

UNIVERSIDADE PAULISTA - UNIP

PAINEL SOLAR AUTO-ORIENTÁVEL BASEADO NA LÓGICA  
PARACONSISTENTE ANOTADA EVIDENCIAL  $E_{\tau}$

ÁLVARO ANDRÉ COLOMBERO PRADO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista - UNIP, para obtenção do título de Mestre.

SÃO PAULO  
2013

UNIVERSIDADE PAULISTA - UNIP

PAINEL SOLAR AUTO-ORIENTÁVEL BASEADO NA LÓGICA  
PARACONSISTENTE ANOTADA EVIDENCIAL  $E\tau$

ÁLVARO ANDRÉ COLOMBERO PRADO

Orientador: **Prof. Dr. Jair Minoro Abe**

Área de Concentração: Gestão de Sistemas de  
Operação

Linha de Pesquisa: Métodos Quantitativos em  
Engenharia de Produção

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia de Produção da  
Universidade Paulista - UNIP, para obtenção do  
título de Mestre.

SÃO PAULO  
2013

## FICHA CATALOGRÁFICA

PRADO, Álvaro André Colombero

Painel solar auto-orientável baseado na Lógica  
Paraconsistente Anotada Evidencial  $E_{\tau}$  / Álvaro André Colombero  
Prado.  
São Paulo – 2013.

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Engenharia  
de Produção da Universidade Paulista – UNIP, São Paulo, 2013.

Área de Concentração: Gestão de Sistemas de Operação.  
Orientação: Prof. Dr. Jair Minoro Abe

1. Lógica paraconsistente anotada evidencial  $E_{\tau}$ , Software  
Embarcado, Sustentabilidade Energética.

ÁLVARO ANDRÉ COLOMBERO PRADO

PAINEL SOLAR AUTO-ORIENTÁVEL BASEADO NA LÓGICA  
PARACONSISTENTE ANOTADA EVIDENCIAL  $E_{\tau}$

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista - UNIP, para obtenção do título de Mestre.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Rodrigo Franco Gonçalves  
Universidade Paulista - UNIP

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Cláudio Rodrigo Torres  
Universidade Metodista de São Paulo - UMESP

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Jair Minoru Abe  
Universidade Paulista - UNIP

## **AGRADECIMENTOS**

A meu orientador, Prof. Dr. Jair Minoro Abe, pela contribuição e auxílio nesta caminhada, aconselhando e corrigindo, sempre que necessário.

A meu professor e amigo Prof. Dr. Marcelo Nogueira, pelas vivências que tivemos, pelo auxílio inestimável, pelos ensinamentos e conselhos valiosos, e pela presença sempre constante e acolhedora, nos bons e maus momentos em mais de sete anos de convivência.

A meu professor e amigo Prof. Dr. Fábio Amaral, pela ajuda, pelas opiniões sempre sinceras, pelos conselhos e pelo incentivo constante durante esta minha caminhada.

Meus mais sinceros agradecimentos ao apoio do programa CAPES/PROSUP, sem o qual este trabalho não teria sido possível.

Meu muito obrigado, também, a todos os professores, colegas e amigos da UNIP, câmpus Indianópolis, cuja valiosa presença muito contribuiu não só como ensinamento para o trabalho aqui presente, mas também como um precioso conjunto de vivências, em um importante momento para mim.

## DEDICATÓRIA

A meus pais, Rafael e Sandra. A meus avós Zilka, Dorival e Lourdes (*in Memoriam*) e meu irmão Rafael, pela compreensão, paciência e acima de tudo, por terem acreditado e investido em minha pessoa.

A meu querido amigo e meu primeiro “mestre”, sr. Luiz Joaquim Forno, que muito contribuiu para que eu criasse interesse pela eletrônica, ensinando-me os rudimentos da mesma através dos circuitos dos antigos receptores de rádio a válvula, em minhas distantes tardes de garoto, que costumava sempre passar em sua loja.

## RESUMO

Embora a energia elétrica seja algo presente e real em quase a totalidade das localidades mundo afora, muitas regiões isoladas não têm disponibilidade da mesma. As soluções adotadas na grande maioria desses casos resultam em alto impacto ambiental, utilizando-se da queima de combustíveis fósseis, com a emissão de gases poluentes, além dos riscos físicos a seus utilizadores.

O presente trabalho apresenta uma solução de impacto ambiental reduzido, através do aproveitamento da luz solar para geração de energia elétrica por meio de um painel fotovoltaico, com rendimento otimizado através de um sistema de auto-orientação, feito através de um *software* embarcado baseado na Lógica Paraconsistente Anotada Evidencial  $E\tau$ , com o qual se obtém uma performance superior, quando comparada com um painel fixo, sistema clássico e mais comumente empregado.

Através de uma adaptação do reticulado  $\tau$ , foi possível otimizar a parte da saída dos estados do algoritmo para-analisador, com a finalidade de obter-se uma performance otimizada do sistema de controle, com estados lógicos não-extremos convenientemente escolhidos de acordo com as necessidades da aplicação.

A implementação prática do protótipo foi feita com uma placa controladora caseira baseada na Arduino “Severino”, capaz de movimentar um preciso motor de passo através de um circuito *driver*, de acordo com as ações correspondentes aos estados lógicos encontrados.

Os testes práticos mostraram um rendimento 31,56% superior ao do sistema clássico com painel fixo, tendo produzido uma média de 3,193W contra 2,448W do painel fixo, o que demonstra a perfeita exequibilidade do arranjo.

### Palavras chave:

*Lógica paraconsistente anotada evidencial  $E\tau$ , Energia Solar, Carregador de baterias, Sustentabilidade Energética.*

## ABSTRACT

Although electricity is something already present and real in almost all the localities worldwide, many isolated regions do not have it available. Typically, the solutions adopted in the vast majority of these cases result in high environmental impact, by burning of fossil fuels, with consequent greenhouse gas emissions as well as physical risks to their users.

This work aims to present a solution of reduced environmental impact, by using the sunlight to generate electricity through a photovoltaic panel, with optimized performance through a self-orientation system, made through an embedded *software* based on Paraconsistent Annotated Evidential Logic  $E\tau$ , with which is possible to get superior performance when compared with a more commonly suited, fixed panel.

Through an adaptation of the lattice  $\tau$ , it was possible to optimize the output states of the para-analyzer algorithm, in order to obtain optimal performance of the control system, with the non-extreme logical states conveniently chosen according to the application needs.

The practical implementation of the prototype was made with a homemade controller board based on the Arduino "Severino", which is able to move a precise stepper motor through a *driver* circuit, in accordance with the corresponding actions to the logical states found.

Practical tests showed a yield of 31,56% from the classical system with fixed panel, producing an average of 3,193 W against 2,448 W of the fixed panel, which demonstrates the feasibility of the proposed arrangement.

### **Key words:**

*Paraconsistent annotated evidential logic  $E\tau$ , Solar Energy, Battery Charger, Energetic Sustainability.*



## ÍNDICE GERAL

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	Apresentação	17
1.2	Relevância	19
1.3	Justificativa	21
1.4	Objetivos	23
1.4.1	Objetivo Geral	23
1.4.2	Objetivos Específicos	23
1.5	Procedimentos Metodológicos	23
1.6	Escopo do Trabalho	25
1.7	Estrutura do Trabalho	25
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>27</b>
2.1	Energia Solar	27
2.1.1	Histórico	27
2.1.2	Sistemas Comumente Empregados	29
2.1.3	Ponto de Máxima Potência (MPP)	29
2.1.4	Solar Tracker	31
2.2	Sistemas de tempo Real	32
2.2.1	Histórico	32
2.2.2	Conceito	32
2.3	<i>Software</i> Embarcado:	34
2.3.1	Histórico	34
2.3.2	Conceito	35
2.4	Ciclo de vida do Software	37
2.5	Lógica Paraconsistente	38
2.5.1	Breve histórico	38
2.5.2	Lógica Paraconsistente Anotada Evidencial $E\tau$	39
2.5.2.1	Visão histórica	39
2.5.2.2	A linguagem da Lógica $E\tau$	40
2.5.2.3	O conectivo da negação	41
2.5.2.4	Os conectivos de conjunção, disjunção e implicação	42
2.5.2.5	O Reticulado $\tau$	42
2.5.2.6	Os graus de certeza e incerteza	43
2.5.2.7	Os estados de decisão: extremos e não-extremos	45
2.5.3	Algoritmo Para-Analisador	49

<b>2.6</b>	<b>Estado da Arte</b>	<b>53</b>
<b>3</b>	<b>SISTEMA DE CONTROLE “PARATRACKER”</b>	<b>59</b>
<b>3.1</b>	<b>Arranjo experimental do protótipo</b>	<b>61</b>
<b>3.2</b>	<b><i>Hardware</i> utilizado</b>	<b>63</b>
3.2.1	Placa Controladora	63
3.2.2	Painel Solar	65
3.2.3	Motor de Passo	66
3.2.4	Baterias e Controlador de Carga	68
<b>3.3</b>	<b><i>Software</i> de controle</b>	<b>70</b>
3.3.1	Introdução	69
3.3.2	Operação do Software Embarcado	73
3.3.2.1	Obtenção dos graus de evidência	73
3.3.2.2	Funcionamento do <i>software</i> embarcado	74
<b>4</b>	<b>TESTES E RESULTADOS</b>	<b>78</b>
<b>4.1</b>	<b>Testes</b>	<b>78</b>
<b>4.2</b>	<b>Resultados práticos</b>	<b>80</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>81</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>83</b>
<b>7</b>	<b>APÊNDICE</b>	<b>88</b>

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Pontos Cardeais (ABE, et al. 2012)	37
Tabela 2: Faixas de verdade (ABE, et al. 2012)	40
Tabela 3: Estados extremos (ABE, et al. 2012)	41
Tabela 4: Estados não-extremos (ABE, et al. 2012)	42
Tabela 5: Valores de potência coletados nos testes	78

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Crescimento da demanda energética mundial por combustível em MTOEs (Milhões de Toneladas Equivalentes em Óleo), segundo IEA (2012).	18
Figura 2. Números totais de Exclusão Elétrica rural por estado. (Dantas, 2013)	21
Figura 3. Engenheiros da Bell efetuam testes em um painel solar, 1954.	27
Figura 4. Rendimento das células solares, de acordo com Petrova-Koch et al. (2009)	27
Figura 5. Curva típica de uma célula solar. (SANTOS et al. 2005)	29
Figura 6. Curva de tensão versus corrente em uma célula solar. (SANTOS et al. 2005)	29
Figura 7. Curva típica de potência versus tensão, em diferentes níveis de irradiação (SANTOS et al. 2005) Figura 8. Aspecto do acoplamento de um sistema de Tempo-Real com o exterior, segundo OSHANA (2013)	30
Figura 8. Aspecto do acoplamento de um sistema de Tempo-Real com o exterior, segundo OSHANA (2013)	32
Figura 9. Arquitetura de um sistema embarcado, de tempo real, segundo OSHANA (2013)	37
Figura 10. Reticulado $\tau$ . (ABE, et al. 2012)	43
Figura 11. Estados extremos e não-extremos. (ABE, et al. 2012)	45
Figura 12. Graus de certeza e incerteza, com valores de controle ajustáveis. (ABE, et al. 2012)	47
Figura 13. Estados não-extremos. (ABE, et al. 2012)	48
Figura 14. Operação do algoritmo Para-Analisador (SILVA FILHO, 1999)	49
Figura 15. Aspecto da movimentação do painel solar.	58
Figura 16. Diagrama do painel solar, atenuador e inversor.	59
Figura 17. Aspecto da disposição dos componentes sobre a base fixa do protótipo.	60
Figura 18. Aspecto final do protótipo montado e operacional.	61
Figura 19. Aspecto de uma placa Arduino “Uno”	62
Figura 20. Aspecto da variação da placa controladora “Severino”, montada pelo autor em uma placa padrão Veroboard. Tal implementação específica foi nomeada pelo autor como “Virgulino”.	63
Figura 21. Esquema elétrico da placa controladora “Virgulino”.	64
Figura 22. Aspecto do painel solar utilizado no protótipo.	65
Figura 23. Aspecto do motor de passo, adotado no protótipo.	66

Figura 24. Circuito para acionamento do motor de passo, baseado no integrado específico ULN2003A.	67
Figura 25. Esquema elétrico do controlador de carga e circuito de alimentação.	68
Figura 26. Espiral de Boehm (BOEHM, 1988).	69
Figura 27. Análise dos riscos feitas pela ferramenta proposta em (NOGUEIRA, 2009).	70
Figura 28. Diagrama de Caso de Uso.	71
Figura 29. Diagrama de Sequência.	71
Figura 30. Diagrama de Estados.	72
Figura 31. Aspecto do reticulado, com os níveis de tensão correspondentes aos estados lógicos utilizados, baseado em TORRES, 2004.	74
Figura 32. Esquema do sistema de controle do painel solar auto-orientável.	76
Figura 33. Protótipo em operação, sobre o telhado da casa do autor.	77
Figura 34. IDE Arduino, com função 'Serial Monitor'.	78
Figura 35. Gráfico da potência média versus tempo.	78

## LISTA DE ABREVIATURAS

**ATMEGA** – Série de microcontroladores da família AVR, produzida pela Atmel Corporation

**AVR** – Advanced Virtual Risc

**CLP** – Controlador Lógico Programável

**DC** – Direct Current

**DSP** – Digital Signal Processing

**FPGA** – Field - programmable gate array

**IEA** – International Energy Agency

**IDE** – Integrated Development Environment

**IGBT** – Insulated Gate Bipolar Transistor

**LED** – Light emitting diode

**LPAE $\tau$**  – Lógica Paraconsistente Anotada Evidencial Et.

**MIT** – Massachusetts Institute of Technology

**MPP** – Maximum Power Point

**MPPT** – Maximum Power Point Tracker

**MTOEs** – Milhões de Toneladas Equivalentes em Óleo

**PVA** – Photo-Voltaic Arrangement

**RNA** – Redes Neurais Artificiais

**VDHL** – Very High Speed Integrated Circuits

## LISTA DE SIMBOLOS

**A:** Ampères

**Ah:** Ampères - Hora

**F:** Estado Lógico Extremo Falso

**G<sub>ce</sub>:** Grau de certeza

**G<sub>in</sub>:** Grau de incerteza

**I:** Estado Lógico Indefinido

**mA:** Miliampères

**M<sub>Hz</sub>:** Megahertz

**P<sub>MPP</sub>:** Potência máxima para um determinado nível de irradiação solar

**QF  $\rightarrow$  T:** Estado Lógico Não-Extremo Quase-Falso tendendo ao Inconsistente

**QF  $\rightarrow$   $\perp$ :** Estado Lógico Não-Extremo Quase-Falso tendendo ao Paracompleto

**QV  $\rightarrow$  T:** Estado Lógico Não-Extremo Quase-Verdadeiro tendendo ao Inconsistente

**QV  $\rightarrow$   $\perp$ :** Estado Lógico Não-Extremo Quase-Verdadeiro tendendo ao Paracompleto

**T:** Estado Lógico Extremo Inconsistente

**QT  $\rightarrow$  F:** Estado Lógico Não-Extremo Inconsistente tendendo ao Falso

**QT  $\rightarrow$  V:** Estado Lógico Não-Extremo Inconsistente tendendo ao Verdadeiro

**V:** Estado Lógico Extremo Verdadeiro

**V<sub>cfa</sub>:** Valor de controle de falsidade

**V<sub>cic</sub>:** Valor de controle de inconsistência

**V<sub>cpa</sub>:** Valor de controle de paracompleteza

**V<sub>cve</sub>:** Valor de controle de veracidade

$\perp$ : Estado Lógico Extremo Paracompleto

$\mathbf{Q}\perp \rightarrow \mathbf{V}$ : Estado Lógico Não-Extremo Paracompleto tendendo ao Verdadeiro

$\mathbf{Q}\perp \rightarrow \mathbf{F}$ : Estado Lógico Não-Extremo Paracompleto tendendo ao Falso

**W**: Watts

$\lambda$ : Evidência Desfavorável

$\mu$ : Evidência Favorável



## 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho apresenta a aplicação da Lógica Paraconsistente Anotada Evidencial  $E\tau$  – Lógica  $E\tau$  – em um sistema de auto-orientação, destinado a otimizar o rendimento de um painel fotovoltaico para geração de eletricidade, proporcionando carga para um conjunto de baterias em localidades isoladas e desprovidas de energia elétrica, seguindo uma crescente tendência no sentido da busca por dispositivos confiáveis, menos danosos ao meio-ambiente e apresentando baixo consumo de recursos em sua operação.

Foi executada a implementação prática de um protótipo, baseada em uma placa controladora derivada da Arduino e de um motor de passo para movimentar o painel solar, utilizando para fins de sensoramento uma amostragem dos próprios valores de tensão oferecidos pelo mesmo, capturados em dois momentos distintos para cada posição e devidamente normalizados, perfazendo os valores de entrada de evidência favorável ( $\mu$ ) e de evidência contrária ( $\lambda$ ), necessários à alimentação do algoritmo para-analisador utilizado no *software* embarcado.

