

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

GUSTAVO LARA CAMPOS CAVENAGHI

**MODELO ONTOLOGICO E MÉTODO FMEA
APLICADOS À ANÁLISE DE FALHAS EM PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS**

São Carlos
2014

GUSTAVO LARA CAMPOS CAVENAGHI

**MODELO ONTOLOGICO E MÉTODO FMEA
APLICADOS À ANÁLISE DE FALHAS EM PAINÉIS
FOTOVOLTAICOS**

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ricardo A. S. Fernandes
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo.

Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em
Sistemas de Energia e Automação

São Carlos
2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

C379m

Cavenaghi, Gustavo Lara Campos
Modelo ontológico e método FMEA aplicados à análise
de falhas em painéis fotovoltaicos / Gustavo Lara
Campos Cavenaghi; orientador Ricardo A. S. Fernandes.
São Carlos, 2014.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2014.

1. Análise de falhas . 2. Painéis fotovoltaicos. 3.
Modelo ontológico. 4. FMEA. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Gustavo Lara Campos Cavenaghi

Título: "Modelo ontológico e método FMEA aplicados à análise de falhas em painéis fotovoltaicos"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 18/06/2014,

com NOTA 8,0 (oito, zero), pela Comissão Julgadora:

*Prof. Dr. Ricardo Augusto Souza Fernandes - (Orientador -
DEE/CCET/UFScar)*

*Mestre Amilcar Flamarion Querubini Gonçalves - (Doutorando -
SEL/EESC/USP)*

*Mestre Tatiane Cristina da Costa Fernandes - (Doutorando -
SEL/EESC/USP)*

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel

Resumo

CAVENAGHI, G. L. C. (2014). *Modelo Ontológico e Método FMEA Aplicados à Análise de Falhas em Painéis Fotovoltaicos*. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

Atualmente, pode ser notada uma crescente procura por fontes alternativas de geração de energia elétrica que tem sido impulsionada pela redução da dependência de fontes de energia consideradas finitas e pelo desenvolvimento de novas tecnologias que podem ser empregadas para a redução de custos das fontes alternativas. Desta forma, a tecnologia fotovoltaica se encaixa perfeitamente nesse cenário devido ao rápido desenvolvimento tecnológico e redução de custos fabris e operacionais. Entretanto, muitos destes avanços tecnológicos foram possíveis somente após incentivos governamentais. Cabe ainda comentar que os painéis fotovoltaicos receberam tais incentivos por causa de sua necessidade em sistemas de geração distribuída. Além disso, o emprego de painéis solares pode ser visto, em alguns casos, como micro gerações de energia elétrica. No entanto, as células fotovoltaicas e os painéis já finalizados, desde sua produção até o final de sua vida útil, são expostos a ambientes agressivos que podem acarretar em suas falhas. Neste sentido, este trabalho de conclusão de curso visa o desenvolvimento de uma metodologia alternativa à análise de falhas durante as fases de construção e operação dos painéis fotovoltaicos. Sendo assim, esta análise torna-se importante para que tais falhas possam ser mitigadas. Deste modo, nota-se que se estas falhas foram identificadas e mitigadas em estágios iniciais de produção ou operação, algumas variáveis como custo e confiabilidade podem ser aprimoradas.

Palavras Chave: Análise de falha, Painéis fotovoltaicos, Modelo ontológico.

Abstract

CAVENAGHI, G. L. C. (2014). *Ontological Model and FMEA Method Applied to Failure Analysis on Photovoltaic Panels*. Major Thesis – São Carlos Engineering School, University of São Paulo, 2014.

Nowadays, the world has shown a rapidly increase in the search for new alternatives for power generation, the necessity to reduce our dependency in fossil fuels in addition with the development of new technologies pushes forward this new market. The photovoltaic technology fits perfectly in this scenery, showing a fast technological development and a fast reduction of manufacture and operational costs, thanks in many cases due to governmental help, playing an important role in distributed generation. Photovoltaic modules are exposed to a harsh environment and are subjected to several stresses since its production until its extended life cycle in the field. This work intends to offer an alternative method through the usage of computational and production techniques in order to further propose an alternative analysis to construction and operational failures. These failures, if identified in early stages of construction could represent a gain in cost reduction, reliability and system safety.

Keywords: Failure mode and effect analysis, Photovoltaic panels, Ontological model.

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 – CIRCUITO EQUIVALENTE SIMPLIFICADO DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	6
FIGURA 2.2 – MÁXIMA POTÊNCIA QUE PODE SER EXTRAÍDA DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA.....	7
FIGURA 3.1 – DIAGRAMA REPRESENTATIVO DOS MATERIAIS EMPREGADOS EM MÓDULOS PV	9
FIGURA 3.2 – PRODUTO RESULTANTE DO PROCESSO DE MANUFATURA DE UMA CÉLULA PV.....	11
FIGURA 3.3 – COMPONENTES DE UM PAINEL PV.....	13
FIGURA 3.4 – PROCEDIMENTOS PARA CONSTRUÇÃO DE PAINÉIS PV.....	13
FIGURA 3.5 – CONEXÃO DE PAINÉIS PV EM SÉRIE.....	14
FIGURA 3.6 – CONEXÃO DE PAINÉIS PV EM PARALELO.....	15
FIGURA 4.1 – MODELO 3D DO MÓDULO PV.....	18
FIGURA 4.2 – COMPONENTES DO MODELO 3D DO MÓDULO PV.....	19
FIGURA 4.3 – MODELO 3D DO MÓDULO 3D COM DESTAQUE PARA AS CONEXÕES.....	19
FIGURA 4.4 – MODELO 2D DO MÓDULO PV COM VISTA LATERAL.....	20
FIGURA 4.5 – ESTRUTURA DA LINGUAGEM GOL.....	253
FIGURA 4.6 – MODELO ONTOLOGICO DE UM MÓDULO PV.....	255

Lista de Tabelas

TABELA 4.1 – FORMULÁRIO FMEA PARA CAMADA INFERIOR.....	30
TABELA 4.2 – FORMULÁRIO FMEA PARA CABOS.....	30
TABELA 4.3 – FORMULÁRIO FMEA PARA CAMADA FRONTAL.....	31
TABELA 4.4 – FORMULÁRIO FMEA PARA O ENCAPSULANTE.....	32
TABELA 4.5 – FORMULÁRIO FMEA PARA AS CÉLULAS PV.....	33
TABELA 4.6 – FORMULÁRIO FMEA PARA AS ESTRUTURAS.....	34
TABELA 4.7 – FORMULÁRIO FMEA PARA O CIRCUITO DE INTERCONEXÃO.....	35
TABELA 4.8 – FORMULÁRIO FMEA PARA A CAIXA DE JUNÇÃO.....	36

Sumário

RESUMO.....	I
ABSTRACT.....	III
LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS	VI
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO AO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	1
1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA AO TEMA DO TRABALHO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ORGANIZAÇÃO	3
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS SOBRE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS.....	5
CAPÍTULO 3 MANUFATURA E OPERAÇÃO DE MÓDULOS PV	9
3.1 MANUFATURA DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE SILÍCIO	9
3.2 MANUFATURA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	11
3.3 OPERAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.....	14
CAPÍTULO 4 ANÁLISE DE FALHAS EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	17
4.1 CONSTRUÇÃO DE MODELOS FÍSICOS	17
4.2 DEFINIÇÃO DO MODELO ONTOLOGICO.....	20
4.2.1 FUNDAMENTOS DE ONTOLOGIA	21
4.2.2 META-MODELOS EM GOL.....	23
4.3 ANÁLISE DE FALHAS EMPREGANDO O MÉTODO FMEA	27
4.3.1 POTENCIAIS FALHAS EM PAINÉIS PV	28
4.3.2 RESULTADOS OBTIDOS PELA APLICAÇÃO DO MÉTODO FMEA.....	29
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41
ANEXO A	413

Capítulo 1

Introdução ao Trabalho de Conclusão de Curso

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA AO TEMA DO TRABALHO

Muitas nações têm implantado políticas que visam alterar, em partes, o rumo de suas matrizes energéticas. Estas alterações têm sido impulsionadas devido às preocupações e à necessidade de produzir energia limpa, ou seja, com baixa emissão de CO₂. Além desta premissa, outro fator que incrementa o uso das fontes alternativas de energia está relacionado ao aumento dos preços dos combustíveis, os quais têm crescido a cada ano. Neste interim, as redes de distribuição de energia elétrica com gerações distribuídas (cogeração por usinas sucroalcooleiras, biomassa, pequenas centrais hidroelétricas, dentre outros) e micro gerações (produção de energia por micro turbogeradores eólicos, painéis fotovoltaicos de pequeno porte conectados em edifícios e/ou residências) têm se destacado, pois estes se apresentam como alternativas à produção de energia elétrica descentralizada e com baixa emissão de CO₂.

É importante comentar que dentre as fontes alternativas de energia elétrica supracitadas, as micro eólicas, as Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCH) e os sistemas de cogeração das usinas apresentam forte dependência de fatores como vento (nem todas as regiões do país têm predominância de vento), cursos d'água com bom potencial energético (também não podem ser encontrados em todas as regiões) e processos industriais que são dependentes de colheita para que seja obtida grande quantidade de material para a geração da energia elétrica. Neste contexto, os painéis fotovoltaicos podem ser vislumbrados como alternativas viáveis de serem aplicados no país como um todo, pois, apesar da dependência de irradiação solar, até mesmo em dias nublados eles podem ser operados com baixa eficiência. No entanto, em um país como o Brasil que é reconhecido pela sua ampla abrangência solar, esses sistemas podem ser considerados.

É notável que as tecnologias de Painéis Fotovoltaicos (PV - *Photovoltaic*) têm se aprimorado rapidamente nos últimos anos, isto graças aos avanços tecnológicos, à redução de custos de materiais e ao suporte governamental para geração de energia

baseada em fontes renováveis (TYAGI et al., 2013). Além do contexto de geração distribuída, sistemas baseados em PV são foco na área de geração de energia elétrica para áreas remotas e/ou rurais, ou seja, aquelas áreas que não possuem acesso às redes de distribuição de energia elétrica.

Países como Alemanha, Japão, Estados Unidos e República Tcheca apresentam grande capacidade instalada de painéis fotovoltaicos, por este motivo, notou-se um crescimento mundial na capacidade de geração fotovoltaica, entre 2008 e 2010, de 16 GW para 40 GW (SAWIN e SVERRISSON, 2011). Devido a este rápido crescimento, os sistemas baseados em painéis fotovoltaicos têm sido alvos de diversas pesquisas, entretanto, mesmo com todas as vantagens e todo desenvolvimento da tecnologia que fora supramencionado, seus custos de produção e operação ainda são considerados elevados. Estes custos são elevados, pois, os módulos PV são expostos a condições ambientais extremas e estresses operacionais que podem causar diversos danos, além disso, estão sujeitos a métodos e linhas de produção que poderiam ser aperfeiçoados. Cabe comentar que as falhas operacionais estão normalmente relacionadas a soldas mal feitas, caixas de junção que se encontram soltas, descolamento de camadas e possíveis rupturas de materiais (DJORDJEVIC, PARLEVLIET e JENNINGS, 2014). No entanto, todas estas possíveis falhas de módulos PV têm forte impacto no custo final do produto e em sua confiabilidade.

Em conformidade com os aspectos produtivos e operacionais mencionados, a indústria fotovoltaica está cada vez mais focada em segurança e confiabilidade de seus sistemas, porém, a falta de dados e métodos torna difícil para essas indústrias caracterizar os riscos do negócio. Mesmo que os testes de qualificação dos módulos de PV tenham apresentado grande progresso nos últimos anos, eles não podem garantir a confiabilidade do produto por toda sua vida útil. Assim, em (TSANAKAS e BOTSRIS, 2011), os autores comentam que defeitos e, especialmente, rachaduras nos materiais dos componentes estruturais de um sistema PV podem ser crucialmente prejudiciais para o desempenho funcional do mesmo. Portanto, a detecção destes defeitos é essencial para garantir segurança e uma operação ideal do equipamento.

