. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(96\)00017-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0263-7863(96)00017-8)
- SILVA, M. L., SILVA, M. T. M., TURET, J., 2018. Gerenciamento de projetos aplicado em um evento universitário realizado no agreste pernambucano: um estudo comparativo, in: Encontro Nacional de Engenharia de Produção - ENEGEP. Maceió.
- Sinitskaya, E., Gomez, K.J., Bao, Q., Yang, M.C., MacDonald, E.F., 2020. Designing linked journey maps to understand the complexities of the residential solar energy market. *Renew. Energy* 145, 1910–1922. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.018>
- Uriona-Maldonado, M., Caliari, T., de Souza Costa, L.H., Vaz, C.R., 2021. The Diffusion of Solar Photovoltaics in Brazil: A Technological Innovation System Approach, in: Pereira, L., Carvalho, J.R.H., Krus, P., Klofsten, M., De Negri, V.J. (Eds.), *Proceedings of IDEAS 2019*. Springer International Publishing, Cham, pp. 377–385.

OPTIMIZATION OF THE CONSTRUCTION OF A SOLAR PHOTOVOLTAIC PLANT

Abstract. *The solar energy market has experienced record growth in years across the world. Consequently, the number of integrator companies - that sell, design and install photovoltaic plants - has also grown in several regions. For integrators to meet the market demand for photovoltaic plants, their processes must be carried out efficiently, especially during the project execution time. However, many of these companies are young, inexperienced and with their internal processes still under development. Thus, this research aims at an optimized model of the construction process of a PV plant through a case study. The case study is a PV plant installed by an integrator company in Santa Maria, RS, Brazil. The photovoltaic system is installed on the ground, with 990 modules of 360W each, totaling 356 kWp. The estimate is that the plant produces 551,628.9 kWh per year. Process mapping and PERT/CPM network diagram approaches were used. The optimization performed reduced the build time from 42 working days to 36 working days. The presented process can be used as a basis for integrators, since photovoltaic plants grow linearly. This study helps managers and installers reflect on the efficiency of their photovoltaic plant construction process.*

Key words: *Photovoltaic Solar Energy, Critical Path, Process Optimization.*