Foi utilizada uma versão do reticulado  $\tau$  adaptada às necessidades da aplicação, com quatro estados lógicos extremos ( $V$ ,  $F$ ,  $\perp$ ,  $T$ ) e dois estados não-extremos ( $QV \rightarrow \perp$  e  $QV \rightarrow T$ ), uma vez que sob níveis de insolação ideais o sistema irá trabalhar com estados lógicos mais próximos do verdadeiro, e com ações correspondentes para cada estado lógico encontrado, permitindo um maior refinamento e acurácia no posicionamento final do painel.

Foi realizada uma série de testes práticos durante seis dias, visando comparar o rendimento obtido pelo sistema com o oferecido pelo arranjo clássico com painel fixo, apontando para o sol do meio-dia, com o que se obteve um ganho 31,56% maior com o sistema baseado na Lógica  $E\tau$ , apresentando um rendimento médio de 3,193W em três dias contra 2,448W oferecidos pelo painel fixo no mesmo período, demonstrando a perfeita exequibilidade da implementação real.

## 1.1 Apresentação

Desde seus primórdios, o ser humano vem buscando não apenas suprir suas necessidades mais básicas, mas também obter uma vida mais confortável e proveitosa, lançando mão de uma série de processos e métodos que visam simplificar atividades quotidianas e trazer melhorias a sua qualidade de vida.

Dentre todos os engenhos e comodidades desenvolvidos ao longo dessa existência, alguns já se encontram tão enraizados dentro do conjunto de itens usuais para o cidadão moderno, ficando difícil acreditar que em algumas situações eles podem estar indisponíveis.

A vida nas grandes metrópoles, cuja grande parte das residências já possui um vasto rol de comodidades como televisão por cabo ou conexão à Internet, até mesmo por cabos de fibra óptica de alta velocidade, contrasta com situações de extrema escassez de recursos em regiões menos favorecidas econômica e populacionalmente, onde mesmo os itens mais básicos para uma vida mínimamente confortável se encontram, muitas vezes, a muitos quilômetros de distância.

Um desses itens é a energia elétrica. De grande importância para a sociedade moderna, não apenas fornece iluminação pública e residencial, mas também viabiliza uma série de facilidades adicionais – e tão importantes quanto ela – como o acionamento de bombas para a distribuição de água, a alimentação de dispositivos que executem trabalhos que manualmente seriam impossíveis de fazer, como serras elétricas, moendas e outros, bem como também representa um pilar para a comunicação com o restante do mundo, seja por meio de equipamentos de rádio, televisores e dispositivos que operam com transmissão de dados via satélite.

Este trabalho busca apresentar uma alternativa sustentável para a geração de energia elétrica em regiões isoladas e outras localidades onde a instalação de uma rede elétrica convencional não seja uma alternativa viável, seja pelas próprias distâncias físicas, pelo alto custo de instalação, e também no caso de populações ribeirinhas, que se situam em áreas de difícil acesso e cujo ecossistema é de grande importância.

## 1.2 Relevância

De acordo com relatório do *International Energy Agency* (2012), em nível de mundo, a demanda por energia dobrou em um período de quarenta anos, e carvão e óleo ainda representam os principais combustíveis utilizados, com 32.4% e 27.3% de aplicação, seguidos pelo gás natural (21.4%), biocombustíveis (10%), energia nuclear (5.7%), hidroelétrica (2.3%) e outros tipos (0.9%), dentre os quais está a energia solar (fig. 1).

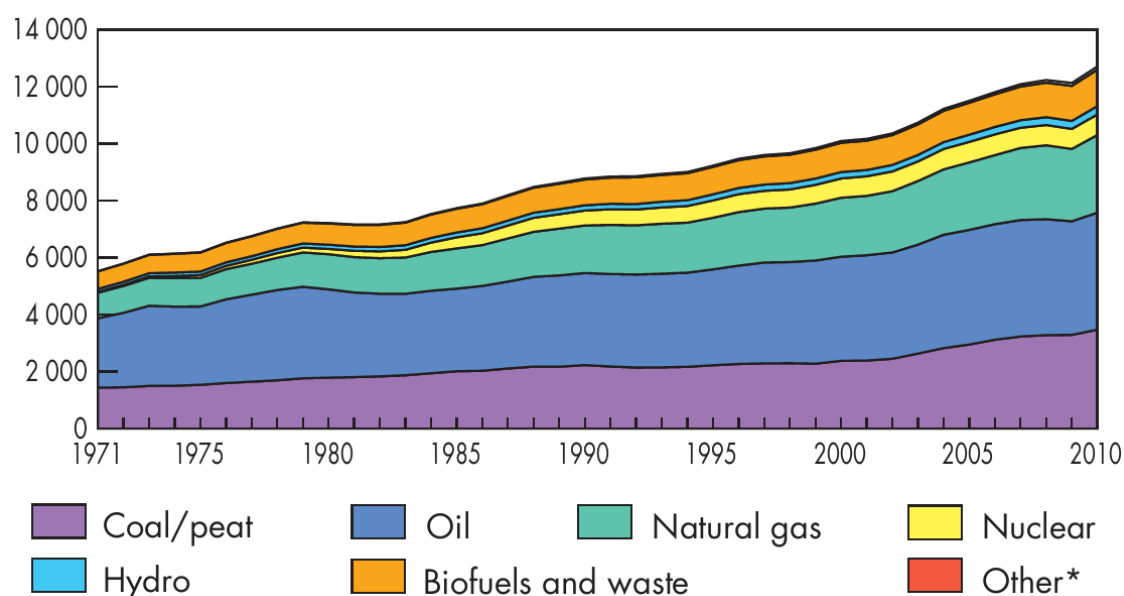


Figura 1. Crescimento da demanda energética mundial por combustível em MTOEs (Milhões de Toneladas Equivalentes em Óleo), segundo IEA (2012).

De acordo com MANZANO-AGUGLIERO et al. (2013), os combustíveis fósseis são a principal fonte de energia do mundo, e encontram-se no centro das demandas de energia mundiais. Contudo, sua reserva é limitada, e seu uso em larga-escala é associado com a degradação do ambiente. Os efeitos negativos conhecidos do uso desses combustíveis incluem a *chuva-ácida*, depredação da camada de ozônio, e mudanças climáticas globais.

KALOGIROU (2004) também demonstra outros efeitos negativos do uso dos combustíveis fósseis, como o aumento na emissão de gases poluentes para a atmosfera e o aumento nos preços dos combustíveis.

Para BAÑOS et al. (2011), fatores agregam grande importância à busca de um crescimento no uso de fontes de energia renováveis.

Segundo o *White Paper*, documento sobre energia editado pelo governo britânico em 2003 (WHITE PAPER, 2003) apud BELLABY (2009), quatro principais objetivos foram definidos para a política energética inglesa:

- A redução das emissões de carbono em 60% até o ano 2050, já visando um real progresso em 2020.
- A manutenção de fontes de energia confiáveis.
- A promoção de mercados competitivos, na Inglaterra e países próximos.
- Garantir que todas as residências estejam adequadamente aquecidas.

Ainda segundo BELLABY (2009), tais objetivos demonstram uma crise, tanto referente à insegurança na distribuição energética, quanto também em mudanças climáticas e no aquecimento global.

O quarto relatório anual do Painel Internacional de Mudanças Climáticas (IPCC, 2007), apresenta fortes possibilidades para que a questão do aquecimento global e das mudanças climáticas afete de alguma forma a vida humana no século XXI, e todas essas se encontram ligadas às emissões de monóxido de carbono, provocadas pelo homem. O relatório também apresenta que os seres humanos tem uma janela de dez anos para remediar os efeitos.

Tal crise é ‘iminente’, contudo, a questão da insegurança na distribuição de energia é uma crise real e ‘presente’, embora esteja mais relacionada com as desigualdades na distribuição da energia ao redor do mundo, entre localidades onde a demanda é alta e as reservas de recursos naturais como petróleo e gás se encontram, podendo ou não exportar o que produzem.

Existe uma tendência crescente à necessidade na redução do uso de combustíveis fósseis, mas ainda não existe nenhum caminho definido para um futuro sustentável definido (BELLABY, 2009).

Não se pretende, dentro do escopo deste trabalho, a construção de um sistema que gere impacto ambiental igual a zero, uma vez que isso é praticamente impossível, mas um sistema que gere um impacto reduzido, conforme expressa BERMANN (2002), “*Não existe energia limpa. Em maior ou menor grau, todas as fontes de energia provocam danos ao meio-ambiente*”. (Bermann, Célio. 2002)

Todo o debate versado nas últimas décadas acerca do aquecimento global, influenciado pelas grandes e crescentes emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa, demonstra que todo esse cenário encontra-se relacionado com o aumento na produção e utilização de energia ao redor do globo.

Segundo SILVA et al. (2013), dentro do presente cenário de energias não-renováveis e iminente escassez de recursos, as restrições ao livre acesso a fontes de energia, e um quadro jurídico estruturado, que estabelece impedimentos e/ou barreiras de contenção para a expansão do uso de recursos energéticos não-renováveis, o desenvolvimento e o uso de recursos renováveis torna-se ainda mais importante.

### **1.3 Justificativa**

A existência de locais desprovidos de qualquer rede de distribuição de energia elétrica é justificada por BURSZTYN (org.) (2001) como fator resultante das grandes distâncias físicas entre as linhas de distribuição de energia elétrica e a localidade em si, das baixas taxas de ocupação e da importância do ecossistema local, muitas vezes grande, o que infere em um tratamento específico para que sejam atendidas as necessidades de energia elétrica.

As várias soluções que são adotadas nesses casos, resultam em alto impacto ambiental, como o uso de geradores movidos por motores à explosão ou mesmo lampiões a gás ou querosene para a iluminação, que além da alta emissão de gases poluentes, ainda oferecem riscos físicos a quem os manuseia.

Enquadram-se nessa situação, muitas comunidades situadas no interior das regiões Norte e Nordeste do Brasil, com populações pequenas e distribuídas de forma muito dispersa, o que torna o trabalho de levar eletrificação rural a elas algo complexo e de custo elevado.

Segundo DANTAS (2013), as dificuldades em levar a eletrificação rural a essas comunidades, e a necessidade de limitar o uso de combustíveis fósseis, substituindo-os por alternativas energéticas não poluidoras e renováveis, tornam urgente o investimento em pesquisa e desenvolvimento de fontes alternativas de energia. Projetos para a obtenção de energia elétrica gerada partir de unidades de produção baseadas em biomassa, eólica, solar e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) começam a ser implantados em comunidades isoladas da Região Norte. Porém, assim como as demais fontes alternativas, o custo de instalação dessas

tecnologias é alto, dificultando o seu acesso pelas pequenas comunidades isoladas tanto da Amazônia quanto do Nordeste.

Segundo dados do Ministério de Minas e Energia (MME), cerca de 10 milhões de brasileiros ainda não possuem acesso à energia elétrica, e provê-la a tal número de pessoas, que contabilizam ao todo dois milhões de domicílios, e 80% dos números totais de exclusão elétrica rural (figura 2), é uma tarefa desafiadora (Dantas, 2013).

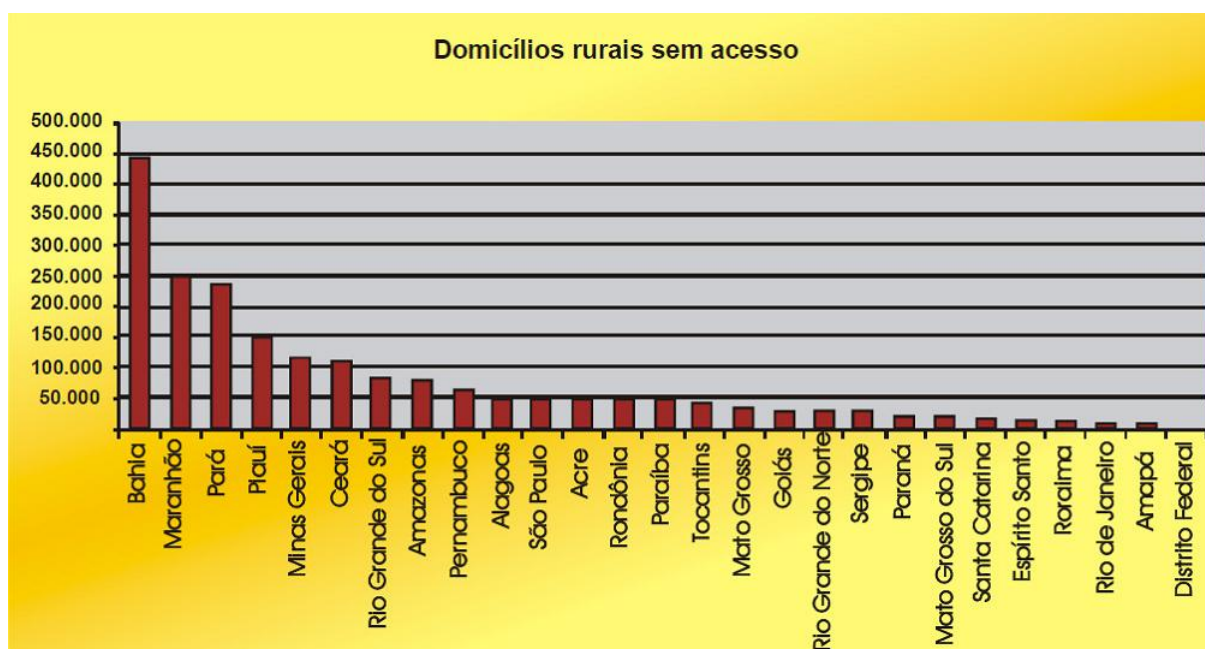


Figura 2: Números totais de Exclusão Elétrica rural por estado. (Dantas, 2013)

CRESESB (2006), aborda que atualmente os sistemas fotovoltaicos vêm sendo utilizados em instalações remotas possibilitando vários projetos sociais, agropastoris, de irrigação e comunicações. As facilidades de um sistema fotovoltaico tais como: modularidade, baixos custos de manutenção e vida útil longa, fazem com que sejam de grande importância para instalações em lugares desprovidos da rede elétrica.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo Geral

A pesquisa tem como objetivo, o desenvolvimento de um sistema para auto-orientação de um painel fotovoltaico, para busca de seu ponto de rendimento máximo em relação à posição do sol (*solar tracker*), apoiado na Lógica Paraconsistente Anotada Evidencial  $E\tau$  (denominado pelo autor “*Paratracker*”), e seu processo de validação, com medições de seus resultados através de um sistema integrado para carga de baterias.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, constituem-se:

- A construção do *software* embarcado de controle para o painel, utilizando a Lógica Paraconsistente Anotada Evidencial  $E\tau$ .
- O desenvolvimento do protótipo, com a construção do circuito eletrônico em placa tipo ‘*veroboard*’ e suas ligações com componentes mecânicos e o painel solar.
- A execução de testes práticos e medidas de performance do sistema *Paratracker*, que permitam a obtenção de resultados que validem o modelo ora proposto.

## 1.5 Procedimentos Metodológicos

O presente trabalho caracteriza-se por uma pesquisa exploratória, descritiva e explicativa, uma vez que se mostra adequada aos objetivos propostos.

ALVES (2004), define a pesquisa exploratória como “(...) *toda pesquisa que busca explorar, investigar um fato, fenômeno ou novo conhecimento sobre o qual se tem pouca informação*”.

Sob o ponto de vista de MACHADO (2002), a pesquisa exploratória tem como objetivo promover uma primeira aproximação com o tema, proporcionando ao pesquisador a visibilidade da importância do problema, o estágio de resolução e as informações disponíveis. O pesquisador parte de uma hipótese e aprofunda seus estudos e limites de uma realidade específica para, em seguida, planejar uma pesquisa descritiva ou do tipo experimental. Normalmente, a forma de condução desse tipo de pesquisa é através do levantamento bibliográfico, entrevistas com profissionais que estudam ou atuam na área, visitas, etc.

A pesquisa descritiva é descrita por NOGUEIRA (2009) como tendo o objetivo de descrever um fato ou fenômeno evidenciando as características conhecidas, ou seja, os componentes do

fato / fenômeno / problema. Esses estudos consideram de fundamental importância a exatidão de uma nova provas obtida. A forma de condução desse tipo de pesquisa é através de levantamentos ou observações sistemáticas do fato / fenômeno / problema escolhido. O foco dos estudos descritivos reside no desejo de conhecer traços característicos, seus problemas seu mercado, etc. Esses estudos exigem do pesquisador uma série de informações sobre o que deseja pesquisar, pois o objetivo é descrever com exatidão os fatores e fenômenos de determinada realidade. Além da coleta, ordenação e classificação dos dados, podem ser estabelecidas relações entre as variáveis, caracterizando um estudo descritivo e correlacional.

A pesquisa explicativa, segundo ALVES (2004), “*desenvolve-se com o o objetivo de explicar um fenômeno, elucidar as questões que envolvem um evento de forma a torná-lo compreensível à sociedade*”.

Para a execução do trabalho, foi feita inicialmente uma pesquisa bibliográfica, com o intento de conhecer-se o “estado da arte” sob a ótica da energia solar, e dos sistemas empregados para sua otimização dentro do campo da geração de energia elétrica. Foram também levantados dados relativos à exclusão elétrica rural no interior do Brasil e a demanda e capacidade mundial de suprimento de energia.