1.2 OBJETIVOS

Seguindo as premissas supracitadas, as quais são relacionadas à detecção de falhas em painéis fotovoltaicos, este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um método que realize uma análise de módulos PV com o intuito

de aprimorar sua produção por meio da utilização de técnicas para que apresentem o diagnóstico e prognóstico para estes módulos durante sua manufatura e/ou operação. Neste contexto, a ferramenta desenvolvida visa melhorar a confiabilidade na manufatura de módulos PV, bem como em seus custos finais. Esta ferramenta de diagnóstico e prognóstico de módulos PV considera a teoria ontológica, que caracteriza e divide os componentes, conexões e relações existentes no módulo PV por meio de uma linguagem conhecida por GOL (*General Ontological Language*). Assim, com base nesta linguagem pretende-se construir um modelo, uma estrutura que servirá como um guia, para análise de falhas, chamado de modelo de conhecimento.

Na sequência, este modelo de conhecimento forma a base para a análise dos problemas de manufatura e operacionais dos módulos PV. Para dar suporte à análise, dois modelos CAD (Computer-aided design) foram desenvolvidos, em que o primeiro é representado por um modelo 3D e o segundo considera somente uma representação 2D, uma vista em corte do módulo PV.

Por fim, aplica-se um Método de Análise do Modo e Efeito de Falha (FMEA – *Failure Mode and Effect Analysis*) que realiza uma análise das falhas e seus efeitos sob os módulos PV. Este método considera tanto o modelo ontológico como os modelos físicos dos módulos PV.

1.3 ORGANIZAÇÃO

O trabalho de conclusão de curso está organizado de forma que no Capítulo 2 são tratados os conceitos fundamentais sobre células fotovoltaicas e o Capítulo 3 se destina a apresentar os processos de manufatura e operação de módulos e painéis fotovoltaicos. O Capítulo 4 discute os aspectos da construção de modelos físicos de painéis fotovoltaicos, apresenta os conceitos necessários para a construção de um modelo de conhecimento baseado em ontologia e define os objetivos da aplicação do método FMEA. Por fim, no Capítulo 5 são fornecidas as conclusões gerais obtidas por este trabalho no que diz respeito à análise de falhas em painéis fotovoltaicos.

Capítulo 2

Fundamentos sobre Células Fotovoltaicas

O objetivo principal dos painéis fotovoltaicos é realizar a transformação da energia irradiada pelo sol em uma corrente elétrica que pode ser capturada e utilizada como fonte de potência. O painel é composto de um grupo de células feitas de materiais semicondutores que se comportam de maneira que, quando sensibilizados por luz, produzem uma corrente elétrica.

Ao se construir células fotovoltaicas, o material mais utilizado é o silício, pois, quando dopado com fósforo, o mesmo torna-se um material com elétrons fracamente ligados a seus átomos de origem que são facilmente liberados com pouca energia. É importante mencionar que o fósforo é considerado um material dopante do tipo *n*. Por outro lado, quando o silício é dopado com o boro, haverá uma falta de elétrons denominada lacuna. Assim, com pouca energia, os elétrons de camadas próximas podem ocupar essas lacunas. O boro é considerado um material dopante do tipo *p* (GTES/CEPEL, 2004). Assim, unindo os materiais do tipo *n* e do tipo *p* em um único material, há a formação de uma junção *pn*. Entre essa junção *pn* forma-se um *gap* energético que pode ser representado por um campo elétrico ao qual dá-se o nome de região de depleção. Entretanto, caso essa junção seja exposta a fótons com uma energia maior que a energia do *gap*, ocorrerá a geração de pares elétron-lacuna que, por sua vez, gera um campo elétrico diferente de zero que acelera as cargas e, por fim, surge uma corrente através desta junção *pn*. Este efeito é chamado de Efeito Fotovoltaico (GTES/CEPEL, 2004).

Com base nestas características físicas dos elementos semicondutores, o comportamento de uma célula pode ser representado por meio de um circuito elétrico simples, conforme mostrado na Figura 2.1, que contém uma fonte (G) que simula o estabelecimento de uma corrente elétrica quando há a incidência de luz, um diodo (S1) representando a junção *pn* (comportamento semicondutor do material) e as resistências (R_e e R_s) que simulam as perdas relacionadas às correntes de fuga e à resistência da própria célula fotovoltaica respectivamente.

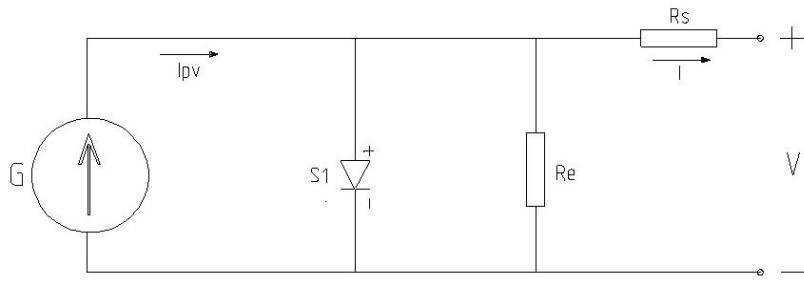


Figura 2.1 – Circuito equivalente simplificado de uma célula fotovoltaica.

Por meio do circuito apresentado na Figura 2.1, torna-se possível obter as curvas características de Corrente x Tensão para uma célula fotovoltaica. Sem nenhuma irradiação solar, a célula possui as mesmas características de um diodo, ou seja, há a necessidade de se aplicar uma certa tensão para conseguir obter uma corrente. Cabe ainda informar que ao ensaiar uma célula fotovoltaica em laboratório, sua curva é exatamente igual ao inverso da curva de um diodo. Ou seja, a incidência de luz sobre uma célula fotovoltaica equivale a transferir a equação característica do diodo apresentada pela Equação (2.1) para a Equação (2.2).

$$I = I_l - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] - I_l \quad (2.2)$$

onde I_l é a corrente gerada pela irradiação, I_0 é a corrente de saturação, n é o fator de idealidade, K é a constante de Boltzmann, T é a temperatura, $q = 1,6 \times 10^{-19}$ é a carga do elétron e V é a tensão elétrica.

Algumas definições são importantes ao se falar de células fotovoltaicas, entre elas estão os conceitos de: Corrente de curto-círcuito; Tensão de circuito aberto; Potência máxima; Fator de forma; e Eficiência.

Como mencionado em (EBERHARDT, 2005), a corrente de curto-círcuito (I_{sc}) é a corrente que se obtém da célula quando a tensão em suas extremidades é de 0 V, isto é, a máxima corrente que se pode obter. Já a tensão de circuito aberto (V_{oc}) é a tensão na qual os processos de recombinação se igualam aos processos de geração e, portanto, a corrente que se extraí da célula é nula. Em células de silício, os valores são aproximadamente de 0,5 V, entretanto, em células de arseneto de gálio, a V_{oc} é da ordem de 1 V.

A máxima potência que se extrai da célula ($P_{máx}$) é igual ao produto da tensão pela corrente elétrica no ponto de inflexão da curva (Equação 2.3) e pode ser notada pelo gráfico parametrizado pela intensidade da radiação e temperatura em que foi obtido da Figura 2.2:

$$P_{máx} = I \times V$$

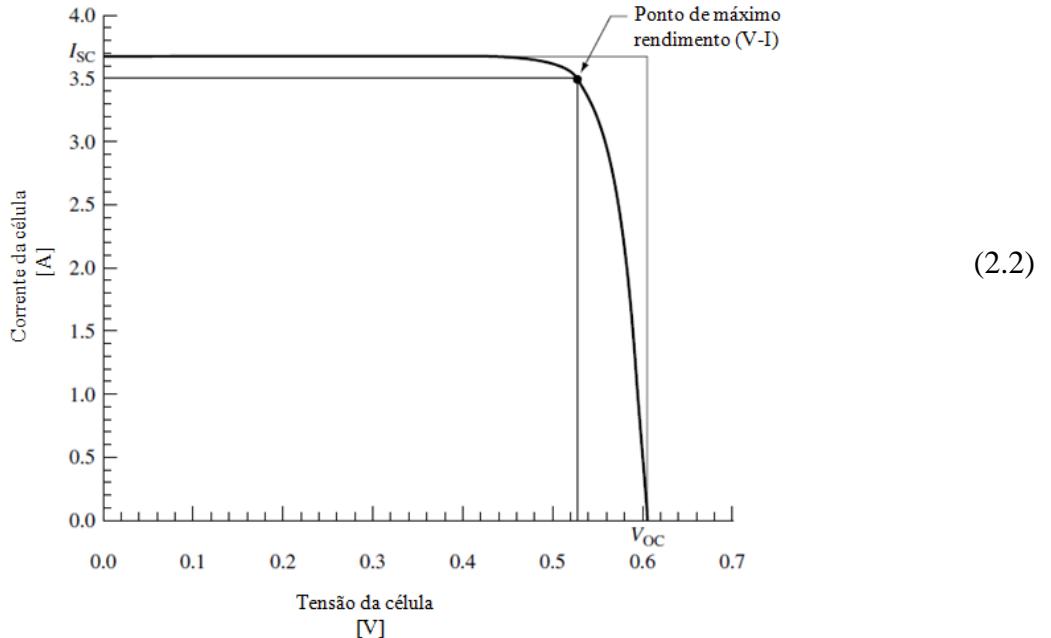


Figura 2.2 – Máxima potência que pode ser extraída de uma célula fotovoltaica.

O fator de forma (FF) está intimamente relacionado com a eficiência da célula e pode ser definido por:

$$FF = \frac{V_{oc} \times I_{sc}}{P_{máx}} \quad (2.4)$$

Quanto maior o Fator de forma, maior será a probabilidade da célula apresentar uma alta Eficiência (h) que é um parâmetro que define a qualidade da célula fotovoltaica e representa a relação entre a potência elétrica que se obtém da célula e a potência da radiação solar incidente. Deste modo, sua eficiência pode ser expressa por:

$$h = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{A \times I_{sol}} \quad (2.5)$$

onde, I_{sol} é a irradiância incidente na célula, isto é, a radiação solar por unidade de área e tempo incidente na célula e A é a área da célula.

A eficiência de uma célula fotovoltaica depende de vários fatores como intensidade de radiação solar, temperatura, perdas ópticas, resistência e espessura de materiais, ângulo de penetração dos raios UV, entre outros. Podendo chegar a um valor de aproximadamente 20%.

Assim, com o devido esclarecimento das características básicas de funcionamento e modelagem e a definição de parâmetros fundamentais das células PV, torna-se necessária a compreensão do processo produtivo de células e módulos fotovoltaicos. Para assim formar a base de conhecimento desse sistema e tornar a construção e aplicação da ferramenta proposta nesse trabalho sólida e bem fundamentada.

Capítulo 3

Manufatura e Operação de Módulos PV

Um painel fotovoltaico consiste em um conjunto de células PV eletricamente conectadas entre si e encapsuladas em uma unidade. Todo o conjunto é unido em um módulo e isolado do ambiente para prevenção de acidentes e entrada de substâncias que possam danificar o painel. Existem muitos tipos diferentes de estruturas e células, assim, este Capítulo destina-se a esclarecer a construção, produção e operação desses módulos com intuito de melhor representar e descrever esses sistemas.

3.1 MANUFATURA DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS DE SILÍCIO

Conforme previamente discutido, grande parte das células PV são feitas de materiais semicondutores que têm como base o silício, isto devido à sua relação custo/benefício. Porém, outros materiais como Arseneto de gálio (GaAs), Telureto de Cádmio (CdTe), Sulfeto de Cádmio (CdS), materiais orgânicos, poliméricos e células híbridas também podem ser encontrados. Apesar da boa relação custo/benefício das células PV de silício, muitas pesquisas são destinadas ao desenvolvimento de novos materiais e tecnologias para produção destas células (TYAGI et al., 2013). Um diagrama de blocos que representa os tipos de materiais que podem ser utilizados para a construção de módulos PV pode ser visualizado por meio da Figura 3.1.