Posteriormente, foi feita a elaboração do protótipo prático, sua construção física e integração entre suas diversas partes móveis, e o desenvolvimento de seu *software* embarcado apoiado na Lógica Et, com a modelagem de seus componentes baseada nos diagramas da *Unified Modelling Language* (UML).

Para a validação do modelo experimental, foram executados diversos testes práticos ao ar livre, com o sistema completamente funcional e também com o painel parado, para fins de comparação de performance entre o sistema clássico (fixo) e com o painel auto-orientável.

Através de uma medição dos resultados obtidos com o sistema atrelado a um conjunto de baterias e controlador de carga, foi possível estabelecer a diferença de performance entre os dois arranjos, bem como quantificar a otimização no rendimento obtido, em tensão e potência final, validando o modelo proposto.

Como metodologia base, tem-se:

- Pesquisa exploratória, descritiva e explicativa.



E como métodos fundamentais para a pesquisa:

- Pesquisa bibliográfica, com estudo do estado da arte sobre a energia solar e os sistemas utilizados para a otimização de seu rendimento.
- O desenvolvimento do protótipo, com seu *software* embarcado de controle baseado na Lógica  $E\tau$ , modelo matemático utilizado para a tomada de decisões relativas ao posicionamento do painel fotovoltaico.
- A parte experimental, com os testes práticos e medidas de performance realizados entre um painel fixo e o protótipo, com a finalidade de validar o modelo proposto.

## 1.6 Escopo do Trabalho

O trabalho consiste do desenvolvimento de um sistema de auto-orientação para painéis fotovoltaicos com *software* embarcado e de tempo real apoiado na Lógica  $E\tau$ , com a finalidade de otimizar a captação de energia de um painel (ou conjunto de painéis) ao longo do período de um dia, acompanhando a movimentação do sol e permitindo um rendimento mais constante e superior, quando comparado ao de um painel fixo.

O sistema trabalhará com os dados obtidos a partir de uma amostragem da tensão do próprio painel, obtida diretamente e devidamente invertida, para que se obtenham os valores de evidência favorável ( $\mu$ ) e evidência contrária ( $\lambda$ ) requeridos pelo controlador paraconsistente utilizado.

O *software* realizará uma checagem em seus dados de entrada de forma cíclica, efetuando um escaneamento em busca do ponto em que encontrar maior evidência favorável, executando em seguida um conjunto de ações, de acordo com o estado lógico encontrado, buscando maior precisão e refinamento no posicionamento do painel, para máximo rendimento.

## 1.7 Estrutura do Trabalho

Depois de uma abordagem sobre a origem do projeto e das direções para seu desenvolvimento no capítulo um, o segundo capítulo aborda os diversos conceitos necessários à feitura do sistema, como o estudo da energia solar, sua história e sistemas empregados; o estudo dos sistemas embarcados e de tempo real, assim como da lógica paraconsistente anotada evidencial  $E\tau$ , e do algoritmo para-analisador. Um estudo do estado da arte sobre os trabalhos

realizados por outros autores no âmbito da energia solar para a geração de energia elétrica, fecha o capítulo.

O capítulo três, apresenta arranjo experimental do protótipo, com sua construção física e detalhes do *software*. O capítulo quatro apresenta a discussão dos resultados obtidos através dos testes práticos, e o capítulo cinco avalia os resultados obtidos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Energia Solar

Os conceitos abordados no presente trabalho abarcam as diversas tecnologias, dentre elas a produção de energia elétrica através da luz do sol, é conveniente exibir um breve histórico sobre o seu desenvolvimento, e uma digressão a respeito dos sistemas mais utilizados que dela fazem uso.

#### 2.1.1 Histórico

A tecnologia empregada remonta ao final do século XIX, com as pesquisas de Willoughby Smith que observou, em 1873, as propriedades fotovoltaicas do Selênio, que apresentava um incremento em sua condutibilidade elétrica quando exposto a luz<sup>1</sup>.

Seguindo-se a ele, Charles Fritts apresentou em 1880 a primeira célula funcional, feita do mesmo material, e capaz de produzir pequena quantidade de energia sem consumir nenhuma substância material e também sem gerar qualquer aquecimento<sup>2</sup>.

Em 1905, Einstein esboçou sua teoria sobre os princípios do efeito fotoelétrico, baseado na Teoria de Quanta de Max Planck, contribuindo no entendimento do processo da transformação da luz solar em energia elétrica.

Isso permitiu que fossem feitas pesquisas a respeito que redundaram em importantes resultados durante os anos 1930, muito embora o rendimento das células então produzidas fosse muito baixo, e seu custo de fabricação, extremamente elevado.

Durante os anos 1950, os laboratórios da Bell Electronics descobriram propriedades semelhantes a do então utilizado selênio em outro elemento mais comum, o silício.

Segundo Solar Energy International (2004), quando dopado com determinadas impurezas, o silício torna-se capaz de gerar uma substancial tensão elétrica, e a primeira célula solar feita do material foi apresentada em 1954, com uma eficiência de 6%. Como primeira aplicação

---

<sup>1</sup> “In 1873, British scientist Willoughby Smith noticed that selenium was sensitive to light. Smith concluded that selenium’s ability to conduct electricity increased in direct proportion with to the degree of its exposure to the light.” (Solar Energy International. Photovoltaics, Design and Installation Manual, New Society, p.2)

<sup>2</sup> “In 1880, Charles Fritts developed the first selenium-based solar electric cell. The cell produced electricity without consuming any material substance and without generating heat.” (Solar Energy International. Photovoltaics, Design and Installation Manual, New Society, p.2)

consolidada da energia solar para alimentação de dispositivos eletrônicos, pode ser citada uma estação repetidora telefônica que foi construída no estado da Geórgia, nos EUA (figura 3).

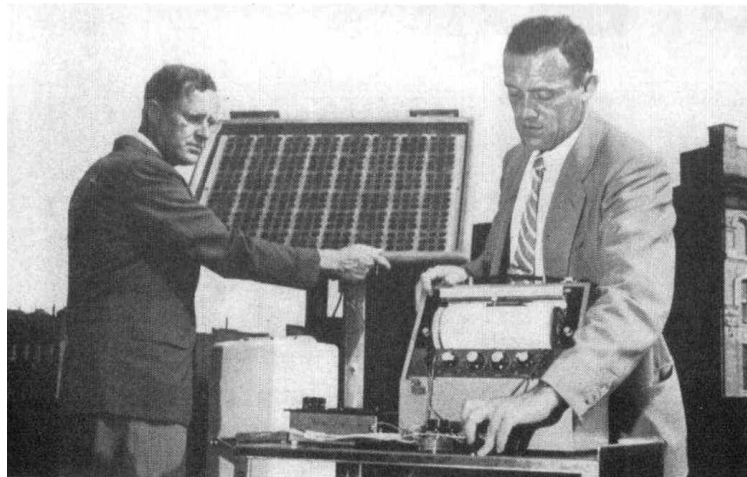


Figura 3: Engenheiros da Bell efetuam testes em um painel solar, 1954.

Segundo PETROVA-KOCH et al. (2009), algumas células solares experimentais de silício cristalino conseguem produzir um rendimento máximo próximo de 25%, situando-se entre 13% - 16% para a maioria das células destinadas a uso industrial, e pretende-se que tenham um rendimento próximo do máximo obtido em um futuro não distante (fig. 4).

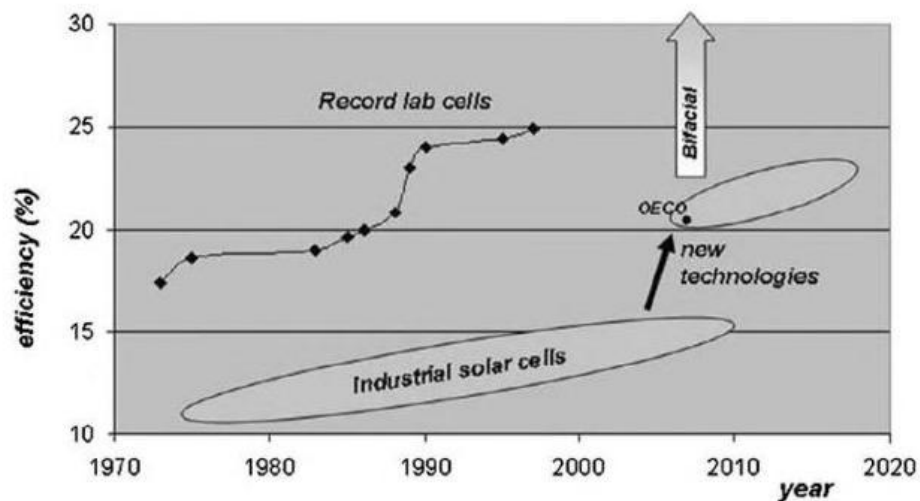


Figura 4. Rendimento das células solares, de acordo com Petrova-Koch et al. (2009)

Muitos sistemas elétricos e eletrônicos que se utilizam da energia luminosa como fonte de alimentação, demonstram-se eficazes em sua teoria, mas em aplicações para uso em campo, muitas vezes, deixam a desejar nos quesitos mais importantes: a performance e especialmente, a praticidade.

### 2.1.2 Sistemas Comumente Empregados

Paineis fotovoltaicos são compostos por células que por si só têm uma capacidade muito limitada de fornecimento de energia em termos de tensão e corrente, sendo conectadas em forma de matrizes (série-paralelo), somando-se suas capacidades e tornando o conjunto como um todo, apto a cumprir as funções designadas.

SANTOS et al. (2005) definem que uma célula solar consiste de material semicondutor que converte a irradiação solar em uma corrente contínua. As qualidades mais importantes de uma célula solar são descritas pelas suas características de tensão e corrente.

Segundo a SOLAR ENERGY INTERNATIONAL (2004), a aplicação dos paineis fotovoltaicos pode ser dividida entre dois tipos de sistemas básicos:

- Sistemas Integrados para Carga de Baterias:

Incorporam todos os seus componentes em um único conjunto. É um arranjo muito bem aplicado em casos em que complementa ou mesmo substitui uma bateria do tipo não recarregável, procedendo a sua carga durante os períodos de luz solar e permitindo que seja usada posteriormente.

Pequenos dispositivos, dotados de um painel solar e um simples circuito regulador de carga são um exemplo comum. Existem comercialmente disponíveis na forma de pequenos conjuntos, destinados a aplicações em que substituem outros tipos de baterias mediante alguma adaptação no equipamento que as utiliza, ou não.

- Sistemas para uso durante o dia “*Day-use Systems*”:

São os sistemas mais simples e baratos. Incorporam apenas o painel (ou às vezes uma simples célula fotovoltaica), e se prestam a fornecer alimentação apenas nos momentos em que há luz solar disponível, não havendo forma de armazená-la, o que torna seu funcionamento um tanto instável, uma vez que quanto menos luz incidida, menos energia é produzida. Podem ser vistas aplicações desse tipo de sistemas em calculadoras, brinquedos e outros dispositivos pequenos, com necessidades de energia também reduzidas.

### 2.1.3 Ponto de Máxima Potência (MPP)

A figura 5 apresenta a curva típica de comportamento de uma célula solar, com a corrente versus a tensão, sob diversos níveis de insolação.

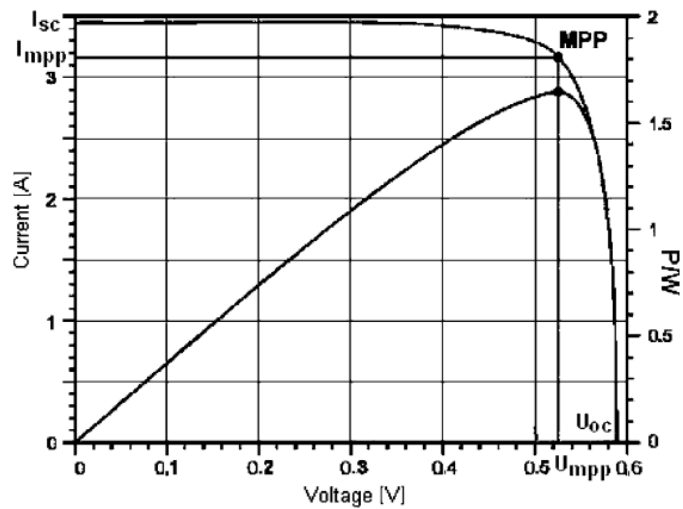


Figura 5. Curva típica de uma célula solar. (SANTOS et al. 2005)

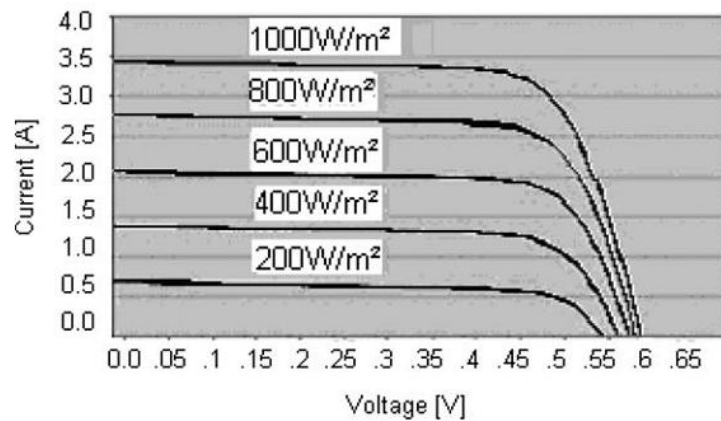


Figura 6. Curva de tensão versus corrente em uma célula solar. (SANTOS et al. 2005)

Segundo SANTOS et al. (2005), a figura 6 apresenta o ponto de operação em que a célula solar entrega máxima potência para um determinado nível de irradiação  $P_{MPP}$ . A célula solar se comporta como uma fonte de corrente à esquerda do  $P_{MPP}$  e como uma fonte de tensão à direita do  $P_{MPP}$ . Para cada curva de irradiação solar, há um ponto de tensão específico em que a célula irá operar em seu ponto máximo de funcionamento (figura 6). Considerando que a maioria dos dispositivos a serem alimentados pela célula opera em níveis de tensão constantes, torna-se necessário buscar o ponto em que a célula é capaz de entregar maior potência, de acordo com a tensão requerida pela carga (figura 7).

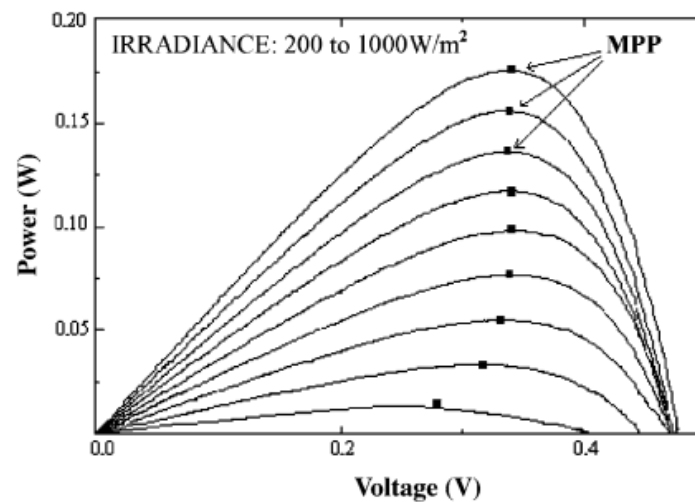


Figura 7. Curva típica de potência versus tensão, em diferentes níveis de irradiação (SANTOS et al. 2005)

#### 2.1.4 Solar Tracker

De acordo com o exposto por DELL e RAND (2004): *“Para extrair a máxima potência elétrica de uma célula solar, é essencial que ela seja operada próxima de seu ponto máximo”*. (Dell e Rand, 2004)

Torna-se importante a aplicação de um sistema que viabilize seu posicionamento em relação a seu ponto de máximo rendimento, que pode ser alcançado mediante o uso de um *Solar Tracker*.

Para CAMACHO et al. (2012), o *Solar Tracker* (também chamado de *Maximum Power Point Tracker*, ou MPPT) é: *“(...) um dispositivo para orientar um painel fotovoltaico em direção ao sol, aumentando assim a efetividade deste equipamento sobre a de qualquer posicionamento fixo, sob o custo de uma maior complexidade adicional do sistema”*.

O processo de busca pelo ponto de máxima potência, segundo TORRES (1998), pressupõe que o gerador fotovoltaico esteja sempre colocado para operar sob suas máximas características de tensão e corrente. Tal dispositivo consiste de um conversor DC/DC, que ajusta o gerador para seu MPP independentemente da carga em sua saída, podendo outras soluções também serem adotadas.

## 2.2 Sistemas de tempo real

### 2.2.1 Histórico

O termo “tempo real” surgiu pela primeira vez na Série Especial sobre Integração de Sistemas da revista *Electronic Design*, quando foram abordados os princípios da integração de sistemas. O artigo “*Real-Time Systems*” de H. J. Hinden e W. B. Rausch-Hinden, em 1983, citava questões de tempo real, partindo do ponto de vista de um sistema e serviu de base para outros assuntos.

### 2.2.2 Conceito

Um Sistema de Tempo Real é todo e qualquer sistema que esteja conectado com o meio externo, seja por meio de sensores, atuadores e interfaces de Entrada e Saída, controlando-o assim. Tal tipo de sistema deve satisfazer determinados tipos de requisitos de comportamento, especialmente no quesito temporal, o que lhe confere esse nome tão específico.