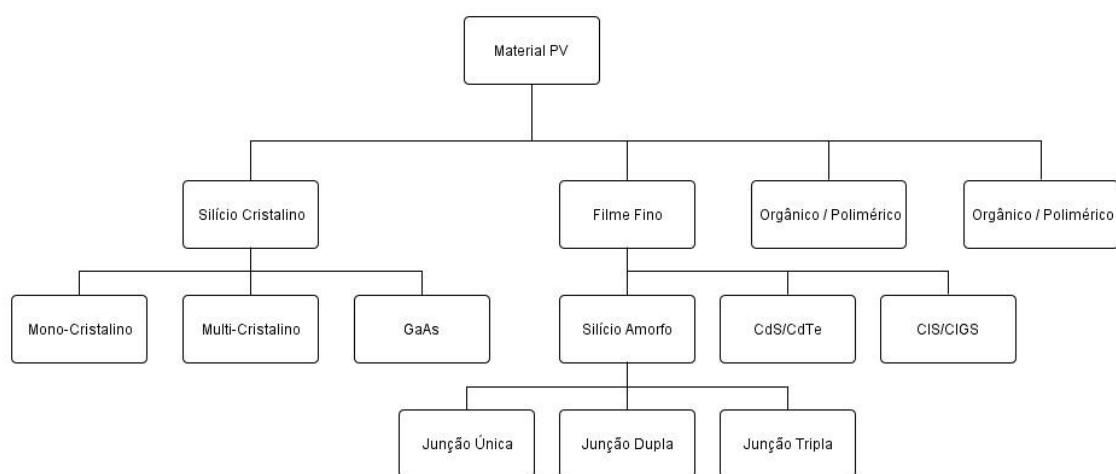


Figura 3.1 – Diagrama representativo dos materiais empregados em módulos PV.
(Adaptado de: TYAGI et al., 2013)

Células PV de filme fino foram propostas como uma alternativa interessante, pois, utilizam menos material na construção de um módulo e, portanto, torna-o mais barato. Em contrapartida, estas células apresentam baixa eficiência. Por este motivo e também pela constante queda no preço do silício, apesar da grande diversidade de matérias disponíves, o mesmo continua sendo empregado para fins de construção de células PV.

O silício pode estar na forma monocristalina, multicristalina ou amorfa, sendo que a diferença entre eles é a ordem estrutural do semicondutor, ou seja, o quanto sua estrutura é perfeitamente ordenada ou regular. Sendo este um dos fatores que afeta suas propriedades elétricas.

A maioria das células contém silício monocristalino ou multicristalino, dependendo da necessidade do consumidor em termos de custo e eficiência. Existem muitas técnicas para produção dessas células, porém, um procedimento muito conhecido é denominado de *screen printing*. Basicamente, o *screen printing* consiste em cortar de um lingote do material semicondutor várias fatias finas que formarão a base da célula.

Após limpos e retiradas as superfícies rugosas, estas peças são aquecidas em um forno com uma atmosfera de fósforo criando uma camada desse material na superfície do silício. Supondo que a peça principal seja um semicondutor de silício do tipo *p*, esse processo cria uma camada externa do tipo *n* na peça. Em seguida, o material é usinado de forma a cortar seus extremos para isolar a junção inferior da junção superior e, uma pasta metálica, é então aplicada no inferior da célula que novamente segue para um forno onde a junção traseira é destruída e o metal faz contato com a base do tipo *p*.

A célula é então invertida em seu eixo e uma camada de pasta metálica é aplicada na junção posterior de forma semelhante ao processo descrito, porém, desta vez a pasta é impressa em um padrão de linhas ou *fingers* para criar os canais que irão drenar a corrente elétrica gerada pela célula e conduzí-la ao barramento da mesma.

O produto final pode ser otimizado (aumentando a eficiência da célula) por meio de diversas técnicas como a texturização do topo, onde a parte superior da célula é comumente usinada na forma de micro pirâmides com o intuito de que estas possam refletir os raios de luz em direções que maximizem a irradiação desses raios dentro da célula e minimizem ao máximo a reflexão de raios para fora da mesma.

Outro procedimento é a adição de um revestimento antirrefletivo que consiste de um material dielétrico com espessura especialmente escolhida de forma a criar uma interferência destrutiva entre ondas incidentes e refletidas buscando uma reflexão zero de luz e, assim, reduzir a porcentagem de perdas. É importante destacar que o fundo da célula também pode ser texturizado utilizando técnicas semelhantes para aumentar ainda mais sua eficiência.

O produto resultante de todo este processo de manufatura supracitado encontra-se ilustrado por meio da Figura 3.2.

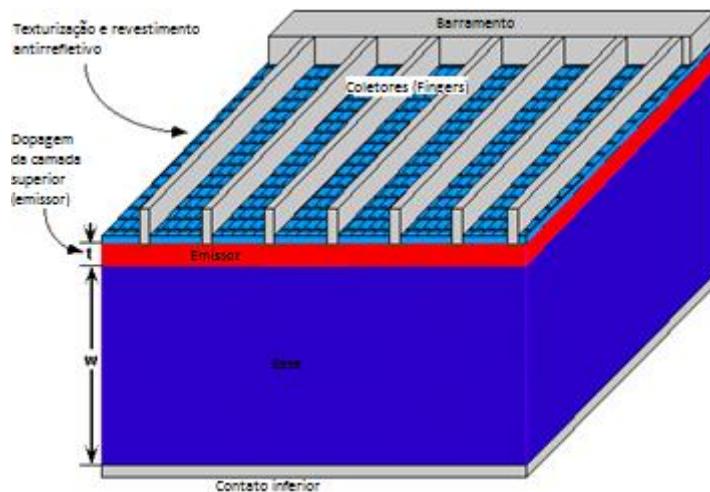


Figura 3.2 – Produto resultante do processo de manufatura de uma célula PV.
(Fonte: PVEDUCATION, 2014)

3.2 MANUFATURA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

O projeto de um painel PV depende da tarefa que o mesmo irá cumprir e o do local onde irá operar, podendo ser rígido ou flexível de acordo com os materiais das células e dos módulos.

O arranjo básico consiste de um material transparente como superfície frontal, um material encapsulante, uma camada inferior e um suporte que da estrutura a essa junção de materiais. A superfície frontal pode ser feita de vidro, acrílico ou uma variedade de polímeros. É comum empregar como encapsulante o Acetato de etil vinila (EVA) e a camada inferior composta de Fluoreto de polivinila (PVF), também conhecido como Tedlar.

Existe uma variedade de projetos, sendo que algumas aplicações (como em módulos bifaciais) incluem uma camada inferior de material translucido ou de vidro nas

chamadas estruturas *glass-glass*. O painel deve ser obrigatoriamente selado para prevenir a entrada de agentes do ambiente e, ao mesmo tempo, prover uma boa transferência de calor para garantir que o sistema seja capaz de operar em condições otimizadas.

Sua estrutura frontal deve possuir uma alta transmissão e baixa reflexão nos comprimentos de onda que podem ser utilizados pelas células, além de ser a prova de água. Também deve possuir resistência mecânica e estrutura rígida para suportar as células, fiação e componentes.

O painel deve ser estável sob longa exposição a raios ultravioleta e possuir boa resistividade térmica, por este motivo, o material mais utilizado é o vidro temperado de baixo teor de ferro. Ressalta-se que este tipo de vidro apresenta baixo custo, estabilidade, rigidez, transparência, impermeabilidade e propriedades que garantem maior limpeza do mesmo.

A camada inferior normalmente é composta por filmes de materiais poliméricos que devem ser a prova de água e vapores, além de possuir baixa resistência térmica.

O encapsulante é utilizado para conferir adesão entre as células, a superfície de topo e a camada traseira. Este deve ser obrigatoriamente composto por material transparente, resistente térmico e tolerante à alta exposição aos raios UV. Normalmente, duas camadas finas de EVA são posicionadas de forma a formar um conjunto de camadas com o circuito das células entre elas e cozidos em um processo de laminação para compor uma só peça. A escolha do EVA é devido à sua baixa condutibilidade elétrica, baixo ponto de fusão e polimerização, alta impermeabilidade e alta transparência.

Para dar suporte ao conjunto de materiais já mencionados, uma estrutura metálica, comumente de alumínio (Al), é construída na forma de um quadro e posicionada em volta do sanduíche de materiais que irá possuir também a função de caixa de cabos. A conexão elétrica do módulo é feita via uma caixa de junção fixada na parte traseira do painel.

Com o intuito de melhor ilustrar os procedimentos supracitados, a Figura 3.3 apresenta um corte na vista lateral de um painel PV, em que cada uma das partes do painel está em destaque.

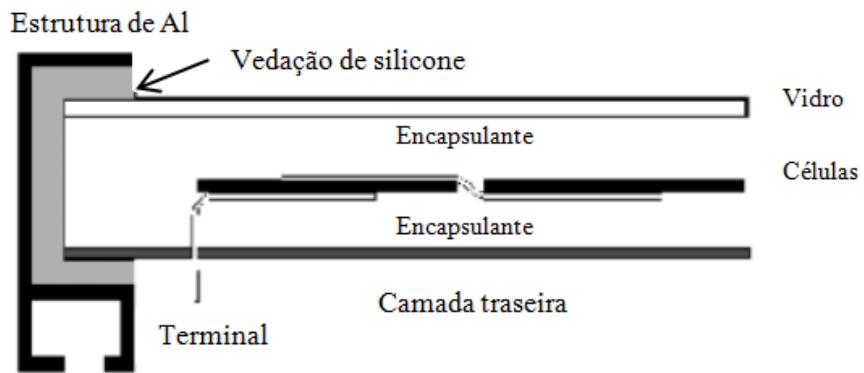


Figura 3.3 – Componentes de um painel PV.
 (Adaptada de: LUQUE e HEGEDUS, 2011)

Conforme mencionado pelos autores LUQUE e HEGEDUS (2011), a construção de um painel varia de acordo com o fabricante e tipo de módulo, porém, o procedimento básico consiste em definir o arranjo do circuito, realizar o processo de laminação, cura e pós-laminação. Após o arranjo das células em um circuito, todo o conjunto é levado a um laminador que é composto de uma câmara onde o "sanduíche" de materiais é introduzido. O ar é evacuado da câmara e uma pressão mecânica é exercida. A câmara é então aquecida até a temperatura de fusão do EVA para que o mesmo seja incorporado às células. Em seguida, a camada superior da câmara é preenchida com ar de forma a fazer com que o diafragma superior pressione o laminado e a temperatura é aumentada iniciando o estágio de cura. O fluxograma da figura 3.4 exemplifica o processo produtivo.



Figura 3.4 – Procedimentos para construção de painéis PV.
 (Adaptada de: LUQUE e HEGEDUS, 2011)

As células são selecionadas e soldadas um a um no circuito, em seguida o material é envolvido entre duas camadas de EVA e encaminhado a um laminador, de onde um composto único é formado como descrito no processo acima. Os agentes de cura

induzem o *cross-linking* do EVA e as ligações químicas são feitas transversalmente formando ligações fortes entre as moléculas que antes da cura estavam fracamente ligadas. Cabe informar que este processo é análogo à vulcanização da borracha e leva aproximadamente 60 minutos (CZANDERNA e PERN, 1996).

O processo é irreversível e crucial para o encapsulamento das células. Após esfriar, o laminado é retirado da câmara e o estágio de pós-laminação é iniciado (EL AMRANI et al., 2007). Nesse estágio as sobras de material são retiradas e a estrutura é montada em volta do laminado, a caixa de junção é instalada e conectada aos barramentos do circuito de células e o módulo segue para empacotamento.

3.3 OPERAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Os painéis PV podem ser operados com dois arranjos possíveis de suas células, a saber: conexão em série (Figura 3.5) ou conexão em paralelo (Figura 3.6). É importante mencionar que a conexão série é vastamente utilizada, o barramento de contato do topo de uma célula é conectado ao contato do fundo da próxima célula formando uma ligação série entre o número desejado de células, de acordo com o valor escolhido para a potência final do módulo.

Uma célula típica possui uma tensão de aproximadamente 0,5 V em uma temperatura de 25 °C e iluminação AM1.5, este último índice corresponde ao coeficiente de irradiação solar a uma determinada latitude levando em conta o ângulo de incidência correspondente à massa de ar equivalente por onde a luz penetrará em determinada região do planeta. A configuração série ou paralelo irá determinar a corrente e tensão final do módulo sob uma dada iluminação e condição de carga (PEARSALL e ROBERT, 2002).

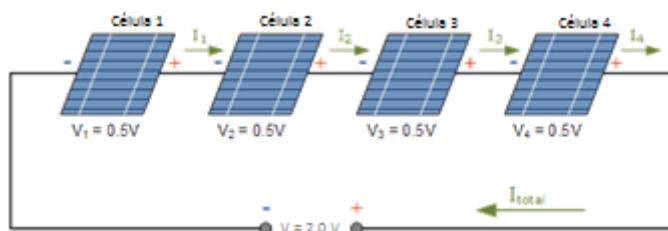


Figura 3.5 – Conexão de painéis PV em série.
(Fonte:PEARSALL e ROBERT, 2002)

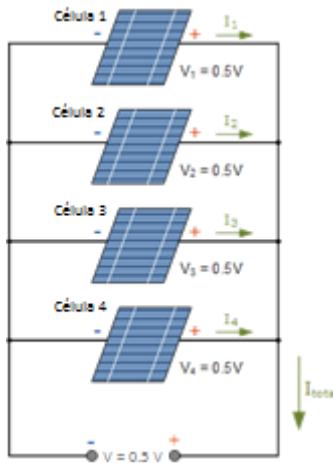


Figura 3.6 – Conexão de painéis PV em paralelo.
(Fonte:PEARSALL e ROBERT, 2002)

Destaca-se que capacitores e baterias podem ser adicionados ao sistema com o objetivo de armazenar energia para uso em sistemas *stand-alone* e/ou manter o fluxo de corrente no caso de sombras.

Durante a operação de painéis PV série, é importante que as células sejam equivalentes, pois, se uma célula produzir menos corrente devido a terem características distintas, como estão em série, o circuito irá operar no nível de menor corrente. Analogamente, com o circuito em paralelo, se os níveis de tensão não forem similares, a tensão equivalente do sistema será afetada.

Além disso, se uma ou mais células de um circuito série, por alguma razão, estiverem produzindo uma corrente baixa quando comparadas às demais, como esta célula irá limitar a corrente do circuito, poderá causar um aquecimento local e comprometimento dos componentes e/ou da estrutura do módulo. Este efeito pode ser contornado por meio da adição de diodos de passagem, os quais são alocados na caixa de junção com os cabos e o circuito de interconexão (PVEDUCATION, 2014).

Em um circuito série, enquanto a tensão de um módulo PV é determinada pelo número de células, sua corrente será determinada pelo tamanho das mesmas e, da mesma forma, será medida sua eficiência. Em um ambiente de iluminação AM1.5 com condições angulares ótimas, a densidade de corrente de uma célula comercial é de aproximadamente 30 mA/cm^2 a 36 mA/cm^2 . A corrente fornecida por um módulo depende criticamente do ângulo de inclinação do painel e não varia muito com a temperatura. No entanto, a tensão do painel varia consideravelmente com a temperatura.

A eficiência de um módulo PV, normalmente, está em torno de 17% menor que a de uma célula, pois, as perdas e o casamento de características construtivas das células que compõem um módulo são consideradas. As configurações de módulos PV comumente comercializadas utilizam 72 células de silício monocristalino ou 60 células de silício multicristalino conectadas em série (WENHAM et al., 2011).

Esclarecido o processo produtivo, tanto das células como dos módulos, podemos então entrar na fase de análise de falha desses sistemas. Agora com o conhecimento das características construtivas, operacionais e de processamento desses materiais conseguimos compreender de forma mais eficiente a construção de modelos e como aplicar as teorias propostas nos próximos capítulos.

Capítulo 4

Análise de Falhas em Painéis Fotovoltaicos

Este capítulo se destina a apresentar os aspectos de um *framework* proposto para análise de falhas em painéis fotovoltaicos durante as fases de construção e operação. Entretanto, para que estas análises sejam possíveis, há a necessidade de se definir os modelos físicos dos painéis, bem como o modelo ontológico, os quais serão utilizados como informações de base para o método FMEA que corresponde ao núcleo desse *framework*.

Atualmente, devido à evolução tecnológica, muitas ferramentas computacionais podem ser utilizadas para análise e projeto de produtos ou de processos. Desta forma, a modelagem torna-se extremamente importante, pois, um modelo representa a descrição de um sistema que visa auxiliar a compreensão a respeito do mesmo, analisar efeitos e/ou prever comportamentos. Entretanto, neste trabalho, dois modelos são desenvolvidos:

- Modelo físico - tem o objetivo de ilustrar um módulo PV levando em conta sua estrutura, componentes e ligações;
- Modelo de conhecimento - que visa descrever o painel e suas relações de forma analítica e mais aprofundada, sendo o foco principal deste trabalho, pois, deverá auxiliar o método FMEA proposto para a análise de falhas de módulos PV.

Assim o capítulo se iniciará apresentando o desenvolvimento dos modelos e as teorias utilizadas para a construção dos mesmos. Seguirá para o desenvolvimento de uma análise de falha e em seguida para aplicação da teoria exemplificada de modo a obter resultados analisando os modelos desenvolvidos no início do capítulo.

4.1 CONSTRUÇÃO DE MODELOS FÍSICOS

Como a intenção desse trabalho será analisar potenciais falhas e defeitos que podem ocorrer em um painel PV, torna-se essencial conhecer seu projeto detalhado. O modelo foi desenvolvido baseado em um painel PV comercial de silício monocristalino devido à sua alta aceitação no mercado. O projeto do painel foi todo

desenvolvido por meio do *software* Google SketchUp 8, onde alguns cortes e vistas deste projeto encontram-se ilustradas pelas Figuras de 4.1 a 4.3.

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam respectivamente o painel PV completo e o painel PV com todos os seus componentes separados.

Já a Figura 4.3 ilustra uma visão aproximada do circuito das células, onde podem ser visualizadas as células conectadas ao módulo e os barramentos soldados nas entradas e saídas das células PV. É importante comentar que potenciais falhas podem surgir nestas conexões devido a curto-circuitos, fraturas ou corrosão.

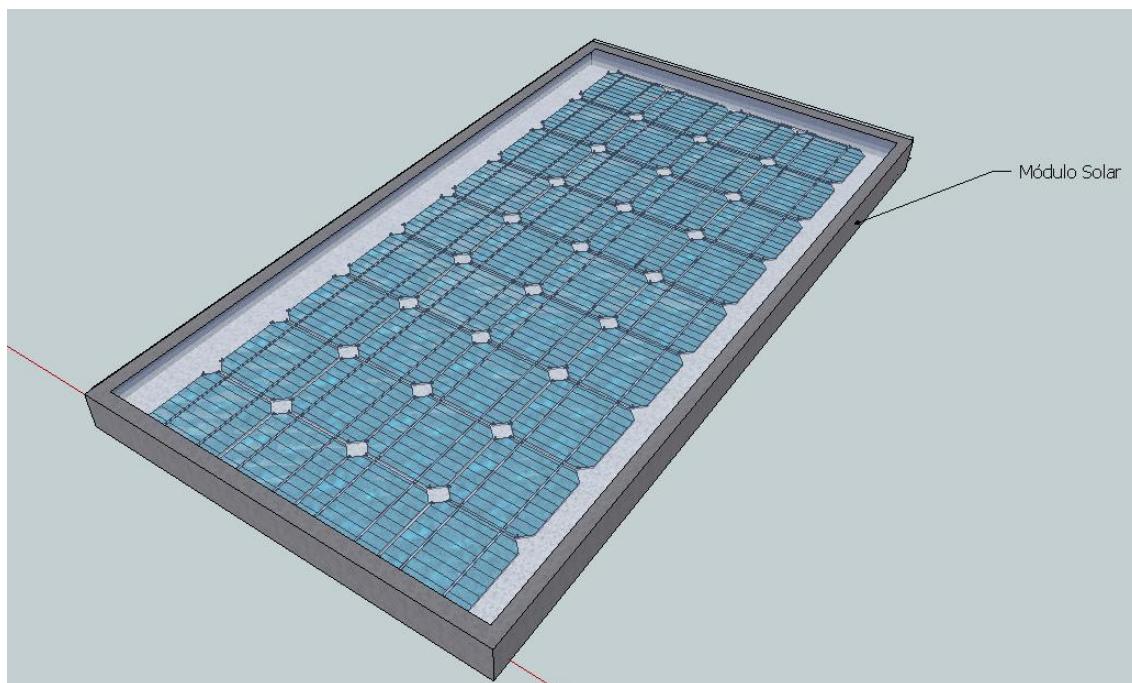


Figura 4.1 – Modelo 3D do módulo PV.

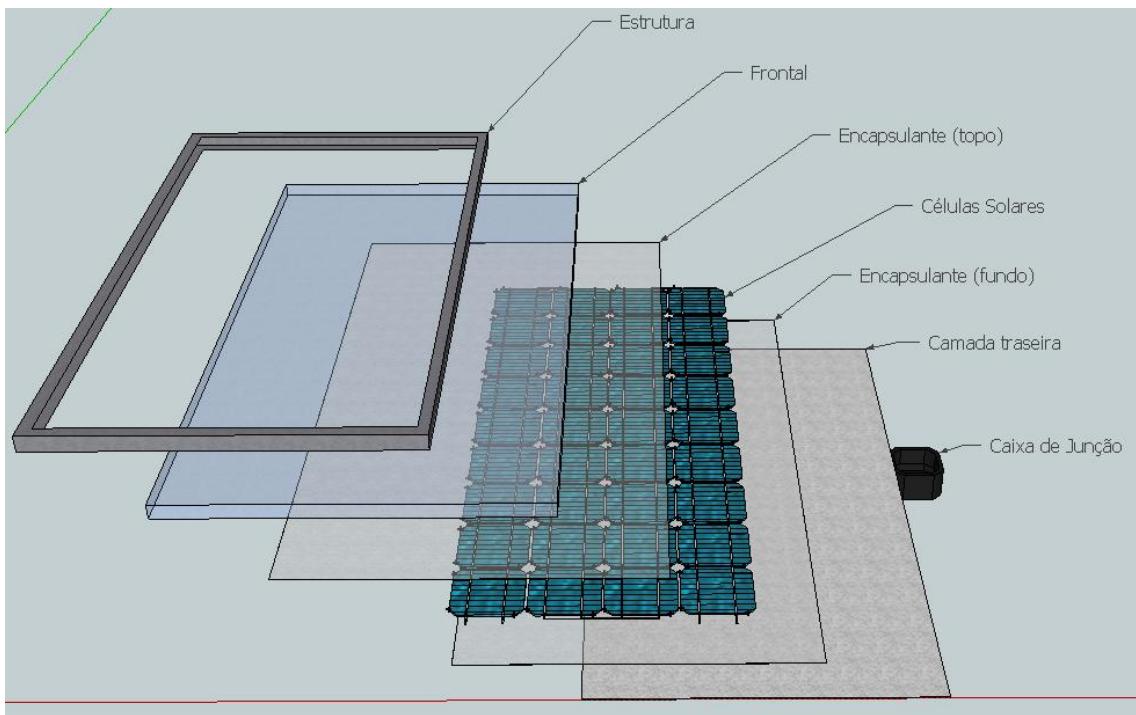


Figura 4.2 – Componentes do Modelo 3D do módulo PV.