Para PRESSMAN (2007), o *software* de tempo real é altamente acoplado ao mundo externo. Ou seja, o *software* de tempo real deve responder ao domínio do problema (o mundo real) numa escala de tempo ditada por este. Uma vez que o *software* deve operar sob rigorosas restrições de desempenho, o projeto do *software* muitas vezes é baseado na arquitetura de *hardware* e também de *software*, por características do sistema operacional e requisitos da aplicação, por caprichos de linguagens das programações e questões de projeto.

Outra visão que se alinha a essas é de Robert Glass apud (2007), em que o computador digital está-se tornando ainda mais presente na vida diária de todos nós. Os computadores permitem que relógios executem jogos eletrônicos e informem a hora, otimizem o consumo de combustível dos carros e coloquem diversos aparelhos num encadeamento lógico. Na indústria, os computadores controlam máquinas, coordenam processos e, cada vez mais, substituem as habilidades manuais e o reconhecimento humano por sistemas automatizados e inteligência artificial. Todas essas interações computadorizadas – sejam elas úteis ou intrusivas – são exemplos de computação de tempo real. O computador está controlando algo que interage com a realidade numa base oportuna quanto ao tempo. De fato, o *timing* é a essência da interação. Um sistema de tempo real indiferente pode ser pior do que nenhum sistema em absoluto.



Segundo SHAW, ALLAN (2001), Sistemas de Tempo Real, são sistemas que monitoram, respondem ou controlam um ambiente externo. Esse ambiente está conectado ao sistema de computação por meio de sensores, atuadores e outras interfaces de entrada/saída (...) o sistema de computação deve satisfazer a várias restrições, temporais e a ele impostas a ele pelo comportamento de tempo real do mundo externo com o qual ele faz interface. Daí vem o nome, Tempo Real.

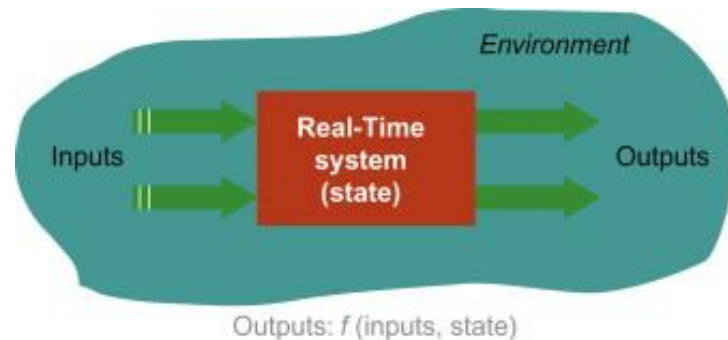


Figura 8. Aspecto do acoplamento de um sistema de Tempo-Real com o exterior, segundo OSHANA (2013)

Segundo PRESSMAN (2007), os sistemas de tempo real, geram certa ação em resposta a eventos externos. Para cumprir essa função, eles realizam controle e aquisição de dados em alta velocidade sob severas restrições de tempo e confiabilidade. Uma vez que essas restrições são por demais severas, os sistemas de tempo real frequentemente são dedicados a uma única aplicação.

Via de regra, a definição de Tempo Real, se aplica a qualquer sistema que, conectado ao meio externo, produza um resultado com um tempo de atraso menor que um segundo entre o estímulo recebido e a ação em resposta a este (figura 8).

Para SOMMERVILLE (2012), um sistema de *software* de tempo real é um sistema cujo funcionamento correto depende tanto dos resultados produzidos pelo sistema quanto do tempo em que esses resultados são produzidos. Um “sistema de tempo real” é um sistema cuja operação é degradada se os resultados não forem produzidos em conformidade com os requisitos de tempo especificados. Se os resultados não forem produzidos de acordo com a especificação de tempo em um “sistema de tempo real pesado”, isso é considerado uma falha de sistema.

## 2.3 *Software Embarcado*

### 2.3.1 Histórico

No início da era da computação, os computadores apresentavam uma única tarefa, sendo muito grandes para serem considerados embarcados. Esse conceito de controlador programável foi desenvolvido somente algum tempo depois.

O Apollo Guidance Computer foi o primeiro sistema embarcado devidamente reconhecido. Foi desenvolvido por Charles Stark Draper pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT). Esse computador guiava e operava em tempo real o item mais arriscado do projeto Apollo.

Em 1961 surgiu para produção em massa o computador guia do míssil nuclear LGM-30 “*Míssil Minuteman*”, que apresentava apenas um disco rígido para a memória principal. Em 1966, surgiu a segunda versão do míssil, e o computador guia foi substituído por um novo, com utilização de grande volume de circuitos integrados. A tecnologia desse projeto reduziu o preço dos circuitos integrados, permitindo seu uso em sistemas comerciais.

Desde sua origem os sistemas embarcados vêm reduzindo seu preço, bem como também ocorreu um aumento no processamento e funcionalidade. Somente em 1978, a National Engineering Manufacturers Association lançou uma norma para microcontroladores programáveis.

Na década 1980, vários componentes externos foram integrados ao chip do processador, resultando em circuitos integrados denominados microcontroladores, cenário que difundiu os sistemas embarcados.

Com a diminuição do custo dos microcontroladores, viabilizou-se a substituição de componentes analógicos de alto custo como potenciômetros e capacitores, por eletrônica digital controlada por pequenos microcontroladores. Na década de 1980, os sistemas embarcados deixaram de ser tratados como exceções referentes aos dispositivos eletrônicos.

### 2.3.2 Conceito

É conhecido por embarcado, todo o *software* projetado especialmente para ser parte integrante e exclusiva de um determinado equipamento.

Não é facilmente percebido como tal, também não sendo tratado de forma separada do equipamento para o qual foi desenvolvido que pode ser qualquer tipo de máquina ou bem de consumo. Um exemplo da aplicabilidade do *software* embarcado que pode ser citado como fundamental, é seu uso em celulares.

SOMMERVILLE (2012), utiliza outra denominação para a mesma situação, em que o *software* embarcado é muito importante economicamente porque quase todos os dispositivos elétricos incluem *software*. Portanto, existem muitos sistemas de *software* embarcado, mais do que outros tipos de sistema de *software*. Mesmo em uma residência comum, podem existir três ou quatro computadores pessoais, mas provavelmente, 20 ou 30 sistemas embarcados, tais como sistemas de telefones, fogões, micro-ondas, e similares.

De acordo com ZELKOWITZ, MARVIN *“Seu principal papel (...) é a interação com o mundo físico. Executa em máquinas que, em primeiro lugar, não são computadores.”*

Com a crescente demanda tecnológica que teve parte nos últimos anos, o *software* embarcado passou a se tornar cada vez mais aplicado em equipamentos de consumo, tornando-se um item essencial, praticamente, na fabricação de todos os aparelhos modernos que se utilizam de micro-controladores e afins. Um exemplo disso é a sua presença em lavadoras de roupa, celulares, televisores, enfim, em itens que figuram em praticamente 99% das residências mundo afora.

A resposta no tempo correto é um ponto crucial em todos os sistemas embarcados, embora nem todos os sistemas embarcados possam exigir uma resposta rápida.

Para SOMMERVILLE (2012), existem outras diferenças importantes entre sistemas embarcados e outros sistemas de *software*, além da necessidade de respostas em tempo real:

- Os sistemas embarcados executam continuamente e não param. Começam quando o *hardware* é ligado e devem executar até que o *hardware* seja desligado. Isso significa que técnicas de engenharia de *software* confiáveis, podem precisar ser usadas para garantir a operação contínua. Sistemas de tempo real podem incluir mecanismos de atualização que suportam reconfiguração dinâmica para que os mesmos possam ser atualizados enquanto estão em serviço.

- As interações com o ambiente do sistema são incontroláveis e imprevisíveis. Em sistemas interativos, o ritmo da interação é controlado pelo sistema e, ao limitar as opções de usuário, os eventos a serem processados são conhecidos antecipadamente. Por outro lado, os sistemas embarcados de tempo real devem ser capazes de responder a eventos inesperados a qualquer momento. Isso gera um projeto de sistemas de tempo real baseado em concorrência, com vários processos executando em paralelo.
- Pode haver limitações físicas que afetem o projeto de um sistema. Exemplos desse tipo incluem limitações sobre a energia disponível para o sistema e o espaço físico ocupado pelo *hardware*. Essas limitações podem gerar requisitos para o *software* embarcado, como a necessidade de conservar a energia e, assim, prolongar a vida útil da bateria. Limitações de tamanho e peso podem significar que o *software* tem de assumir algumas funções de *hardware* por causa da necessidade de limitar o número de chips usados no sistema.
- A interação direta com o *hardware* pode ser necessária. Em sistemas interativos e sistemas de informações, existe uma camada de *software* (os *drivers* de dispositivo) que ‘esconde’ o *hardware* do sistema operacional. Isso é possível porque você só pode se conectar a alguns poucos tipos de dispositivos para esses sistemas, como teclados, mouses, monitores etc.. Por outro lado, os sistemas embarcado podem ter de interagir com uma ampla gama de dispositivos de *hardware* que não possuem *drivers* separados de dispositivos.
- Questões de segurança e confiabilidade podem dominar o projeto de sistema. Muitos sistemas embarcados controlam dispositivos, cuja falha pode ter custos humanos ou econômicos elevados. Nesse caso, a confiança é crítica, e o projeto de sistema precisa garantir um comportamento crítico de segurança em todos os momentos. Isso costuma incentivar uma abordagem conservadora para o projeto, em que são usadas técnicas experimentadas e testadas em vez das mais recentes que podem introduzir novos modos de falhas.

Referente ao projeto de sistemas embarcados, o projetista deve considerar detalhes sobre o projeto, e o desempenho do *hardware* do sistema. A maioria desse processo de *software* utiliza o método *top down*, desenvolvendo um modelo abstrato decomposto e que depois será desenvolvido em estágios.

As decisões devem ser tomadas no início do processo, referente ao *hardware*, *software* de suporte e sobre o *timing* do sistema. Essas condições tornam-se fatores limitantes que impactam diretamente no gerenciamento da bateria e energia do sistema.

O modelo embarcado de tempo real é baseado em estímulo-resposta, pois reage a eventos do seu ambiente (figura 9). SOMMERVILLE (2012) diferencia: “*Um estímulo como um evento que ocorre no ambiente do sistema de software que faz com que o sistema reaja de alguma forma. Uma resposta é um sinal ou mensagem enviada pelo software para seu ambiente.*”

Basicamente, os estímulos podem ser: periódicos (ocorrem de forma previsível em intervalos programados) ou aperiódicos (ocorrem de modo irregular e são imprevisíveis).

Uma vez que não existe um padrão de processo para o projeto de sistemas embarcados, SOMMERVILLE (2012) sugere a inclusão das seguintes atividades:

- Seleção de plataforma.
- Identificação de estímulos/resposta.
- Análise de timing.
- Projeto de processo.
- Projeto de algoritmo.
- Projeto de dados.
- Programação de processo.

Dependendo do tipo de sistema a ser desenvolvido a ordem dessas atividades pode ser alterada. Diante disso, antes do início do projeto deve-se escolher o *hardware* e o sistema operacional, levando-se em conta as restrições impostas pelos recursos do *hardware*.

Para SOMMERVILLE (2012) há três padrões de arquitetura utilizados:

- Observar e reagir.
- Controle de ambiente.
- *Pipeline* de processo.

Quanto a programação do sistema em tempo real, este precisa incluir o acesso aos recursos do *hardware* do sistema e prever o *timing* de determinadas operações.

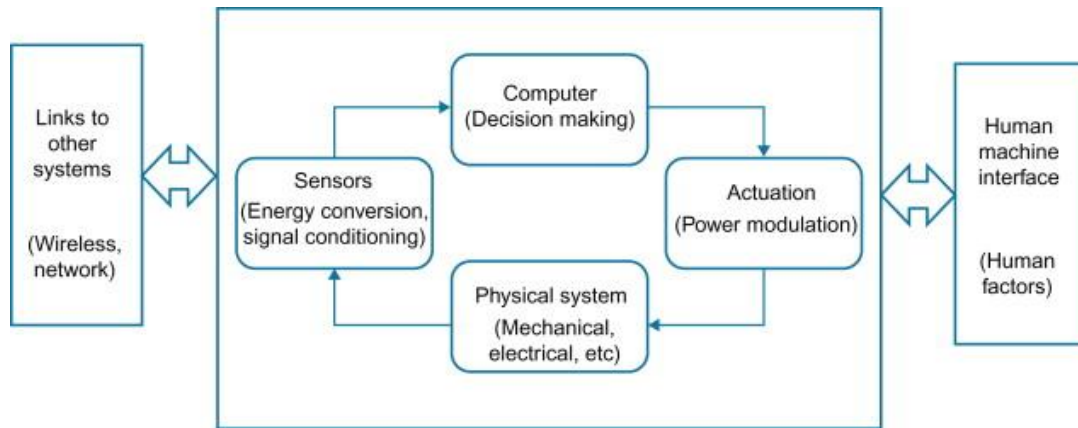


Figura 9. Arquitetura de um sistema embarcado, de tempo real, segundo OSHANA (2013).

## 2.4 Ciclo de vida do *Software*

Pode ser definido como um processo, que vai desde a concepção de ideias até a descontinuidade do produto de *software*.

De acordo com MACHADO (2002), “*Durante o ciclo de vida de software são executados vários processos, sendo que cada um contribui para atingir os objetivos de um estágio do ciclo*”.

Segundo NOGUEIRA (2009), os modelos de ciclo de vida são categorizados pela definição de uma sequência de atividades pré-definidas, que tem como objetivo o desenvolvimento ou a manutenção de *software*. Alguns modelos mais utilizados são:

- Modelo cascata;
- Desenvolvimento evolucionário;
- Desenvolvimento formal de sistemas;
- Desenvolvimento orientado a reuso;
- Desenvolvimento incremental e,
- Desenvolvimento espiral.

Para SOMMERVILLE (2003), embora não exista nenhum processo de *software* dito ‘ideal’, existem muitas oportunidades de melhorá-lo em muitas organizações. Os processos podem incluir técnicas desatualizadas ou podem não tirar vantagem das melhores práticas da engenharia de *software*.

Ainda de acordo com SOMMERVILLE (2003), A melhoria dos processos de software pode ser implementada de diferentes maneiras. Pode ocorrer por meio da padronização de processos, pois é a primeira etapa essencial na introdução de novos métodos e novas técnicas de engenharia de software.

Segundo NOGUEIRA (2009), uma taxonomia para o ciclo de vida de *software* é definida pela norma ISO/IEC 12.207 – Processos de ciclo de vida de *software*. Essa norma tem como objetivo definir todos os processos necessários para se atingir qualidade.

## 2.5 Lógica Paraconsistente

### 2.5.1 Breve Histórico

A Lógica Paraconsistente, utilizada pelo *software* embarcado responsável pela auto-orientação do painel solar do carregador, é um assunto relativamente novo. Trata-se de uma lógica que pode servir de base para teorias inconsistentes (i.e. que admite contradições) sem o perigo de trivialização.

Historicamente, os precursores da Lógica Paraconsistente foram o lógico polonês Łukasiewicz e o filósofo russo N.A. Vasil'év, que por volta de 1910, de maneira independente, sugeriram a possibilidade de uma lógica que restringiria, por exemplo, o princípio da contradição. Vasil'év chegou a articular determinada lógica, que ele batizou de imaginária, mas nenhum deles tinha, na época, uma visão ampla da Lógica Não-Clássica tal como hoje é encarada. (ARRUDA et al. 1977)

Os primeiros sistemas foram formalizados nas décadas 1940 e 1950. Em 1948, S. Jaskowski, então discípulo de Łukasiewicz, apresentou a chamada Lógica Discursiva, porém em nível proposicional.

Trabalhos importantes foram concebidos por Da Costa em 1954 e publicados a partir de 1963, por meio de publicações na revista francesa C.R. Acad. Sc. De Paris e da monografia "Sistemas Formais Inconsistentes", apresentada como Tese de Professor Catedrático de Análise Matemática e Análise Superior, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade Federal do Paraná.

Tais sistemas (denominados 'sistemas Cn') foram desenvolvidos em um aspecto puramente sintático, carecendo completamente de uma semântica.

A algebrização desses sistemas teve suas primeiras versões em 1965, com o conceito de álgebra de Curry (veja Barros, Da Costa & Abe, 1995) e as primeiras propostas de uma semântica para eles surgiram em 1976, com a chamada Teoria das Valorações, e com ela, os cálculos Cn se mostraram corretos e completos.

O termo ‘Paraconsistente’ foi cunhado pelo filósofo peruano Miró Quesada, que em uma tradução literal, significa “ao lado da consistência”<sup>3</sup>

## **2.5.2 Lógica Paraconsistente Anotada Evidencial $E\tau$**

### **2.5.2.1 Visão Histórica**

Como o instrumental desenvolvido neste trabalho está baseado na Lógica Paraconsistente Anotada Evidencial  $E\tau$ , ou Lógica  $E\tau$ , achou-se conveniente fazer um breve resumo de seus principais conceitos, bem como uma digressão histórica.

A primeira noção de Paraconsistência surgiu no início dos anos 1990 na área da programação lógica, por meio dos trabalhos de Subrahmaniam (1987), seguido por outros.