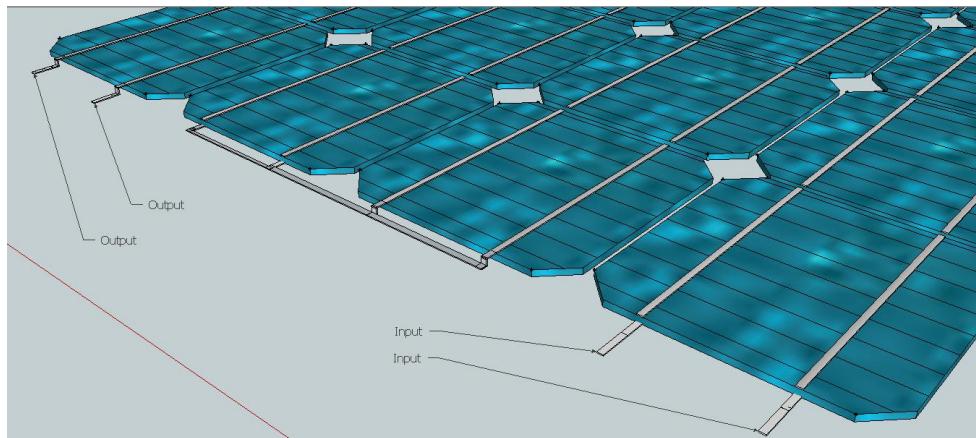
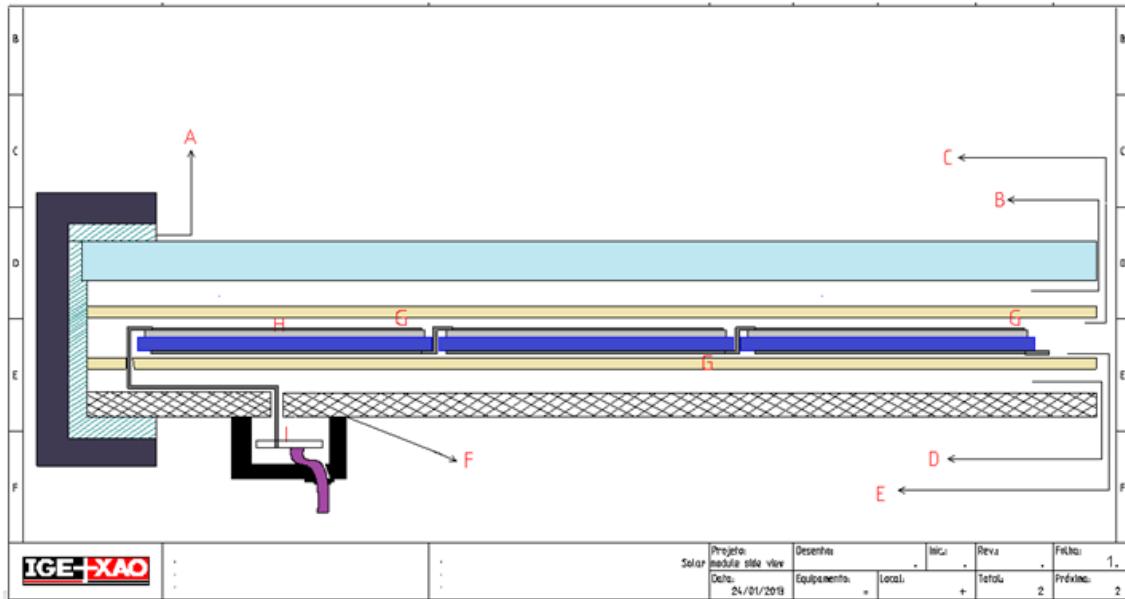


Figura 4.3 – Modelo 3D do módulo 3D com destaque para as conexões.

Por fim, um modelo de duas dimensões é mostrado na Figura 4.4, o qual foi desenvolvido por meio do software SEE Electrical CADdy++ e representa uma vista lateral do painel PV com seus componentes destacados.



- █ Células
- █ Estrutura
- █ Frontal
- █ Encapsulante
- █ Circuito de Interconexão
- █ Barramento
- █ Cabos
- █ Camada Traseira
- █ Caixa de junção

- | | | | | | | |
|-------------------|------------|--------------|---|--------|-------|----------|
| Projeto: | Solar | Desenho: | + | Nº: | Reva: | Folha: |
| Módulo solar view | | | | | | 1 |
| Data: | 24/01/2019 | Equipamento: | x | Local: | Teto: | Próximo: |
| | | | | | | 2 |
- A:** Interface entre frontal e estrutura, estrutura e camada traseira (Colado)
 - B:** Interface entre frontal e encapsulante (Laminado)
 - C:** Interface entre encapsulante e circuito de células (Laminado)
 - D:** Interface entre encapsulante e camada traseira (Laminado)
 - E:** Interface entre encapsulante e circuito de células (Laminado)
 - F:** Junção entre camada traseira e caixa de junção (Colado)
 - G:** Junção entre barramento e circuito de interconexão (Soldado)
 - H:** Junção entre barramento e células (Screen printed)
 - I:** Junção entre circuito de interconexão e cabos (Parafusado)

Figura 4.4 – Modelo 2D do módulo PV com vista lateral.

4.2 DEFINIÇÃO DO MODELO ONTOLOGICO

Este modelo foi desenvolvido de acordo com teorias ontológicas e construído baseado em uma estrutura UML (*Unified Modeling Language*), que visa descrever um domínio de forma estruturada e hierarquizada, descrevendo seus elementos e expondo as relações entre eles. O objetivo do desenvolvimento desse modelo é analisar o módulo PV sob uma perspectiva diferente, não apenas de um ponto de vista físico, mas também de um ponto de vista de interação entre seus componentes. Deste modo, pode-se melhor compreender como as partes de um módulo PV interagem entre si, como elas se conectam e formam um todo, quais materiais compõem cada peça e como isso pode influenciar sua função.

Entretanto, este modelo foi implementado mediante a análise do modelo físico previamente apresentado na Seção 4.1. Cabe ainda informar que este modelo

ontológico serve como base do método FMEA para a análise de potenciais falhas de módulos PV. Assim, na sequência, são apresentados os fundamentos de ontologia e como essa teoria pode ser aplicado no âmbito dessa proposta de trabalho de conclusão de curso.

4.2.1 FUNDAMENTOS DE ONTOLOGIA

O termo ontologia é um derivado da filosofia como sendo o estudo da natureza do ser, existir ou da realidade. Este termo possui uma vasta gama de significados, porém, este trabalho tem como foco o contexto de ciência da informação, onde a ontologia visa representar o conhecimento como um conjunto de conceitos e o relacionamento entre pares de conceitos. De forma geral, a ontologia corresponde à representação de entidades, propriedades e eventos que são “tipados” e possuem inter-relacionamentos (SOWA, 1995).

Segundo (SOWA, 1995), uma ontologia é um catálogo de tipos de objetos e/ou eventos que são assumidos como existentes em um domínio de interesse D do ponto de vista de um agente externo que utiliza uma linguagem L para falar sobre D.

A ontologia é composta de entidades, estas podem ser elementos físicos, concretos ou abstratos. Após definido o escopo ou objetivo da ontologia e identificadas e definidas suas entidades, estas devem ser organizadas em uma hierarquia. As entidades são correlacionadas pelo seu relacionamento dentro da árvore hierárquica criada para resumir o modelo de conhecimento dessa ontologia. Ontologias podem existir em muitos níveis de abstração, porém, podem ser agrupadas em três principais categorias: *Upper Ontology*, *Mid-level Ontology* e *Domain Ontology*.

No nível mais alto (*Upper Ontology*), os conceitos têm o objetivo de expressar informações básicas, conceitos universais e garantir uma generalidade para uma grande área de domínio. A Ontologia de nível intermediário (*Mid-level Ontology*) serve como uma ligação entre os conceitos gerais e abstratos do nível mais alto e os conceitos mais específicos detalhados no nível de uma Ontologia de Domínio. Finalmente, a Ontologia de Domínio (*Domain Ontology*) define conceitos particulares ou específicos de um domínio de interesse e representa os conceitos e suas relações.

Recentemente, as pesquisas na área de ontologia têm crescido e se espalhado no campo de ciência da informação, pois, estas teorias fornecem especificações e padronizações de termos utilizados para representar o conhecimento de domínios

específicos que podem ser computacionalmente interpretados de modo a elevar a aprimorar a comunicação com outros domínios (GRUBER, 1993).

Para desenvolver um modelo de conhecimento para a análise de falhas em módulos PV, que servirá como guia para análise posterior com base na teoria ontológica previamente mencionada, torna-se necessária a criação de uma estrutura lógica. Esse modelo será analisado e observado por diferentes profissionais que buscam potenciais falhas no sistema por meio da análise do mesmo. Portanto torna-se necessário a estruturação e criação de um modelo interpretável, para tal finalidade adotou-se a linguagem GOL (*General Ontological Language*).

O propósito da linguagem GOL é definir um sistema ontológico de alto nível que possa ser utilizado como guia ou estrutura para a construção de ontologias específicas. A linguagem GOL consiste de uma sintaxe e de um cerne axiomático que captura o sentido das categorias ontológicas previamente citadas (DEGEN et al., 2001). A linguagem é dividida em categorias que definem conjuntos, classes e elementos, os quais possuem distintas funções na estrutura do modelo. Conjuntos e classes são consideradas superestruturas que, hierarquicamente, estão acima de outras entidades na ontologia, porém, também fazem parte do nível de entidades. Desta forma, os elementos representam tudo o que não for classes ou conjunto e são subcategorizados em:

- Indivíduos: "Uma única coisa no espaço e no tempo".
- Universais: "Uma entidade que pode ser fundamentada por um número de diferentes indivíduos que são similares em algum aspecto".

Os Indivíduos podem ser separados e quatro subclassificações:

- Substância: "Podem existir por si só, não precisam de outras entidades para existir"
- Momento: "É uma entidade que só pode existir dentro de outra entidade, como uma carga elétrica que pode existir apenas em algum material. Inclui Ações e passivos, é um evento. Depende de uma substância para existir, um momento pode ser classificado em qualidades, por exemplo: forma, cor ou temperatura. Mas também em momentos relacionais que dependem da pluralidade de substâncias, por exemplo: uma conversa que depende de no mínimo dois indivíduos, também está ligada a ideia de Universo."

As duas últimas categorizações são instâncias de Universo, Tempo e Espaço. Elas não tem existência independente e dependem caso a caso na situação em que estruturam.

- Chronoid: "Intervalos de tempo interconectados com uma certa estrutura mereológica5, Tem duas fronteiras temporais"
- Topoid: "Regiões do espaço com certa estrutura mereológica"

Por fim, tem-se as Relações que mantêm essa estrutura unida, ou seja, conectam conjuntos, classes e elementos.

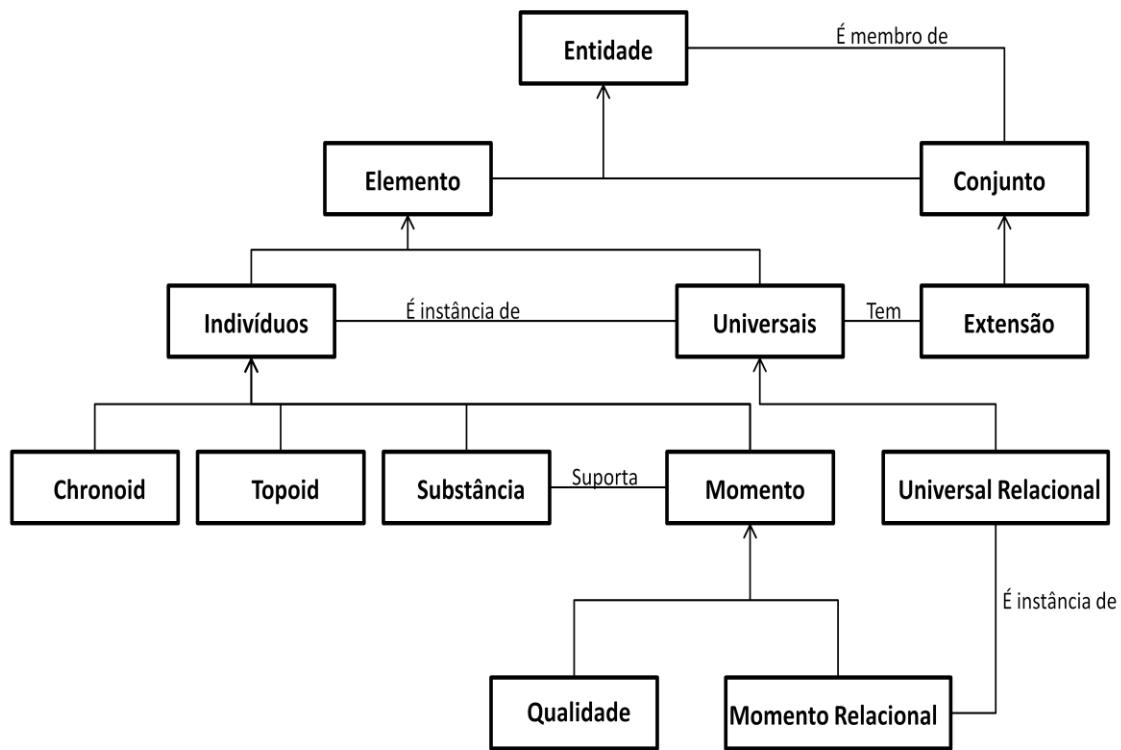


Figura 4.5 - Estrutura da linguagem GOL.

4.2.2 META-MODELOS EM GOL

Aplicando a teoria ontológica desenvolvida nas seções anteriores por meio da linguagem GOL, foi possível obter um modelo de conhecimento com enfoque na análise de falhas e defeitos em módulos PV. Um meta-modelo pode ser visto como a construção e desenvolvimento de estruturas, regras, restrições, modelos e teorias

úteis para a modelagem de uma classe de problemas. Assim, o mesmo pode ser definido como uma coleção de conceitos que irão comportar o “vocabulário” que representa determinado domínio. A meta-modelagem foi desenvolvida com o intuito de facilitar o entendimento de um modelo real ou físico que visa demonstrar como os componentes/entidades desse modelo estão relacionadas.

Neste trabalho, o meta-modelo de conhecimento do módulo PV foi desenvolvido utilizando o software yEd Graph Editor e pode ser visualizado por meio da Figura 4.6. Todos os componentes foram subdivididos em “Homogêneos” e “Heterogêneos” e, suas relações, são demonstradas por conexões fixas (*Bound*) ou por junções (*Join*). Uma junção é uma conexão física simples entre componentes, sendo que a mesma pode ser parafusada, colada, soldada, etc. Uma conexão fixa é uma conexão onde os componentes são unidos de forma a criar uma única peça, neste caso, uma conexão fixa pode ser representada pelo processo de laminação. O rótulo da conexão, seja uma junção ou uma conexão fixa corresponde às letras do modelo físico da Figura 4.4, pois, deste modo torna-se mais fácil compreender a estrutura e otimizar sua análise. Nota-se ainda que o ambiente e suas ações sobre determinados componentes também foram representados no meta-modelo de conhecimento.

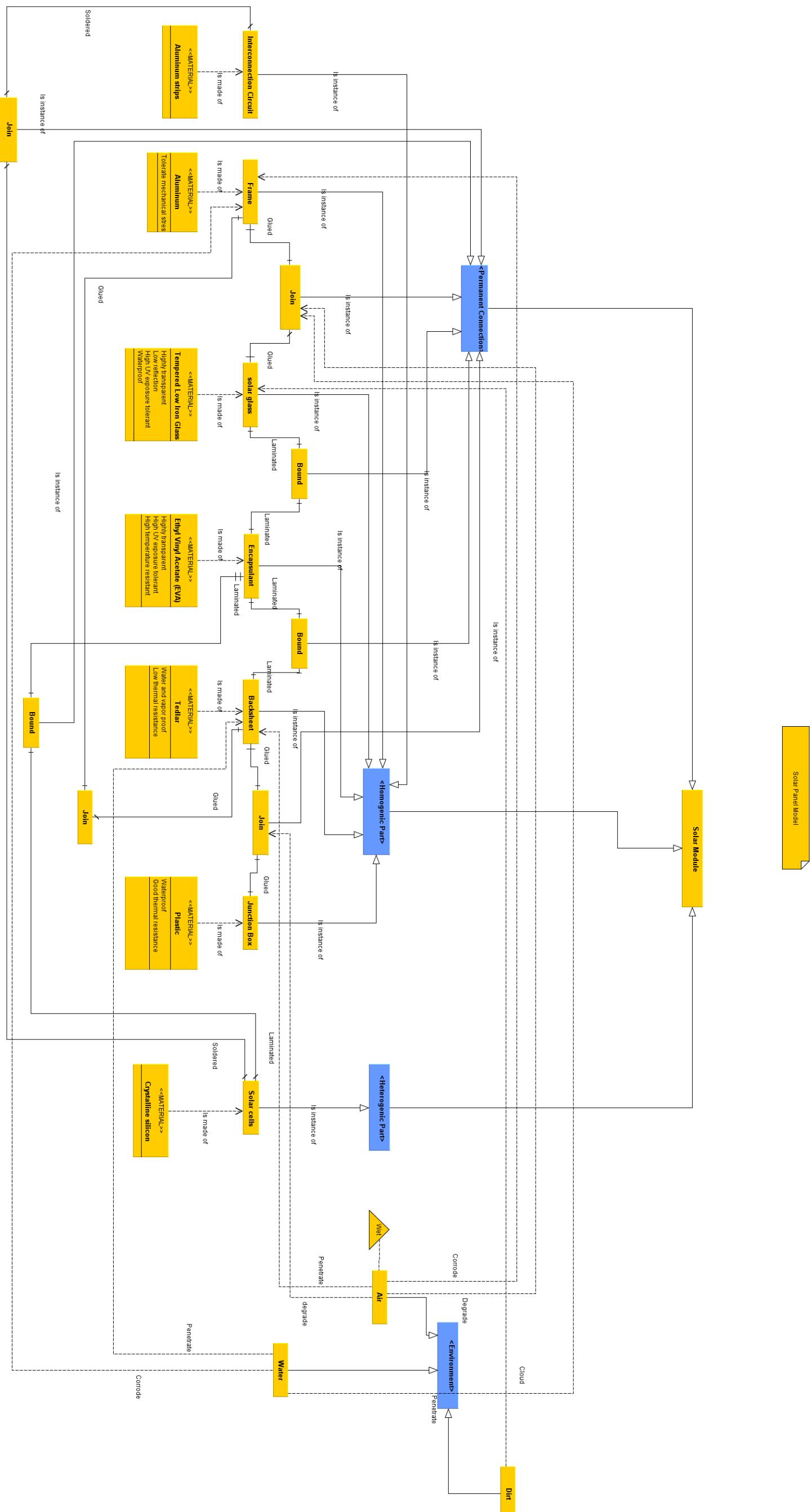


Figura 4.5 – Modelo ontológico de um módulo PV.

4.3 ANÁLISE DE FALHAS EMPREGANDO O MÉTODO FMEA

A Análise do Modo e Efeito de Falha - FMEA é uma técnica utilizada para definir, identificar e eliminar conhecidas e/ou potenciais falhas em sistemas, processos e serviços antes que os mesmos possam prejudicar o consumidor final. Esta técnica foi criada na década de 50 como uma tentativa de otimizar sistemas militares por meio do estudo dos potenciais defeitos que poderiam surgir neles.

Como mencionado em (STAMATIS, 2003), o método FMEA consiste em uma análise profunda do sistema, de suas partes e conexões para identificar as causas e efeitos de falhas com objetivo de maximizar a confiabilidade de determinado produto ou processo. A condução de uma análise pelo método FMEA consiste em, primeiramente, identificar as partes do produto ou processo e, na sequência, as causas e efeitos das falhas em cada uma das partes.

Deste modo, as falhas são detectadas e classificadas de acordo com o risco que cada falha representa ao produto em conformidade com índices pré-definidos. Seguindo esta premissa, os defeitos passam a ser priorizados de acordo com a Severidade de suas consequências (*S*), Frequência com que ocorrem (*O*) e de acordo com a dificuldade de sua Detecção (*D*). Assim, torna-se possível estabelecer a prioridade do risco, também conhecida por RPN (*Risk Priority Number*) da seguinte forma:

$$RPN = O \times S \times D \quad (4.1)$$

Durante a análise de um potencial modo de falha, este é analisado levando-se em consideração a três variáveis da equação 4.1. Cada uma é recebida um valor, que pode variar de zero a dez, sendo zero o caso menos crítico e dez o mais crítico. Após graduar as três variáveis multiplica-se *O*, *S* e *D* obtendo-se um valor, o qual corresponderá ao respectivo RPN daquela determinada falha.

Finalmente, os dados que correspondem às causas, efeitos, falhas, descrições e o RPN são então estruturados e organizados para formar a documentação que serve como base para uma tomada de decisão.

Após análise dos modelos pelo método FMEA, estes podem ser facilmente adaptados, otimizados e completamente reformados, uma vez que sua estrutura esteja bem definida para adaptar-se às necessidades do projeto. Assim, ao se aplicar o método FMEA ao modelo ontológico, espera-se que a análise de falhas possa ser otimizada e,

consequentemente, isto possa significar rapidez, redução de custos e aumento da qualidade da análise.

4.3.1 POTENCIAIS FALHAS EM PAINÉIS PV

De acordo com (KUBAC, 2014), as principais causas de defeitos em painéis PV estão relacionadas a diversos fatores que podem ser basicamente categorizados como falhas de: Tecnologia da linha de produção, avarias mecânicas (transporte, embalagem, manuseio, etc), efeitos do ambiente e instalação inadequada. Para conferir a qualidade de painéis PV existem métodos de detecção que podem mostrar de forma objetiva as condições técnicas dos painéis. Os ensaios mais reconhecidos e aplicados são: eletroluminescência, termografia, *flash test* e obtenção das características V-I.

O imageamento eletroluminescente permite a detecção de falhas em materiais e, por meio deste ensaio, é possível realizar o controle de qualidade de linhas de produção, pois, o mesmo revela defeitos ocultos que são indetectáveis por outros métodos. O ensaio de eletroluminescência é vastamente empregado à detecção de defeitos em células PV para a descoberta de rachaduras, *fingers* rompidos, pontos escuros e células inativas (COELLO, 2011).

Conforme mencionado em (MASTNY, RADIL e MASTNA, 2011), a termografia é utilizada para análises rápidas de distribuição térmica em superfícies por meio de câmeras de infravermelho. Como o fluxo de corrente elétrica em células solares danificadas provoca um aumento na temperatura das mesmas, esta técnica pode detectá-las. Pontos problemáticos no módulo como: diodos danificados, células quebradas, pontos quentes, contatos rompidos podem ser facilmente encontrados com esta técnica.

O *Flash Test* é utilizado para obtenção das características do painel PV, visto que a saída dessa medição vem na forma de dados determinados pelo pico de potência, tensão de circuito aberto, corrente de curto-círcuito, tensão de operação, corrente, potência e eficiência. Esta técnica apresenta um diagnóstico que quantifica o desempenho do módulo e tem como resultado uma representação gráfica dessas características.