Levando-se em conta às aplicações obtidas, tornou-se conveniente um estudo dos fundamentos da lógica subjacente às linguagens de programação investigadas. Foi verificado que se tratava de uma lógica paraconsistente e, em alguns casos, também continha características da lógica paracompleta e não-alética.

Os estudos dos fundamentos da Lógica Anotada foram feitos por vários autores, como Da Costa, Abe e Akama, dentre outros. Em ABE (1992), foi estabelecido um estudo sistemático das Lógicas Anotadas, e o autor mostrou que a maioria dos resultados em Teoria de Modelos clássica possui uma versão para as Lógicas Anotadas, e mostrou uma versão de teoria dos conjuntos anotada. Abe também introduziu os primeiros sistemas modais anotados bem como versões algébricas via álgebras de Curry.

Outras aplicações dos Sistemas Anotados foram desenvolvidas por Abe e alguns de seus discípulos diretos a partir de 1993, independentemente dos trabalhos de Subrahmaniam, e em 1995 foi implementada a primeira linguagem de programação paraconsistente, a Paralog (Da Costa et Al, 1995).

---

<sup>3</sup> “No congresso Latino Americano de Lógica realizado em Santiago, Chile, o filósofo peruano Francisco Miro Quesada propôs o termo “paraconsistente” para os sistemas em questão. O termo ‘paraconsistente’ significa literalmente ‘ao lado da consistência’. Desse modo, o termo ‘lógica paraconsistente’ teve divulgação imediata no meio científico e foi um evento importantíssimo para a propagação do tema.” (Abe, et al. 2011 p. 8)



As ideias então desenvolvidas puderam ser aplicadas posteriormente à construção de um protótipo e especificação de uma arquitetura inteiramente baseada na Lógica Paraconsistente Anotada, integrando vários tipos de sistemas computacionais (PRADO, 1996).

A aplicação da Lógica  $E\tau$  em circuitos digitais foi feita por Da Silva Filho, outro discípulo de Abe, tendo implementado portas lógicas Complement, And e Or (Da Silva Filho, 1999), que permitem a presença de sinais conflitantes em sua estrutura, de modo não trivial.

Dentro do campo relativo ao *hardware* foi desenvolvido o Analisador Lógico, ou Para-analisador, que permite tratar conceitos de incerteza, inconsistência e paracompleteza. A implementação em circuito eletrônico recebeu o nome de “Paracontrol”.

Com a cristalização de todos os conceitos discutidos, foi possível a construção do primeiro robô com *hardware* paraconsistente (PRADO, 1996), denominado Sofya. Seguiram-se a ele a robô Emmy (Abe e Da Silva Filho, 2003) e sua segunda versão, Emmy II, foi estudada por (TORRES, 2004). Outros protótipos foram conduzidos abarcando vários conceitos teóricos de Lógica  $E\tau$ , bem como diversas outras aplicações de *software* baseados nos mesmos.

### 2.5.2.2 A Linguagem da Lógica $E\tau$

A Lógica  $E\tau$  possui uma linguagem  $E\tau$ , com proposições atômicas  $p_{(\mu, \lambda)}$ , onde  $p$  é uma proposição e  $\mu, \lambda \in [0, 1]$  é um intervalo real unitário fechado.

Intuitivamente,  $\mu$  indica o grau de evidência favorável de  $p$ , e  $\lambda$ , o grau de evidência contrária de  $p$ . As leituras dos valores  $\mu, \lambda$  dependem das aplicações consideradas, podendo sofrer mudanças. Assim,  $\mu$  pode ser o grau de crença favorável e  $\lambda$  poder ser o grau de crença contrária.

Do mesmo modo,  $\mu$  pode indicar a probabilidade expressa de  $p$  ocorrer e  $\lambda$  a improbabilidade expressa de  $p$  ocorrer. As proposições atômicas  $p_{(\mu, \lambda)}$  da Lógica  $E\tau$  podem ser intuitivamente lidas como: a evidência favorável de  $p$  é  $\mu$  e a evidência contrária é  $\lambda$ , ou o grau de evidência favorável de  $p$  é  $\mu$  e o grau de evidência contrária de  $p$  é  $\lambda$ .

### 2.5.2.3 O conectivo da negação

Se  $p$  denotar uma proposição com valores de 80% de evidência favorável e 40% de evidência contrária, haverá em sua negação valores de 40% de evidência favorável e 80% de evidência contrária.

Em síntese, a evidência favorável de  $p_{(0.8, 0.4)}$  passa a ser a evidência contrária de  $\neg p_{(0.8, 0.4)}$ , enquanto a evidência contrária de  $p_{(0.8, 0.4)}$  passa a ser a evidência favorável de  $\neg p_{(0.8, 0.4)}$ . Expressando em termos técnicos, tem-se que:  $\neg p_{(0.8, 0.4)} \leftrightarrow p_{\sim(0.8, 0.4)} \leftrightarrow p_{(0.4, 0.8)}$ .

Existe um operador natural definido sobre  $\tau$  que desempenha o papel da negação do conectivo da lógica  $E\tau$ :

$$\sim \mid \tau \mid \rightarrow \mid \tau \mid, \sim(\mu, \lambda) = (\lambda, \mu).$$

Isso demonstra uma importante propriedade da Lógica  $E\tau$ : de que se podem considerar equivalentes as proposições  $\neg p_{(\mu, \lambda)}$  e  $p_{(\lambda, \mu)}$ , ou seja, em outra terminologia,  $\neg p_{(\mu, \lambda)} \leftrightarrow p_{\sim(\mu, \lambda)}$ .

No caso de uma negação para valores de evidência favorável e evidência contrárias iguais, como, por exemplo,  $p_{(0.5, 0.5)}$ , há intuitivamente que essa é a própria proposição  $p_{(0.5, 0.5)}$ , ou seja,  $\neg p_{(0.5, 0.5)} \leftrightarrow p_{(0.5, 0.5)}$ , no caso de que  $p_{(0.5, 0.5)}$  seja verdadeira.

Há situação de que  $p_{(0.5, 0.5)}$  é verdadeira e  $\neg p_{(0.5, 0.5)}$  é também verdadeira. Logo, a lógica em questão admite intuitivamente contradições verdadeiras. Algo similar acontece se  $p_{(0.5, 0.5)}$  for falsa. Há  $p_{(0.5, 0.5)}$  falsa e  $\neg p_{(0.5, 0.5)}$  também falsa, assim sendo  $E\tau$  também paracompleta. Logo,  $E\tau$  é não-alética.

O detalhe da negação lógica ser ‘absorvida’ na anotação, permite que a Lógica  $E\tau$  tenha propriedades importantes em implementações físicas, assim como grande aplicabilidade na programação.

#### 2.5.2.4 Os conectivos de Conjunção, Disjunção e Implicação

Dadas às proposições  $p_{(\mu, \lambda)}$  e  $q_{(\theta, \rho)}$  podem-se formar a conjunção, disjunção e a implicação entre elas:

$p_{(\mu, \lambda)} \wedge q_{(\theta, \rho)}$  – leia-se a conjunção de  $p_{(\mu, \lambda)}$  e  $q_{(\theta, \rho)}$

$p_{(\mu, \lambda)} \vee q_{(\theta, \rho)}$  – leia-se a disjunção de  $p_{(\mu, \lambda)}$  e  $q_{(\theta, \rho)}$

$p_{(\mu, \lambda)} \rightarrow q_{(\theta, \rho)}$  – leia-se a implicação de  $q_{(\theta, \rho)}$  por  $p_{(\mu, \lambda)}$

O conectivo da bi-implicação é introduzido do modo habitual:

$p_{(\mu, \lambda)} \leftrightarrow q_{(\theta, \rho)} = p_{(\mu, \lambda)} \rightarrow q_{(\theta, \rho)} \wedge q_{(\theta, \rho)} \rightarrow p_{(\mu, \lambda)}$  – leia-se  $p_{(\mu, \lambda)}$  que equivale a  $q_{(\theta, \rho)}$ .

#### 2.5.2.5 O Reticulado $\tau$

O par  $(\mu, \lambda)$  é denominado constante de anotação, e é um elemento de  $[0, 1] \times [0, 1]$  que algumas vezes pode ser indicado por  $[0, 1]^2$ .

O conjunto pode ser munido de uma relação de ordem definida da seguinte forma:  $(\mu_1, \lambda_1) \leq (\mu_2, \lambda_2) \Leftrightarrow \mu_1 \leq \mu_2 \text{ e } \lambda_1 \leq \lambda_2$ .

Propriedades:

1.  $\forall \mu, \lambda \in \tau, (\mu, \lambda) \leq (\mu, \lambda)$  (reflexividade)
2.  $\forall \mu_1, \lambda_1, \mu_2, \lambda_2 \in \tau, (\mu_1, \lambda_1) \leq (\mu_2, \lambda_2) \text{ e } (\mu_2, \lambda_2) \leq (\mu_1, \lambda_1)$ , implicam  $(\mu_1, \lambda_1) = (\mu_2, \lambda_2)$  (anti-simetria)
3.  $\forall \mu_1, \lambda_1, \mu_2, \lambda_2, \mu_3, \lambda_3 \in \tau, (\mu_1, \lambda_1) \leq (\mu_2, \lambda_2) \text{ e } (\mu_2, \lambda_2) \leq (\mu_3, \lambda_3)$ , implicam  $(\mu_1, \lambda_1) \leq (\mu_3, \lambda_3)$  (transitividade)
4.  $\forall \mu_1, \lambda_1, \mu_2, \lambda_2 \in \tau$ , existe o supremo de  $\{(\mu_1, \lambda_1), (\mu_2, \lambda_2)\}$  indicado por  $(\mu_1, \lambda_1) \vee (\mu_2, \lambda_2) = (\text{Máx}\{\mu_1, \mu_2\}, \text{Mín}\{\lambda_1, \lambda_2\})$
5.  $\forall \mu_1, \lambda_1, \mu_2, \lambda_2 \in \tau$ , existe o ínfimo de  $\{(\mu_1, \lambda_1), (\mu_2, \lambda_2)\}$  indicado por  $(\mu_1, \lambda_1) \wedge (\mu_2, \lambda_2) = (\text{Mín}\{\mu_1, \mu_2\}, \text{Máx}\{\lambda_1, \lambda_2\})$
6.  $\forall \mu, \lambda \in \tau, (0, 1) \leq (\mu, \lambda) \leq (1, 0)$

O quadrado unitário  $[0, 1] \times [0, 1]$  com a relação de ordem constitui um reticulado que é simbolizado por  $\langle \tau, \leq \rangle$  ou simplesmente por  $\tau$ .

### 2.5.2.6 Os graus de certeza e incerteza

No reticulado  $\tau$  (figura 10) , apresentam-se os quatro pontos cardeais através dos quais, bem como do uso das propriedades dos números reais, é possível definir-se uma estrutura matemática que permita a manipulação dos conceitos de incerteza, contradição e de paracompleteza, dentre outros.

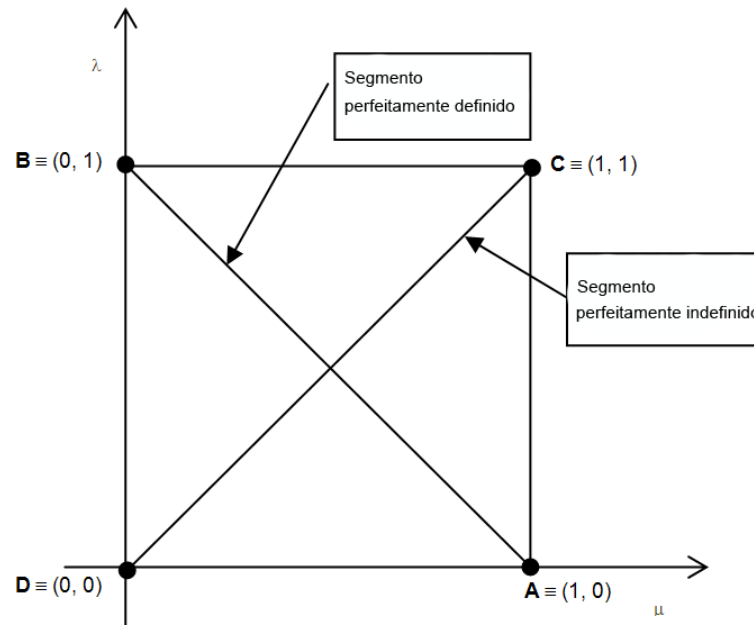


Figura 10: Reticulado  $\tau$ . (ABE, et al. 2012)

Tais pontos cardeais, expressos no reticulado  $\tau$ , expressam-se da mesma forma que na tabela 1, abaixo.

Tabela 1: Pontos Cardeais (ABE, et al. 2012).

Pontos	Estados
$A \equiv (1.0, 0.0)$	Verdadeiro
$B \equiv (0.0, 1.0)$	Falso
$C \equiv (1.0, 1.0)$	Inconsistente
$D \equiv (0.0, 0.0)$	Paracompleto

Esse mecanismo irá englobar intrínsecamente, de algum modo, os estados verdadeiro e falso, já tratados na lógica clássica, com todas as suas consequências. Outros conceitos, intuitivos, serão também incluídos, buscando-se atingir a finalidade definida:

Segmento perfeitamente definido AB:  $\mu + \lambda - 1 = 0; 0 \leq \mu, \lambda \leq 1$

Segmento perfeitamente indefinido DC:  $\mu - \lambda = 0; 0 \leq \mu, \lambda \leq 1$

As constantes de anotação  $(\mu, \lambda)$  que incidem no segmento perfeitamente indefinido, possuem a relação  $\mu - \lambda = 0$ , ou seja  $\mu = \lambda$ .

Assim, a evidência favorável é idêntica à evidência contrária, o que mostra que a proposição  $p_{(\mu, \lambda)}$  expressa uma indefinição. Varia continuamente desde a inconsistência  $(1, 1)$  até o paracompleto  $(0, 0)$ .

As constantes de anotação  $(\mu, \lambda)$  que incidem no segmento perfeitamente definido, possuem a relação  $\mu + \lambda - 1 = 0$ , ou seja,  $\mu = 1 - \lambda$ , ou ainda  $\lambda = 1 - \mu$ .

Assim, no primeiro caso, a evidência favorável é o complemento booleano da evidência contrária e, no segundo, a evidência contrária é o complemento booleano da evidência favorável, o que mostra que as evidências, favorável e contrária apresentam um comportamento como da lógica clássica, variando de forma contínua desde o falso  $(0, 1)$  até o verdadeiro  $(1, 0)$ .

A seguir, introduzem-se as aplicações:

$$G_{ic}: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$$

$$G_{pa}: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [-1, 0]$$

$$G_{ve}: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$$

$$G_{fa}: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [-1, 0]$$

Definidas por:

Grau de Inconsistência:  $G_{ic}(\mu, \lambda) = \mu + \lambda - 1$ , desde que  $\mu + \lambda - 1 \geq 0$

Grau de Paracompleteza:  $G_{pa}(\mu, \lambda) = \mu + \lambda - 1$ , desde que  $\mu + \lambda - 1 \leq 0$

Grau de Veracidade:  $G_{ve}(\mu, \lambda) = \mu - \lambda$ , desde que  $\mu - \lambda \geq 0$

Grau de Falsidade:  $G_{fa}(\mu, \lambda) = \mu - \lambda$ , desde que  $\mu - \lambda \leq 0$

É possível entender-se que o Grau de Veracidade permite uma espécie de medição, de quanto uma anotação  $(\mu, \lambda)$  é distante do segmento perfeitamente definido e de quanto ela se “aproxima” do estado verdade.

Ao mesmo tempo, o Grau de Falsidade indica o quanto uma anotação  $(\mu, \lambda)$  está distante do segmento perfeitamente definido e quanto se aproxima do estado falso.

De modo parecido, o Grau de Inconsistência mede o quanto uma anotação  $(\mu, \lambda)$  se dista do segmento perfeitamente indefinido e o quanto se aproxima do estado inconsistente, ao mesmo tempo em que o Grau de Paracompleteza mostra o quanto uma anotação  $(\mu, \lambda)$  se distancia do segmento perfeitamente indefinido e quão se aproxima do paracompleto.

É chamado Grau de Incerteza  $G_{in}(\mu, \lambda)$  de uma anotação  $(\mu, \lambda)$  qualquer um dos graus de inconsistência ou de paracompleteza.

Chama-se Grau de Certeza  $G_{ce}(\mu, \lambda)$  de uma anotação  $(\mu, \lambda)$  a qualquer um dos graus de verdade ou de falsidade.

#### **2.5.2.7 Os estados de decisão: extremos e não-extremos**

Partindo-se dos conceitos apresentados, torna-se possível trabalhar-se com ‘faixas de verdade’ em contraposição a ‘verdade’ como conceito fechado. Pode-se dizer, então, que a verdade é uma faixa de certeza com respeito a uma determinada proposição. Para que tais faixas sejam determinadas, são introduzidos os conceitos apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Faixas de verdade (ABE, et al. 2012).