Existem ainda muitos outros ensaios como: exposição prolongada ao aquecimento, ensaio térmico cíclico, exposição UV, congelamento e umidade, carregamento mecânico, dentre outros. Esses ensaios são empregados para a obtenção de soluções para detecção de falhas e defeitos em painéis PV, porém, todos requerem um protótipo ou o próprio produto, têm alto custo agregado, são complexos e demorados.

4.3.2 RESULTADOS OBTIDOS PELA APLICAÇÃO DO MÉTODO FMEA

A aplicação do método FMEA neste trabalho corresponde a uma adapatação do mesmo para a análise de produto, onde uma nova abordagem baseada no modelo ontológico é proposta. Entretanto, toda a estrutura do método FMEA foi considerada. O modelo ontológico formou a base para a análise e a pesquisa por potenciais defeitos e falhas que poderiam ocorrer no módulo PV.

A procura por falhas foi conduzida por profissionais de diferentes áreas com o intuito de enriquecer a pesquisa com diferentes pontos de vista. O modelo ontológico foi minunciosamente analisado, elemento a elemento, relação à relação, e com auxílio dos modelos físicos, que fornecem uma clara representação de um protótipo, foram descritas o máximo de potenciais falhas que os participantes puderam encontrar. A estruturação e organização das falhas foram elaboradas utilizando o método FMEA e o trabalho foi conduzido seguindo os procedimentos recomendados pelo método, onde um grande número de informações de diferentes fontes foram coletadas para formarem uma base de dados das falhas.

Após a análise dos modelos, 8 formulários FMEA foram elaborados agregando as propostas e opniões da equipe que analisou os modelos, os formulários priorizam:

- Identificar falhas conhecidas e potenciais;
- Identificar as causas e efeitos de cada falha;
- Priorizar falhas identificadas de acordo com o RPN;
- Providenciar uma ação de correção para o problema encontrado.

Portanto, as Tabelas de 4.1 a 4.8 estão no formato de formulários FMEA, onde podem ser observados e analisados os resultados obtidos pela aplicação da metodologia FMEA. As falhas são identificadas do ponto de vista do fabricante, assim, sua detecção é graduada não conforme sua probabilidade de surgirem em campo mas pela probabilidade de serem reveladas nos estágios primários de fabricação. Desta maneira, torna-se possível corrigir erros produtivos antes que o mesmo seja enviado aos consumidores.

Tabela 4.1 – Formulário FMEA para Camada Inferior.

FMEA de Produto											
Preparado por: Gustavo L. C. Cavenaghi								FMEA No: 01			
Data: 05/02/2013								Componente: Módulo PV			
Item	Função	Potencial Modo de Falha	Potenciais Efeitos ou Falhas	S	Potenciais Causas da Falha	O	Controles Atuais para Prevenção / Detecção	D	R P N	Ação Recomendada	Responsáveis
Camada Inferior	Previve a penetração de água, vapores e agentes externos	Formação de bolhas e delaminação	Perda de adesão do encapsulante, ingressão de agentes do ambiente, perda de eficiência e possível perda do produto	7	Exposição intensa a umidade e calor, seleção incorreta de materiais, falhas durante o processo de laminação	3	Controle de qualidade durante fabricação	8	168	Seleção correta de materiais para a designada operação, realização de ensaios, controle de qualidade	Engenheiros de projeto e engenheiros de processos

Tabela 4.2 – Formulário FMEA para Cabos.

FMEA de Produto											
Preparado por: Gustavo L. C. Cavenaghi								FMEA No: 02			
Data: 05/02/2013								Componente: Módulo PV			
Item	Função	Potencial Modo de Falha	Potenciais Efeitos ou Falhas	S	Potenciais Causas da Falha	O	Controles Atuais para Prevenção / Detecção	D	R P N	Ação Recomendada	Responsáveis
Cabos	Conduzir a corrente elétrica do circuito de interconexão para o meio externo	Falha nos conectores	Penetração de umidade, sobreaquecimento, avarias podem levar a perda do produto	8	Intensiva conexão e desconexão de cabos, conexão imprópria	3	Controle de qualidade durante a fabricação	4	96	Uso de ferramentas especiais para desconexão, controle de qualidade durante montagem, realizar ensaios elétricos após instalação	Engenheiros de processos e equipe técnica
Cabos	Conduzir a corrente elétrica do circuito de interconexão para o meio externo	Danos ao material, ruptura ou queima	Abertura do circuito, curto-circuito, correntes parasitas, arcos, sobreaquecimento e fogo	10	Stress mecânico, ingresso de umidade, sobrecarga ou má isoliação	1	Controle de qualidade durante a fabricação	3	30	Uso de materiais padrão sempre, cumprimento de normas e processos, forte controle de qualidade	Engenheiros de processos e equipe técnica

Tabela 4.3 – Formulário FMEA para Camada Frontal.

FMEA de Produto											
Preparado por: Gustavo L. C. Cavenaghi								FMEA No: 03			
Data: 05/02/2013								Componente: Módulo PV			
Item	Função	Potencial Modo de Falha	Potenciais Efeitos ou Falhas	S	Potenciais Causas da Falha	O	Controles Atuais para Prevenção / Detecção	D	R P N	Ação Recomendada	Responsáveis
Frontal	Proteger a célula do ambiente enquanto permite penetração de luz, prover uma estrutura rígida	Ruptura	Perda do produto	10	Stress mecânico, sobreaquecimento ou congelamento	4	Seleção de materiais	6	240	Uso de materiais padrão sempre, conhecimento dos limites operacionais do material, manuseio e inspeção	Engenheiros de processos e equipe técnica

Tabela 4.4 – Formulário FMEA para o Encapsulante.

FMEA de Produto											
Preparado por: Gustavo L. C. Cavenaghi								FMEA No: 04			
Data: 05/02/2013								Componente: Módulo PV			
Item	Função	Potencial Modo de Falha	Potenciais Efeitos ou Falhas	S	Potenciais Causas da Falha	O	Controles Atuais para Prevenção / Detecção	D	R P N	Ação Recomendada	Responsáveis
Encapsulante	Prover adesão entre as células e isolação	Delaminação	Ingresso de agentes do ambiente nas células	7	Presença de detritos na camada frontal durante montagem, presença de suor na mão do montador, temperatura e/ou tempo incorretos durante laminação, impermeabilização das bordas insuficiente, umidade e calor	3	Cotrole de qualidade, ensaios	6	126	Seleção correta de materiais, controle de qualidade, realização de ensaios térmicos, damp heat exposure, humidity/free ze, UV, isolação e ensaios de resistência	Engenheiros de processos
Encapsulante	Prover adesão entre as células e isolação	Formação de ácido acético	Amarelamento /escurecimento do material, redução da performance	5	Formulação incorreta do composto, falta de ou filtro UV de baixa qualidade, processamento incorreto, penetração de ar, operação sob temperaturas elevadas	4	Cotrole de qualidade, ensaios	5	100	Seleção correta de materiais, controle de qualidade, realização de ensaios de Accelerated Life Tests para estabilidade fototérmica	Engenheiros de projeto e engenheiros de processos

Tabela 4.5 – Formulário FMEA para as Células PV.

FMEA de Produto											
Preparado por: Gustavo L. C. Cavenaghi								FMEA No: 05			
Data: 05/02/2013								Componente: Módulo PV			
Item	Função	Potencial Modo de Falha	Potenciais Efeitos ou Falhas	S	Potenciais Causas da Falha	O	Controles Atuais para Prevenção / Detecção	D	R P N	Ação Recomendada	Responsáveis
Células	Converte radiação solar em corrente elétrica	Quebra	Baixa, média ou severa perda de eficiência, aquecimento localizado, pode levar a perda total do produto	6	Sobre peso, neve, vento, Instalação incorreta, sobreaquecimento durante estágio de solda, manuseio	9	Controle de qualidade por meio de ensaios	6	324	Uso de materiais padrão sempre, forte controle de qualidade durante solda, ensaio de eletroluminescência, fotoluminescência de Si e termografia	Engenheiros de projeto e engenheiros de processos
Células	Converte radiação solar em corrente elétrica	Oxidação do revestimento anti-refletivo	Perda de eficiência	3	Penetração de umidade, encapsulamento incorreto, presença de água no encapsulante	2	Controle de qualidade	7	42	Uso de materiais padrão sempre, inspeção visual(aparência de manchas escuras na superfície)	Engenheiros de processos
Células	Converte radiação solar em corrente elétrica	Snail trails	defeitos visuais, desconhecido	2	Células quebradas, barramentos oxidados, desconhecido	9	Controle de qualidade	8	144	Uso de um encapsulante e camada traseira de qualidade conhecida, inspeção visual	Engenheiros de processos
Células	Converte radiação solar em corrente elétrica	Pontos quentes	Perda de eficiência, pode levar a perda do produto	6	Incompatibilidade de células, sombreamento parcial, falhas nos diodos, rompimento do circuito	9	Controle de qualidade	4	216	Uso de diodos de passagem, controle de qualidade na seleção de células compatíveis, ensaio de termografia	Engenheiros de projeto e engenheiros de processos

Tabela 4.6 – Formulário FMEA para as Estruturas.

FMEA de Produto											
Preparado por: Gustavo L. C. Cavenaghi								FMEA No: 06			
Data: 05/02/2013								Componente: Módulo PV			
Item	Função	Potencial Modo de Falha	Potenciais Efeitos ou Falhas	S	Potenciais Causas da Falha	O	Controles Atuais para Prevenção / Detecção	D	R P N	Ação Recomendada	Responsáveis
Estrutura	Proteção do módulo, prover uma estrutura rígida	Corrosão	Destacamento de junções, deteorização de materiais e potencial penetração de agentes do ambiente no módulo	4	Exposição a água e umidade	1	Seleção de material	8	32	Seleção correta de materiais, certificação do material e conhecimento dos limites operacionais do elemento escolhido	Engenheiros de projeto e engenheiros de processos
Estrutura	Proteção do módulo, prover uma estrutura rígida	Danos estruturais	Destacamento de junções, deteorização de materiais e potencial penetração de agentes do ambiente no módulo	5	Falhas de fabricação, manuseio incorreto	2	Controle de qualidade	6	60	Manuseio correto, controle de qualidade durante montagem, certificação dos materiais e realização de ensaios mecânicos	Engenheiros de processos e equipe técnica

Tabela 4.7 – Formulário FMEA para o Circuito de Interconexão.

FMEA de Produto											
Preparado por: Gustavo L. C. Cavenaghi							FMEA No: 07				
Data: 05/02/2013							Componente: Módulo PV				
Item	Função	Potencial Modo de Falha	Potenciais Efeitos ou Falhas	S	Potenciais Causas da Falha	O	Controles Atuais para Prevenção / Detecção	D	R P N	Ação Recomendada	Responsáveis
Círculo de interconexão	Conectar as células, conduzir a corrente do input ao output (caixa de junção)	Corrosão	Abertura do circuito, perda de condução, pontos quentes	6	Penetração de umidade	6	Seleção de materiais	9	324	Controle de qualidade durante fabricação, seleção correta de materiais	Engenheiros de projeto e engenheiros de processos
Círculo de interconexão	Conectar as células, conduzir a corrente do input ao output (caixa de junção)	Pontos quentes	Sobrecarga, perda de potência, vazamento de corrente e danos materiais	6	Solda mal realizada, ruptura de pontos soldados	8	Controle de qualidade	7	336	Controle de qualidade durante solda e montagem, realização de ensaios elétricos	Engenheiros de projeto e engenheiros de processos
Círculo de interconexão	Conectar as células, conduzir a corrente do input ao output (caixa de junção)	Degradação de junções soldadas	Início e propagação de ruptura de junções soldadas, quebra de células, desconexão do circuito	7	Stress mecânico e penetração de umidade	8	Controle de qualidade	8	448	Controle de qualidade durante solda e montagem, realização de ensaios térmicos, thermal cycling	Engenheiros de processos

Tabela 4.8 – Formulário FMEA para a Caixa de Junção.