Valor	Descrição
$V_{cve} = C_1$	Valor de controle de veracidade; $0 \leq V_{cve} \leq 1$
$V_{cfa} = C_2$	Valor de controle de falsidade; $-1 \leq V_{cfa} \leq 0$
$V_{cic} = C_3$	Valor de controle de inconsistência; $0 \leq V_{cic} \leq 1$
$V_{cpa} = C_4$	Valor de controle de paracompleteza; $-1 \leq V_{cpa} \leq 0$

Esses valores direcionarão quando uma proposição é considerada, por exemplo, “verdadeira” no sentido de se tomar uma decisão positivamente, e assim por diante. As figuras 11 e 12 apresentam a aplicação dos graus de certeza e incerteza com seus respectivos valores de controle limite indicados em seus eixos, e auxiliam a introduzir conceitos suplementares.

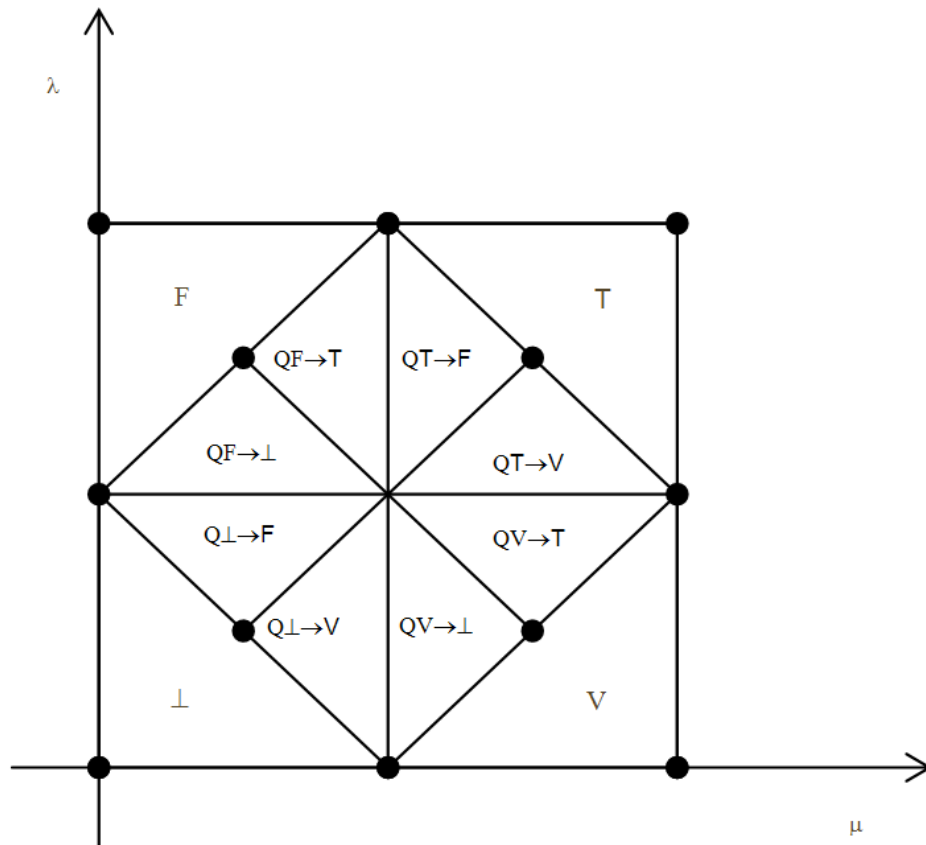


Figura 11: Estados extremos e não-extremos. (ABE, et al. 2012)

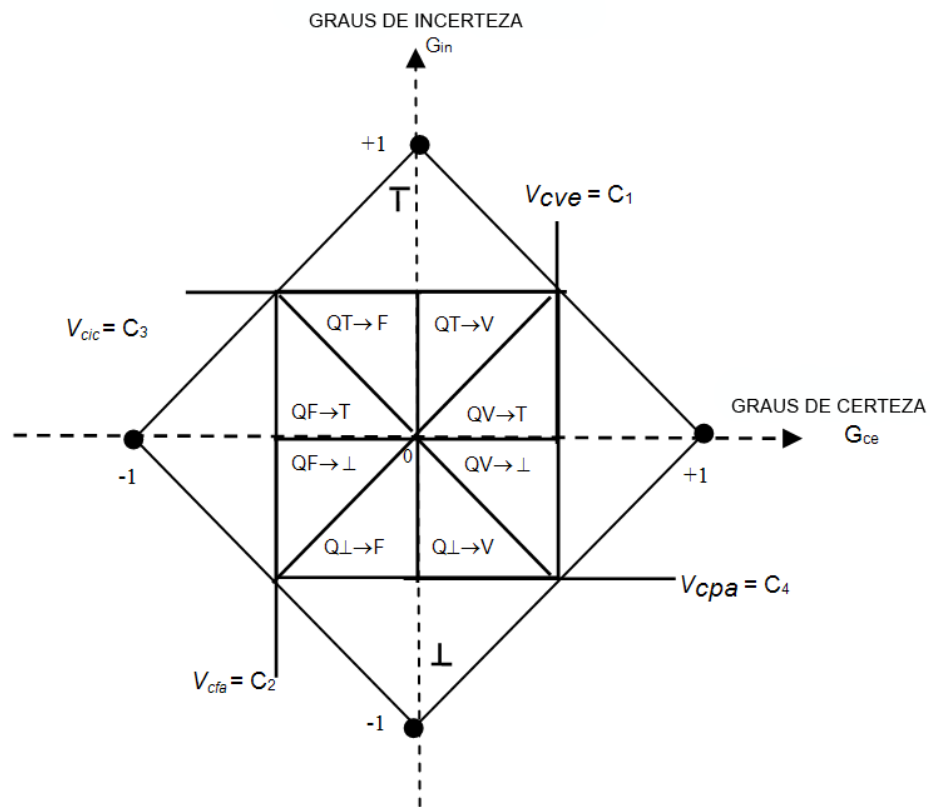


Figura 12: Graus de certeza e incerteza, com valores de controle ajustáveis. (ABE, et al. 2012)

Os estados lógicos resultantes, apresentam-se como na tabela 3 (estados extremos) e na tabela 4 (estados não-extremos), situando-se no reticulado  $\tau$  da forma expressa na figura 13.

Tabela 3: Estados extremos (ABE, et al. 2012)

Estados Extremos	Símbolo
Verdadeiro	V
Falso	F
Inconsistente	T
Paracompleto	$\perp$



Tabela 4: Estados não-extremos (ABE, et al. 2012)

Estados Não-Extremos	Símbolo
Quase-verdadeiro tendendo ao Inconsistente	$QV \rightarrow T$
Quase-verdadeiro tendendo ao Paracompleto	$QV \rightarrow \perp$
Quase-falso tendendo ao Inconsistente	$QF \rightarrow T$
Quase-falso tendendo ao Paracompleto	$QF \rightarrow \perp$
Quase-inconsistente tendendo ao Verdadeiro	$QT \rightarrow V$
Quase-inconsistente tendendo ao Falso	$QT \rightarrow F$
Quase-paracompleto tendendo ao Verdadeiro	$Q\perp \rightarrow V$
Quase-paracompleto tendendo ao Falso	$Q\perp \rightarrow F$

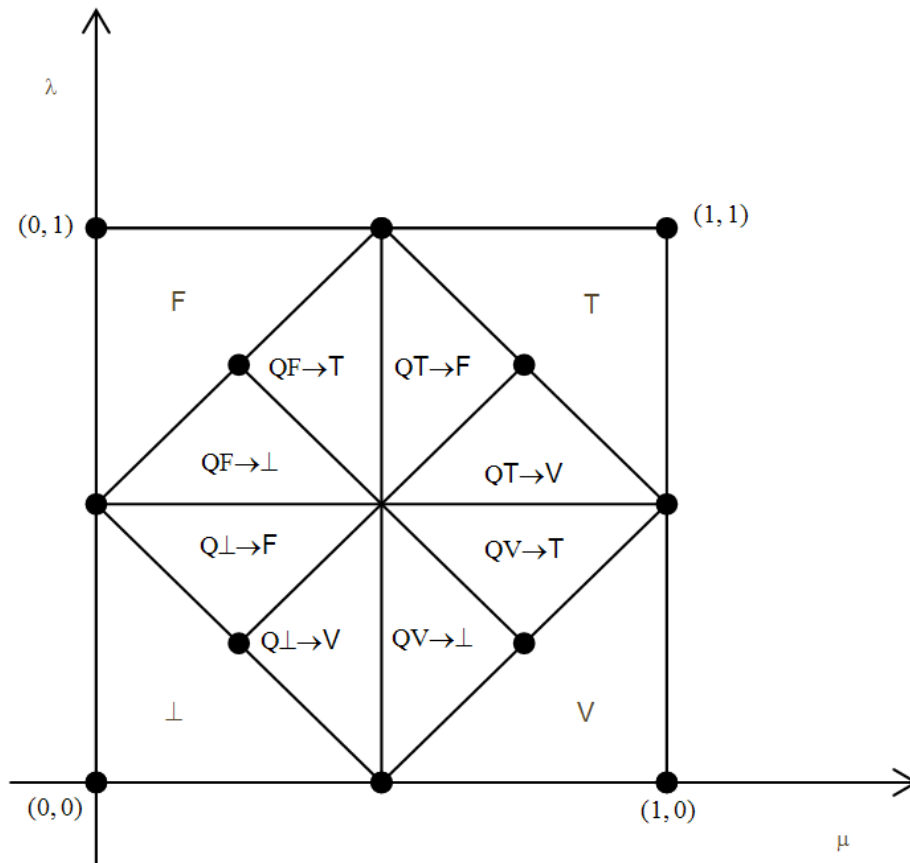


Figura 13: Estados não-extremos. (ABE, et al. 2012)

### 2.5.3 Algoritmo Para-analisador

Ponto importante para o funcionamento do *software* embarcado responsável pela movimentação do painel, o algoritmo Para-analisador, segundo SILVA FILHO (1999): “(...) Traduz a análise paraconsistente através do tratamento dos valores dos graus de evidencia favorável e de evidencia desfavorável, resultando nos valores dos graus de contradição e de certeza”.

O mesmo permite que os valores das leituras de luminosidade colhidos pelo painel solar e traduzidas em  $\mu$  e  $\lambda$ , sejam tratados dentro da abordagem da Lógica Paraconsistente Anotada Evidencial  $E\tau$  (Figura 14).

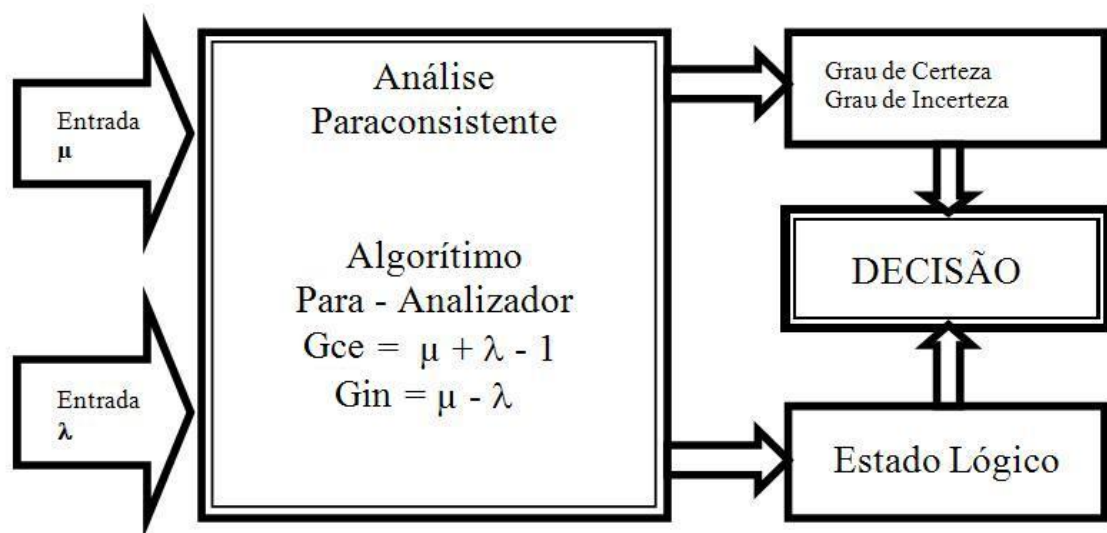


Figura 14. Operação do algoritmo Para-Analisador (SILVA FILHO, 1999)

Um esboço do algoritmo é o apresentado abaixo, e proposto ainda por SILVA FILHO (1999), que descreve que o mesmo permite: “(...) a elaboração de circuitos eletrônicos de controladores que funcionam conforme a lógica Paraconsistente, bem como, simuladores e controladores na forma de programação utilizando qualquer linguagem de computação.”

Sua aplicabilidade se estende desde os *softwares* de sistemas computacionais de Análise Paraconsistente até *hardwares* que estejam aptos a fazer a análise dos sinais de acordo com as equações necessárias.

\*/Definições dos valores\*/

$V_{sc} = C1$       \*/ Definição do valor superior de controle de certeza\*/

$V_{ic} = C2$       \*/ Definição do valor inferior de controle de certeza\*/

$V_{sc} = C3$       \*/ Definição do valor superior de controle de contradição\*/

$V_{ic} = C4$       \*/ Definição do valor inferior de controle de contradição\*/

\*/Variáveis de entrada\*/

$\mu$

$\lambda$

\*/Variáveis de saída\*/

Saída discreta = S1

Saída analógica = S2a

Saída analógica = S2b

\*/Expressões matemáticas \*/

sendo :       $0 \leq m \leq 1$  e  $0 \leq \lambda \leq 1$

$G_{ce} = m + \lambda - 1$

$G_{in} = -\lambda$

\*/determinação dos estados lógicos extremos \*/

Se  $G_{in} \geq C1$       então       $S1 = V$

Se  $G_{in} \leq C2$       então       $S1 = F$

Se  $G_{ce} \geq C3$       então       $S1 = T$

Se  $G_{ce} \leq C4$       então       $S1 = \perp$

\*/determinação dos estados lógicos não-extremos\*/

Para  $0 \leq G_c < C1$       e       $0 \leq G_{ct} < C3$

se  $G_{in} \geq G_{ce}$       então       $S1 = QV \rightarrow T$

se  $G_{in} < G_{ce}$       então       $S1 = QT \rightarrow V$

Para  $0 \leq G_c < C1$       e       $C4 < G_{ct} \leq 0$

se  $G_{in} \geq |G_{ce}|$       então       $S1 = QV \rightarrow \perp$

se  $G_{in} < |G_{ce}|$       então       $S1 = Q\perp \rightarrow V$

Para  $C2 < G_{in} \leq 0$       e       $C4 < G_{ce} \leq 0$

```

    se  $|G_{in}| \geq |G_{ce}|$  então  $S1 = QF \rightarrow \perp$ 

    se  $|G_{in}| < |G_{ce}|$  então  $S1 = Q\perp \rightarrow F$ 

Para  $C2 < G_{in} \leq 0$  e  $0 \leq G_{ce} < C3$ 

    se  $|G_{in}| \geq |G_{ce}|$  então  $S1 = QF \rightarrow T$ 

    se  $|G_{in}| < |G_{ce}|$  então  $S1 = QT \rightarrow F$ 

 $G_{ce} = S2a$ 

 $G_{in} = S2b$ 

*/ FIM*/

```

Algoritmo para-analisador, de acordo com SILVA FILHO (1999).

## 2.6 Estado da Arte

MOUSAZADEH et al. (2008) estudaram diversos tipos de sistemas de “*solar trackers*”, como forma de otimizar o funcionamento de painéis fotovoltaicos, frente às variações de insolação que ocorrem durante o dia. Também abordaram a questão do ganho de energia provido por tais sistemas, assim como a viabilidade do seu uso em sistemas com painéis fotovoltaicos de pequenas dimensões.

Os autores ISHAQUE e SALAM (2012) fizeram um aprofundado estudo da arte das principais técnicas empregadas em sistemas *Maximum Power Point Tracker* (MPPT), como perturbação e observação, condutância incremental e “*hill climbing*”, vislumbrando também suas adaptações e variantes. Diversos sistemas para MPPT baseados em *software* também foram analisados, como controle por lógica *Fuzzy*, Redes Neurais Artificiais e Algoritmos Evolucionários, tratando de situações de insolação total e parcial sobre as células fotovoltaicas.

MELLIT e KALOGIROU (2007) conduziram uma completa pesquisa sobre a aplicação da Inteligência Artificial em sistemas fotovoltaicos, por meio da previsão e geração de modelos meteorológicos, dimensão e modelagem de sistemas fotovoltaicos e simulação e controle dos mesmos, vislumbrando aplicações envolvendo lógica *fuzzy*, redes neurais e *neuro-fuzzy* em diversas plataformas, como *Very High Speed Integrated Circuits* (VDHL), *Field – Programmable Gate Array* (FPGA) e *Digital Signal Processing* (DSP).

SANTOS et al. (2005) propuseram um método para a implementação de um MPPT para sistemas fotovoltaicos com um conversor dc/dc operando em modo de condução contínua, em que o ponto de máximo rendimento é obtido baseado no método de perturbação e observação, com um cálculo periódico da potência resultante de saída do painel.

O problema da eficiência na utilização em um arranjo de células fotovoltaicas (PVA) na alimentação de cargas lineares e não-lineares foi abordado por ALTAS e SCHARAF (2006), por meio de um sistema de busca dinâmica, detecção e rastreamento, baseado na lógica Fuzzy.