FMEA de Produto											
Preparado por: Gustavo L. C. Cavenaghi								FMEA No: 08			
Data: 05/02/2013								Componente: Módulo PV			
Item	Função	Potencial Modo de Falha	Potenciais Efeitos ou Falhas	S	Potenciais Causas da Falha	O	Controles Atuais para Prevenção / Detecção	D	R P N	Ação Recomendada	Responsáveis
Caixa de junção	Prover abrigo para os cabos e realizar a conexão entre os mesmos e o circuito	Arcos	Danos aos materiais, fogo	10	Contatos ruins	1	Controle de qualidade, ensaios elétricos	3	30	Uso de materiais certificados sempre, controle de qualidade durante montagem, realização de ensaios elétricos	Engenheiros de projeto, engenheiros de processos e equipe técnica
Caixa de junção	Prover abrigo para os cabos e realizar a conexão entre os mesmos e o circuito	Corrosão de componentes internos	Danos aos materiais, curto-circuito ou perda de potência	9	Penetração de umidade	2	Seleção de materiais	6	108	Seleção correta de materiais e selantes, cuidado durante montagem, realização de ensaios (accelerated life tests)	Engenheiros de projeto e engenheiros de processos
Caixa de junção	Prover abrigo para os cabos e realizar a conexão entre os mesmos e o circuito	Falha nos diodos de passagem	Pontos quentes, danos aos materiais	6	Curto-circuitos, picos de tensão na conexão inicial e raios	8	Seleção de componentes e ensaios elétricos	4	192	Correta seleção de componentes e ensaios elétricos	Engenheiros de processos e equipe técnica
Caixa de junção	Prover abrigo para os cabos e realizar a conexão entre os mesmos e o circuito	Fuga de corrente, curto-circuito	Danos aos materiais, aumento de temperatura, perda de eficiência	6	Contatos ruins, montagem incorreta ou manuseio	2	Controle de qualidade	4	48	Controle de qualidade durante montagem e manutenção	Engenheiros de processos e equipe técnica
Caixa de junção	Prover abrigo para os cabos e realizar a conexão entre os mesmos e o circuito	Destacamento	Exposição dos condutores e conexões	5	Adesão insuficiente à camada traseira	3	Seleção da cola ou selante	7	105	Correta seleção de materiais e selantes, cuidado na montagem, e realização de ensaios (accelerated life tests)	Engenheiros de processos e equipe técnica

Analisando as Tabelas (formulários FMEA) previamente mostradas, nota-se que grande parte das falhas com maior RPN aparecem no circuito de interconexão e nas células e suas conexões com outras partes. Comparando essa análise com os dados coletados para dar suporte à pesquisa observa-se que muitos defeitos de fato acontecem nessas partes e em suas conexões. Isso representa um retorno positivo da abordagem proposta. Além disso, o maior RPN ocorre na Degradação da Junção Soldada no circuito de interconexão, portanto, um cuidado especial deve ser tomado nesse item para reduzir a ocorrência desse defeito e/ou maximizar sua detecção. Outros valores de RPN considerados elevados surgem no Vidro, nos Diodos de *Bypass* e na Caixa de Junção que também são reconhecidos como componentes com alta taxa de falhas.

Observando os formulários nota-se que a detecção de alguns modos (incluindo altos RPNs) são muito difíceis de se alcançar enquanto o sistema ainda está no estágio de produção o que aponta que um cuidado extra deve ser considerado no caso desses componentes e com suas montagens. Além disso, ensaios devem ser realizados antes que o produto deixe a planta de produção, ou parte dele deixe seu estágio de montagem para o próximo estágio, de maneira a prevenir potenciais falhas futuras.

Apesar da dificuldade de detecção de defeitos, alguns deles podem ser facilmente prevenidos se medidas preventivas e corretivas forem tomadas com controle de qualidade, seleção correta de materiais e se os ensaios corretos forem realizados. Entretanto, o conhecimento sobre o processo e os limites dos materiais são fundamentais para a realização dessas tarefas e são assumidos como conhecidos ao se tratar da fabricação de produtos como painéis PV.

Os defeitos mais comuns aparecem em campo e são causados por avarias durante o transporte ou empacotamento, o que aponta que essas áreas estão seriamente ligadas com a otimização da produção e confiabilidade do produto. Portanto, um controle de qualidade mais efetivo das tecnologias aplicadas às embalagens e simples cuidados e treinamentos durante o transporte e manuseio desses produtos são essenciais para garantir maior confiabilidade ao mesmo.

Do ponto de vista de um fabricante, o último estágio de produção (embalagem e transporte) deve ser seriamente monitorado para obter uma redução do RPN de partes críticas como o circuito de interconexão e células. Os dados coletados para fornecer suporte à pesquisa são mencionados no Anexo A, o banco de dados de defeitos foi baseado nas referências do mesmo.

Capítulo 5

Conclusões

Detectar potenciais falhas e defeitos em estágios iniciais de produção reduzem consideravelmente o custo de um produto, especialmente no caso de painéis fotovoltaicos, os quais são construídos de forma a obter uma só peça sólida e que não deve ser aberta após finalizada. Assim, prevenir defeitos de fabricação torna-se uma atividade menos onerosa que corrigir o defeito após a finalização do produto. Um fator importante dessa detecção é a condução do método FMEA que está intimamente ligado à compreensão da construção e operação do produto sob estudo, em que neste trabalho foram definidos os modelos físicos e ontológico para os painéis PV.

Com base nos resultados mostrados no Capítulo 4, foi possível notar que a utilização de modelos computacionais sustentados pelo método FMEA para a análise de falhas em módulos PV de silício monocristalino são adequados para outros produtos e processos mesmo que tenham distintos tipos de falhas. A realização de ensaios em painéis PV é frequentemente necessária na indústria, porém, algumas análises podem ser feitas em âmbito computacional, tornando a procura por defeitos mais flexível e menos onerosa. Ademais, a abordagem discutida neste trabalho pode ser empregada no controle de qualidade do processo de manufatura deste tipo de componente para atingir maior confiabilidade, ou seja, para reduzir a taxa de falhas.

Por fim, os modelos físicos e ontológico são extremamente úteis, pois, tornam viável a análise de aplicabilidade do método FMEA que pode ser utilizada por diversos segmentos e por profissionais de diferentes áreas na análise de produtos e/ou processos, além de considerar os aspectos de projeto do produto. No entanto, nem todos os defeitos podem ser prevenidos, visto que materiais podem se degradar mais rapidamente dependendo de sua exposição a intempéries ambientais.

Ideias futuras podem ser adicionadas a este projeto como, por exemplo, a criação de um software para integração do método FMEA e dos modelos, sem que haja a necessidade da preparação e análise de formulários, onde um relatório final pode ser gerado automaticamente para apontar os principais casos de falhas e suas possíveis soluções.

Referências Bibliográficas

COELLO, J. Introducing electroluminescence technique in the quality control of large PV plants. **26TH European photovoltaic solar energy conference and exhibition**, 3469-3472, 2011.

CZANDERNA, A. W.; PERN, F. J. Encapsulation of PV modules using ethylene vinyl acetate copolymer as a pottant: A critical review. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 43, n. 2, pp. 101-181, 1996.

DEGEN, W.; Heller, B.; Herre, H.; Smith, B. GOL: A general ontological language. **Formal Ontology and Information Systems**, 2001.

DJORDJEVIC, S.; PARLEVLIET, D.; JENNINGS, P. Detectable faults on recently installed solar modules in Western Australia. **Renewable Energy**, v. 67, pp. 215-221, 2014.

EBERHARDT, D. **Desenvolvimento de um sistema completo para caracterização de células solares**. Tese de Doutorado. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL, 2005.

EL AMRANI, A.; MAHRANE, A.; MOUSSA, F. Y.; BOUKENNOUS, Y. Solar module fabrication. **International Journal of Photoenergy**, v. 2007, 2007.

GRUBER, T.R. **Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing**. Stanford University, 1993.

GTES/CEPEL. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**, Ed. PRC-PRODEEM, 2004.

KUBAC, S. **Quality control of PV modules, ABORT - photovoltaic equipment**. Disponível em: <http://www.solartechnika.sk>. Acessado em: 04 de Março de 2014.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of photovoltaic science and engineering**. John Wiley & Sons, 2011.

MASTNY, P.; RADIL, L.; MASTNA, Z. Possibilities of PV panels defects identification and determination of its effect on the economy of photovoltaic power plants operation. In: **Proc. of the 2nd International Conference on Development, Energy, Environment, Economics**. pp. 233-238, 2011.

PEARSALL, N. M.; ROBERT H. Photovoltaic modules, systems and applications. **Clean Electricity from Photovoltaics**, World Science, v. 1, pp. 1-42, 2002.

PVEDUCATION. **Silicon solar cell parameters**. Disponível em: <http://pveducation.org>. Acessado em: 04 de Março de 2014.

SOWA, J. F. Top-level ontological categories. **International journal of human-computer studies**, v. 43, n. 5, pp. 669-685, 1995.

STAMATIS, D. H. **Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution**. Asq Press, 2003.

TSANAKAS, J. A.; BOTSRIS, P. N. Passive and active thermographic assessment as a tool for condition-based performance monitoring of photovoltaic modules. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 133, n. 2, pp. 1-6, 2011.

TYAGI, V. V.; NURUL, A. A. R.; RAHIM, N. A.; SELVARAJ, J. A. L. Progress in solar PV technology: Research and achievement. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, pp. 443-461, 2013.

WENHAM, S. R.; GREEN, M. A.; WATT, M. E.; CORKISH, R. **Applied photovoltaics**. Routledge, 2011.

SAW L. S.J.; SVERRISSON F. **Renewable Global Status Report**, Paris, 2011.

Anexo A

Neste anexo estão contidas as referências relacionadas à pesquisa histórica recomendada pelo FMEA. Esses artigos formam um banco de dados contendo as falhas mais comuns encontradas em painéis PV segundo a literatura pesquisada. Esses dados tem função de dar suporte à pesquisa e também validar o método aplicado neste trabalho.

MEYDBAY, JENYA. Reliability in the U.S. Solar Industry Experience and Evolving Best Practices. **IEEE Reliability Society Meeting**, 9.1.2011.

C. MAYER, ALEX. MEYDBAY, JENYA. Increasing Predictability and Investor Confidence in PV Power Plants through Latent Defect Screening. **PV Evolution Labs**, Berkeley, CA, 94710, USA.

MASTNY PETR, RADIL LUKAS, MASTNA ZUZANA. Possibilities of PV Panels Defects Identification and Determination of its Effect on the Economy of Photovoltaic Power Plants Operation. Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication. **Centre of Research and Utilization of Renewable Energy Sources Technicka** 10, 616 00 Brno.

JOHN PERN. Module Encapsulation Materials, Processing and Testing. National Center for Photovoltaics(NCPV). **National Renewable Energy Laboratory (NREL)** Golden, Colorado, USA.

M. KONTGES, I. KUNZE, S. KAJARI-SCHRODER, BREITENMOSER and B. BJORNEKLETT. Origin and Consequences of (Micro)-Cracks in Crystalline Silicon Solar modules. Institute for Solar Energy Research Hamelin 2 REC Solar AS. **PV Module Reliability Workshop 2011**.

DU-MING TSAI, SHIH-CHIEH WU and WEI-YAO CHIU. Defect Detection in Solar Modules Using ICA Basis Images. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**. FEBRUARY 2013.

BISHOP J.W. **Microplasma Breakdown and Hot-Spots in Silicon Solar Cells**, Italy, 1989.

M. KONTGES, I. KUNZE, V. NAUMANN, S. RICHTER, C. HAGENDORF, J. BERGHELD, M. ROERICHT. **Snail tracks(Schneckenspuren), worm marks and cell cracks.**