CLARK et al. (1984) apresentaram um método para prever o desempenho médio e a longo prazo de sistemas fotovoltaicos com baterias de armazenamento, sujeito a qualquer perfil de carga diurno. A fração mensal da média da carga atendida pelo sistema é estimada a partir de parâmetros de matriz e dos dados meteorológicos mensais. O método é baseado em

estatísticas de radiação e usabilidade, e pode explicar a variabilidade da geração de energia, e da a variabilidade na insolação.

PETREUŞ et al. (2011) apresentaram um sistema MPPT baseado em dois *loops* analógicos, um para corrente e outro para tensão estruturados em torno de um *booster* de corrente, e um terceiro *loop* digital, destinado à comutação para o ponto de máximo rendimento. Os *loops* analógicos permitem respostas rápidas para mudanças bruscas na irradiação luminosa, enquanto o *loop* digital incrementa a acurácia do sistema, permitindo a implementação de diversos algoritmos de MPPT, facilitando a integração com de funções adicionais de monitoramento e controle.

Um sistema MPPT também baseado no método de perturbação e observação foi proposto por ENRIQUE et al. (2009), porém utilizando-se de um sistema de controle analógico que representa o algoritmo, com a finalidade de manter-se a simplicidade, confiabilidade e fácil aplicação prática, evitando problemas como falta de precisão e tempo de resposta muito longo.

RUBIO et al. (2006) pesquisaram a questão do rendimento das células fotovoltaicas providas de concentradores, que requerem um crítico posicionamento para um funcionamento adequado, propondo um sistema de posicionamento de grande acurácia e dispensa procedimentos complexos de instalação e alinhamento, consistindo-se de um híbrido entre uma malha aberta, baseada em modelos de movimentação solar, e uma malha fechada, utilizando-se de *feedback* dinâmico. Fatores de economia de energia também foram levados em conta pelos autores, como a pesquisa pelo melhor posicionamento não ser feita com a mesma acurácia todo o tempo, visando assim uma maior economia de energia dispendida pelos motores.

RAI et al. (2010) apresentaram um modelo de simulação de um MPPT baseado nas Redes Neurais Artificiais (RNA), para o controle de um painel solar. O sistema emprega uma unidade de controle otimizado e um controlador RNA, que se encarrega das tensões e correntes correspondentes a uma máxima potência entregue pelo painel fotovoltaico, para temperatura e radiação solar variáveis. Os autores validaram a acurácia do sistema empregando diversos conjuntos de dados para teste.

AMISSAH et al. (2004) conduziram a aplicação de um sistema MPPT apoiado na Lógica *fuzzy*, para aplicação em veículos elétricos solares e baseado em um conversor de alta

eficiência estruturado em torno de um transistor chaveador de potência bipolar de gate isolado (IGBT), sendo sua tensão de referência obtida através de uma rede neural artificial, dotada de um algoritmo momentâneo de gradiente descendente. O algoritmo de busca também é capaz de manipular o ciclo de carga do conversor, permitindo que o painel fotovoltaico mantenha sua tensão igual a do MPPT sob quaisquer condições de insolação, temperatura e carga.

Uma comparação entre dois métodos para MPPT, baseados na Lógica *Fuzzy* e em Redes Neurais Artificiais, respectivamente, foi feita por SALAH e OUALI (2010). Ambos os controladores recebendo radiação solar e temperatura da célula fotovoltaica como entrada, e fornecendo uma estimativa de um ciclo de carga otimizado, correspondente a máxima performance como saída. Os autores concluíram que o sistema baseado na Lógica *Fuzzy* consegue fornecer mais rendimento que o sistema estruturado em torno de redes neurais e mais que qualquer outro expresso na literatura.

ZEGAOUI et al (2011) compararam a eficiência dos algoritmos de perturbação e observação e de condutância incremental por meio de uma simulação de seu uso com um painel fotovoltaico. Concluíram em seu estudo que ambos os sistemas funcionam bem, mas não são totalmente adaptados para trabalharem em condições externas desfavoráveis.

A otimização de um sistema completo com painéis fotovoltaicos, MPPT e motor de corrente contínua para movimentação de uma bomba d'água, foi estudada por GHONEIM (2005) para ser aplicada em uma comunidade remota no Kuwait. O autor desenvolveu um programa de simulação para determinar a performance do sistema completo nas condições da região, e para determinar, com base em um modelo de cinco parâmetros adaptado, a performance de módulos solares de silício amorfo. O tamanho do sistema de painéis solares e orientação dos mesmos pode ser variado para a obtenção de um rendimento otimizado no sistema, que visa permitir o bombeamento de água em tais localidades a um custo mais baixo do que o de outros sistemas baseados em motores a combustão.

SALAS et al. (2004) avaliaram a performance de um algoritmo MPPT derivado do sistema de perturbação e observação, que utiliza um conversor específico e efetua apenas a medição da corrente fornecida pelo painel fotovoltaico (e não tensão e corrente, como normalmente utilizado). Assumindo-se o rendimento do algoritmo como sendo de tempo real e compatível com o de outros sistemas disponíveis, uma melhoria situada entre 2.8% e 18.5% pode ser obtida.

A avaliação de um sistema mecatrônico baseado em energia solar fotovoltaica, foi feita por CHAO et al. (2009), com base em um algoritmo MPPT quadrático, propondo uma solução para aplicações de energia solar do tipo *stand-alone*, por meio de um conversor DC/DC e do algoritmo em si, com seu apropriado *software* e *hardware*. O algoritmo encontra o ponto de máximo rendimento por meio de uma forma polinomial de segunda ordem, de resposta mais rápida que os algoritmos MPPT correntes.

Um sistema de controle “*Solar Tracker*” de instalação simplificada e baixa manutenção foi proposto por TAKI et al. (2011), baseando-se no processamento de imagens das sombras incidentes sobre o painel fotovoltaico, capturadas por uma câmera de vídeo. Os autores mediram a energia coletada resultante, e a compararam com a de um painel fixo, colocado em um ângulo de 33° em direção ao sul, e concluíram que os resultados medidos na superfície móvel foram mais que 33% maiores que na superfície fixa.

CHONG e WONG (2008) propuseram uma fórmula geral para sistemas de monitoramento baseados em eixo, com a finalidade de melhorar a acurácia de painéis solares. Os autores levaram em consideração os dois principais sistemas utilizados, a elevação e azimute e a movimentação inclinada (“*Tilt-roll*”), levando-se em conta de que cada um possuía já sua própria fórmula de posicionamento, e apresentaram uma solução comum para ambos os sistemas, que não só provê uma solução matemática, mas também efetiva na busca por um melhor posicionamento do painel.

HUANG et al. (2011) conduziram um teste de campo a longo prazo, fazendo uma comparação entre um painel fotovoltaico dotado de um sistema “*solar tracker*” de três posições e eixo único, e um segundo painel fixo, ambos alimentando um conjunto de iluminação com LEDs. Observaram um rendimento de energia 35.8% maior do painel orientado em relação ao fixo, e com rendimento também muito próximo ao de um painel semelhante, orientado em dois eixos (Kacira et al. 2003).

Um MPPT destinado a sistemas portáteis fotovoltaicos de baixa potência com cargas resistivas foi proposto por CESARE et al. (2005). Apoiou-se em fatores como custo, tamanho e eficiência, implementando um *loop* de controle para o MPPT e combinando performance e tamanho compacto, tendo demonstrado o funcionamento do sistema através da simulação dos circuitos eletrônicos utilizando uma carga resistiva pura.



BOICO e LEHMAN (2010) estudaram um algoritmo MPPT de múltiplas entradas para aplicações portáteis, com a utilização de apenas um sensor de corrente e apoiado nas operações de perturbação e observação.

BENMESSAOUD et al. (2010) apresentaram um modelo genérico para a operação de painéis solares baseado em equações matemáticas universais, por meio da análise da tensão e corrente de saída, temperatura e potência resultante. O modelo mostrou-se efetivo no tratamento de um modelo simulado de uma célula solar, e por outro lado, a habilidade de modelar de forma eficiente um campo fotovoltaico com poucos erros, permitindo a operação de geradores fotovoltaicos em condições ótimas, permitindo maior aproveitamento da energia.

DORADO et al. (2010) estudaram a otimização na distribuição de “*solar trackers*”, visando uma diminuição das perdas provocadas pela presença de nuvens. Tais dispositivos quando agrupados pelos métodos convencionais, apresentam bom rendimento, que pode ser prejudicado por fatores externos como prédios, construções ou árvores. Os autores propõem como solução um método meta-heurístico baseado em estratégias de evolução, visando calcular a melhor localização para cada dispositivo, considerando as sombras causadas por cada obstáculo. Tais estratégias utilizam as leituras de energia obtidas, combinando a radiação recebida e as sombras incidentes para cada posição solar.

Um sistema de orientação para painel solar de baixo consumo foi proposto por AHMAD et al. (2012), através da discussão da potência gerada e consumida por um sistema de malha aberta baseado em data e hora, com três possíveis condições climáticas: dia limpo e ensolarado, dia nublado e dia chuvoso com nuvens pesadas. O sistema combina um sistema de posicionamento com dois eixos com um controlador lógico programável (CLP), consumindo um total de 5.84% da energia total gerada.

KIM (2006) desenvolveu um MPPT robusto utilizando um controlador de modos por deslizamento, para um sistema fotovoltaico de rede trifásica, composto pelo controlador MPPT e por um controlador de corrente, com a referência da mesma sendo obtida diretamente do painel solar. O sistema pode prevenir picos de corrente e prover um *design* otimizado para os componentes empregados, por meio de uma estrutura simples e robusta, contrapondo-se a variações de parâmetros e imprecisões.

KAUSHIKA et al. (2004) estudaram um modelo de simulação para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos de matrizes interconectadas autônomos, considerando a geração de

energia na matriz e seu armazenamento em um banco de baterias, servindo a uma demanda de energia flutuante. A probabilidade da perda da capacidade de fornecimento de energia foi utilizada para conotar o risco de o sistema não satisfazer a demanda de carga exigida. Foram levados em conta painéis fotovoltaicos fixos e móveis de um único eixo, com módulos de silício cristalino interconectados. Para cada carga, apresentaram um número de painéis fotovoltaicos e baterias necessárias a um nível zero de perdas em uma base diurna, dentro do período de um ano, e os resultados correspondentes aos déficits de energia observados.

A performance de sistemas fotovoltaicos para diferentes características do céu em climas áridos e quentes foi estudada por KOUSSA et al. (2012), que buscaram determinar um melhor arranjo para operação nessas condições. Efetuaram comparações entre painéis móveis e fixos, estes inclinados para uma posição ótima de acordo com a época do ano colhendo dados no intervalo de uma hora, durante trinta e um dias de diversas épocas sazonais. Para um dia de céu claro os sistemas de posicionamento de dois eixos apresentaram maior rendimento, e a duração do dia o único fator que poderia diminuí-lo. Por outro lado, o rendimento relativo a dias de menor intensidade solar depende mais de fatores como a variação da luminosidade de acordo com a época do ano, e em dias nublados, o rendimento de todos os sistemas mostrou-se quase o mesmo.

ABDALLAH e BADRAN (2007) implantaram um sistema com a finalidade de aumentar a eficiência de um painel solar. Através do uso de um sistema de orientação computadorizado para movimentação do painel de acordo com o sol, os autores concluíram que a geração de energia teve um incremento de 22% e a eficiência geral do sistema, foi aumentada em 2%, o que justifica a efetividade do sistema frente a um painel solar fixo.

OZCELIK et al. (2011) apresentaram um sistema de análise e controle de dois eixos para um painel solar, visando maximizar seu uso orientando-o em direção ao sol através de rotação hemisferiodal. O sistema é capaz de seguir a posição do sol, de forma que a irradiação recebida pelo painel é próxima ao total gerado durante o período de um dia, comparada com os resultados simulados.

### 3 SISTEMA DE CONTROLE “PARATRACKER”

São apresentadas aqui, todas as características do sistema de controle paraconsistente do painel solar auto-orientável, denominado “Paratracker”. Através da aplicação da Lógica  $E\tau$ , busca-se uma otimização e refinamento no processo de posicionamento do painel em relação ao sol, por meio da utilização de um número conveniente de estados lógicos de saída, com rotinas definidas especificamente para cada um. O processo de movimentação do painel solar está expresso na figura 15.

Foi escolhido um sistema de tracionamento para o painel baseado em apenas um único eixo, suficiente para proporcionar ganho no rendimento. De acordo com HUANG et al. (2011), o rendimento final de um sistema de eixo único aproxima-se muito do de um sistema de dois eixos, com a vantagem de consumir uma menor parcela da energia gerada. Em adição a isso, o arranjo de eixo único é de maior simplicidade e robustez, além de sua manutenção ser mais simplificada.

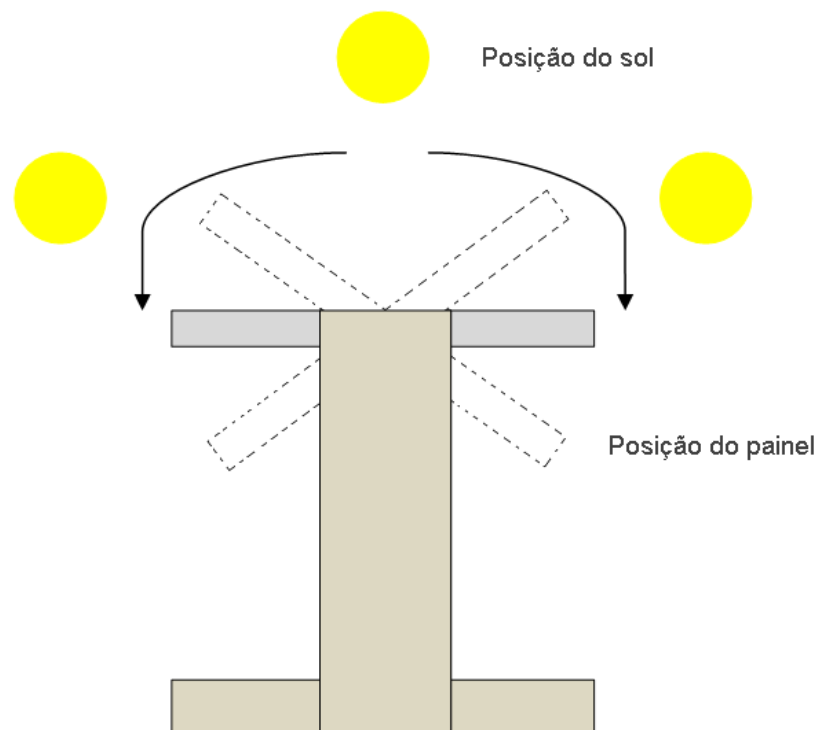


Figura 15: Aspecto da movimentação do painel solar.

### 3.1 Arranjo experimental do protótipo

A montagem física do protótipo constitui-se basicamente de uma base móvel para o painel solar, movimentada por um motor de passo com um sistema de correia de tração, sobre uma base fixa de apoio.

Para efeito de sensoriamento, utilizou-se uma amostra da própria tensão fornecida pelo painel – que varia entre zero e 17V – devidamente atenuada em 90% via divisor resistivo ajustável, para ser aplicada à entrada da placa controladora, que aceita um valor máximo de tensão de 5V – (Figura 16), e submetida a um inversor, já parte do *software* embarcado, para a obtenção dos graus de evidência favorável ( $\mu$ ) e evidência contrária ( $\lambda$ ), obtidos através de leituras feitas com um intervalo de tempo entre si.

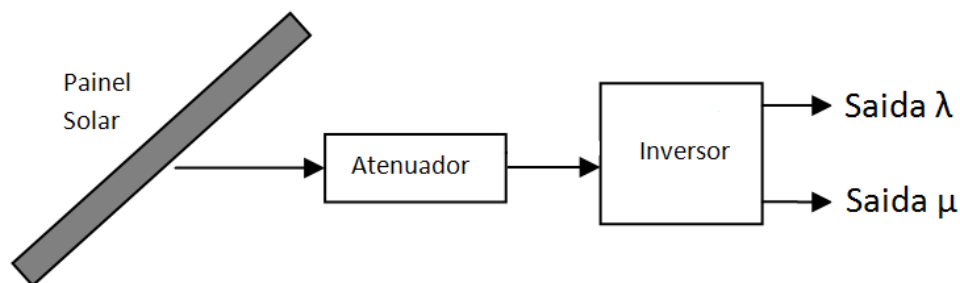


Figura 16: Diagrama do painel solar, atenuador e inversor.

Tal arranjo foi escolhido com base no fato de que sensores autônomos apenas entregariam a placa controladora valores de luminosidade traduzidos em níveis de tensão, que poderiam não corresponder exatamente com o que sucede na superfície do painel solar, problema que se elimina através do aproveitamento direto dos níveis fornecidos pelo mesmo.

A adoção de um maior numero de painéis solares, com o intento de capturar os valores de  $\mu$  e  $\lambda$  simultaneamente, apenas iria onerar um maior custo na construção do protótipo, visto que para correto funcionamento ambos deveriam estar posicionados na mesma direção, submetidos aos mesmos níveis de insolação sempre. Tal sistema seria de aplicação válida, contudo, em sistemas de maior porte com vários painéis fotovoltaicos, distribuídos em uma área proporcionalmente, maior.

Optou-se por utilizar, também, uma amostra apenas da tensão gerada e não da potência total fornecida, uma vez que os valores da corrente consumida, necessários ao cálculo da potência, podem sofrer alterações de acordo com o estado da carga das baterias, levando o parâmetro a apresentar estados lógicos equivocados em sua saída quando as baterias estiverem completamente carregadas, por exemplo.

Além do painel solar em si, o protótipo possui um motor de passo para sua movimentação e seu respectivo *driver*, um conjunto de baterias para sua alimentação e carga, com seus respectivos circuitos controladores de carga e a placa controladora, baseada na Arduino Severino e dotada de um microcontrolador ATMEGA8. Quando em operação sob condições corretas de insolação, o protótipo mantém-se ligado apenas com a energia fornecida pelo painel, ao mesmo tempo em que ambas as baterias são carregadas. O consumo da bateria de *backup* apenas ocorre quando o motor é acionado ou quando o sistema opera em condições de insolação desfavoráveis.

Todo o conjunto fica disposto sobre uma base fixa de madeira, medindo 24 x 47cm (figura 17). Vinte e sete centímetros acima dela, fica a base móvel do painel solar, tal como mostrado na figura 15, que é capaz de movimentar-se num ângulo total de 135°, suficiente para acompanhar a movimentação do sol durante o período de um dia. O aspecto final do protótipo, com seus componentes montados e funcional, é apresentado na figura 18.

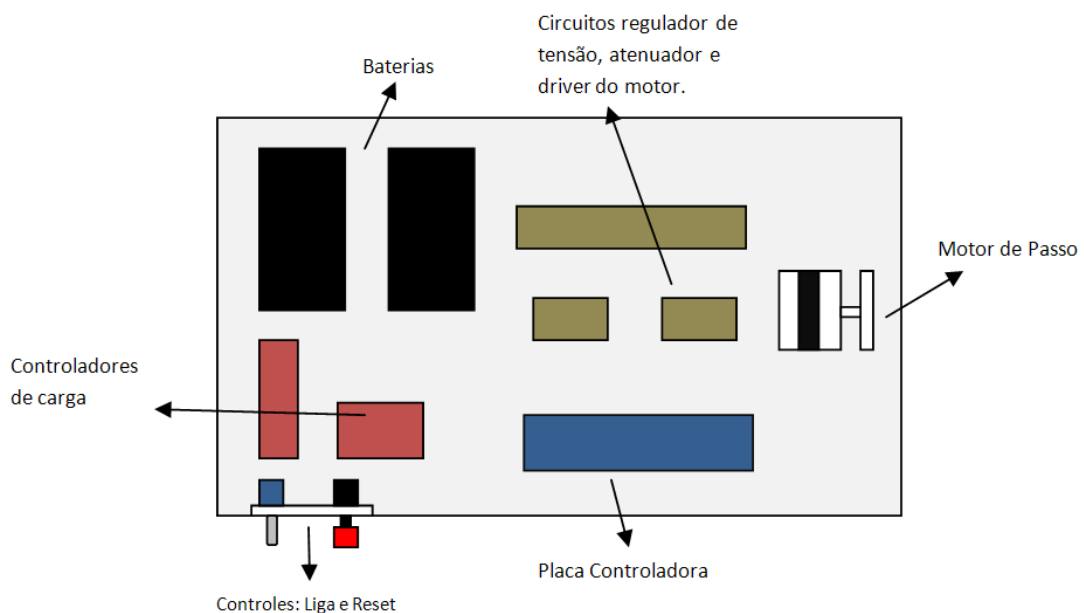


Figura 17: Aspecto da disposição dos componentes sobre a base fixa do protótipo.

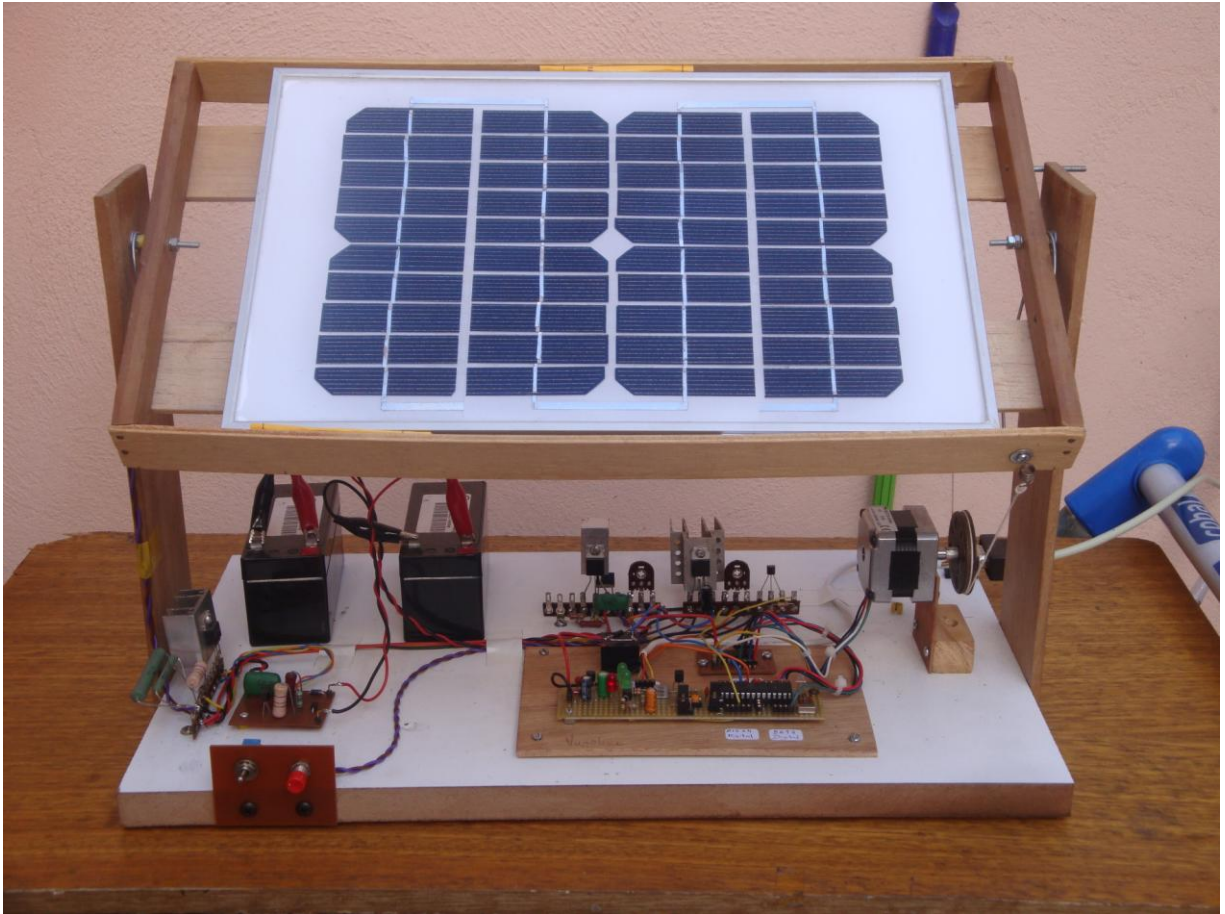


Figura 18: Aspecto final do protótipo montado e operacional.

## 3.2 Hardware Utilizado

### 3.2.1 Placa Controladora

Como o protótipo se encontra estruturado em torno de *Software* Embarcado, grande parte de sua operacionalização será feita em uma placa controladora, plataforma portátil e de pequenas dimensões, específica para trabalhar de forma autônoma.

Foi escolhida para isso a plataforma Arduino, muito conhecida por sua grande versatilidade, confiabilidade e facilidade de programação, feita em linguagem própria de fácil implementação, de código aberto, e específico para uso com *software* embarcado.

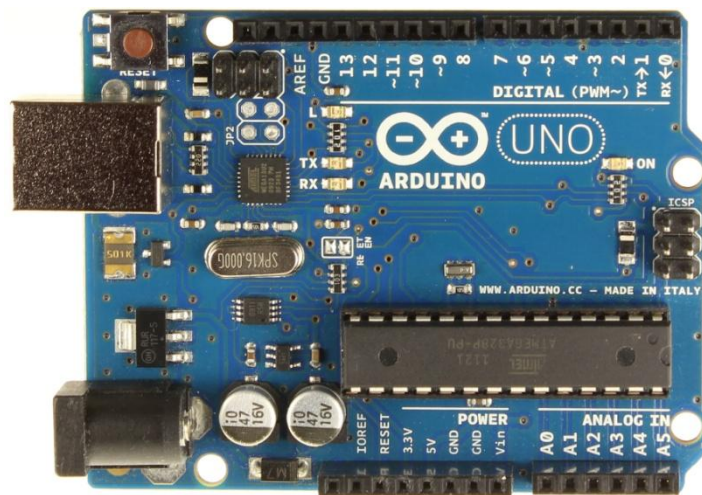


Figura 19. Aspecto de uma placa Arduino “Uno”

Por ser de código aberto, a plataforma permite diversos tipos de adaptações e customizações, adequando-se assim aos mais diversos tipos de necessidades e aplicações.

As placas controladoras Arduino (fig. 19) encontram-se estruturadas, basicamente em torno dos microcontroladores da família ATMEGA, baseados na consagrada arquitetura *Advanced Virtual Risc* (AVR), da conceituada fabricante ATMEL.

Segundo KÜHNEL (1998), “A arquitetura AVR suporta um completo espectro de custos-benefícios, desde simples microcontroladores (...) até dispositivos com alta gama de aplicações (...)”.



A placa controladora é um modelo customizado e construído pelo próprio autor, baseado na versão mais simplificada da Arduino, a “Severino”, específica para ser construída em casa, em placas específicas de face cobreada simples ou em placas-padrão do tipo *Veroboard*.

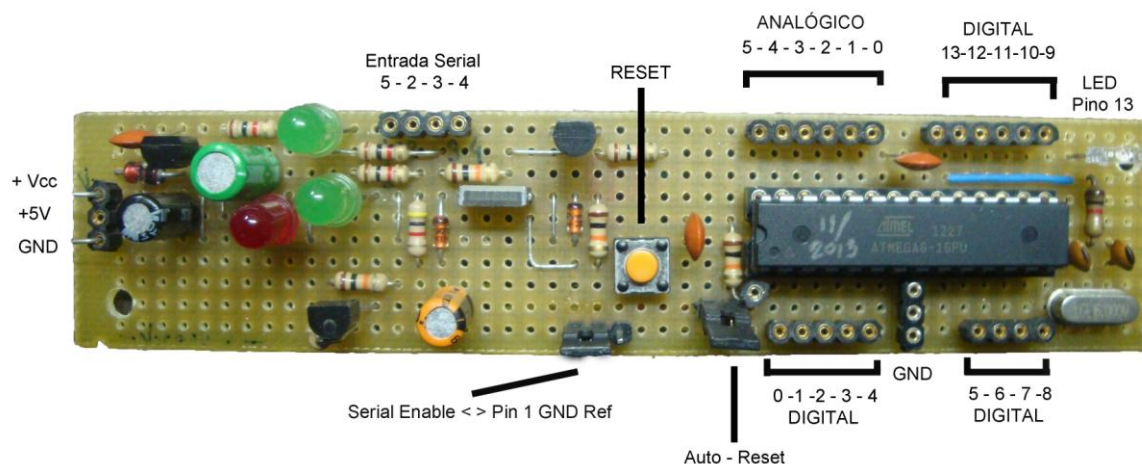


Figura 20. Aspecto da variação da placa controladora “Severino”, montada pelo autor em uma placa padrão Veroboard. Tal implementação específica foi nomeada pelo autor como “Virgulino”.

A placa controladora “Severino” encontra-se estruturada em torno de um microcontrolador AVR ATMEGA8, dispositivo relativamente simples e de baixo custo, contando com memória Flash interna de 8KB, e aceitando até 130 instruções em sua programação – número suficiente para aceitar o *software* embarcado, com margem para possíveis alterações e melhoramentos futuros (figura 20).

O ATMEGA8 também apresenta um baixo consumo de energia. Através da execução de um conjunto de instruções potentes em um único ciclo, o ATMEGA8 alcança aproximadamente 1 milhão de instruções executadas por segundo para cada MHz, permitindo que o projetista do sistema possa otimizar o consumo de potência de acordo com a velocidade de processamento.

Isso torna o uso do presente dispositivo interessante, uma vez que se pretende que a placa controladora gaste o mínimo de energia possível do total fornecido pelo painel solar. O arranjo circuital utilizado pode ser visto na figura 21.



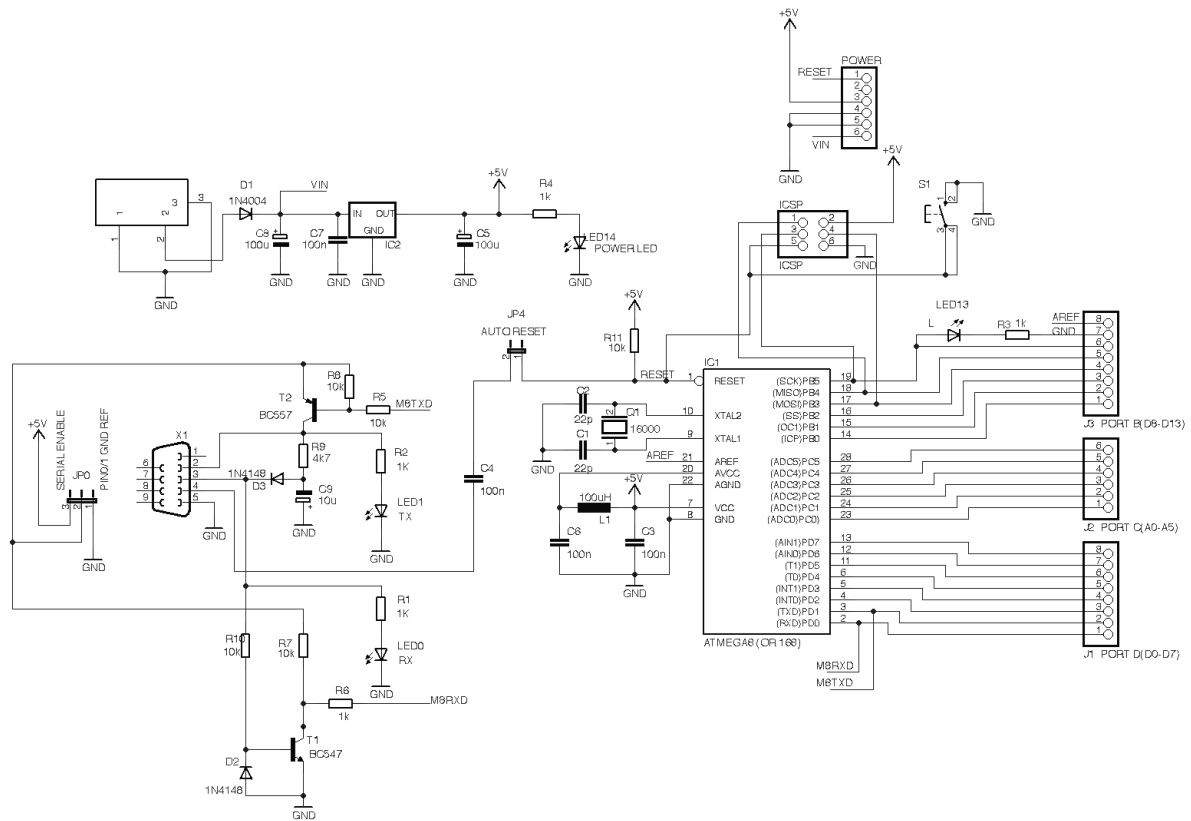


Figura 21: Esquema elétrico da placa controladora “Severino”.

### 3.2.2 Painel Solar

O painel solar constitui-se de um conjunto de células solares – feitas de silício cristalino e capazes de gerar por si só uma pequena tensão e corrente elétrica – interconectadas em uma configuração série/paralelo, com a finalidade de que suas capacidades sejam somadas, obtendo assim correntes e tensões maiores. São montadas em um módulo único, devidamente protegidas contra choques físicos e intempéries, com moldura de alumínio e uma placa de vidro por sobre a área foto-sensível, que confere proteção às células sem prejudicar sua performance.

O modelo escolhido (figura 22) apresenta tensão nominal (sob carga) de 17V, com corrente máxima de 350mA, valores suficientes para manter um conjunto de duas pequenas baterias seladas do tipo chumbo-ácido sob regime de carga lenta. Segundo o fabricante, sua eficiência total (quantidade de luz transformada em eletricidade) é de 11%

O painel solar também irá trabalhar como sensor de luminosidade, fornecendo uma amostra de sua tensão e corrente de saída à placa controladora, já devidamente atenuada e acoplada a ele. Tal arranjo foi escolhido por sua maior praticidade em relação a um sensor/conjunto de sensores separados, além de fornecer ao *software* os exatos valores de tensão correspondentes

com a luminosidade incidente sobre o mesmo, como executado por SALAS et al. (2004), BOICO e LEHMAN (2010), BENMESSAOUD et al. (2010), dentre outros.

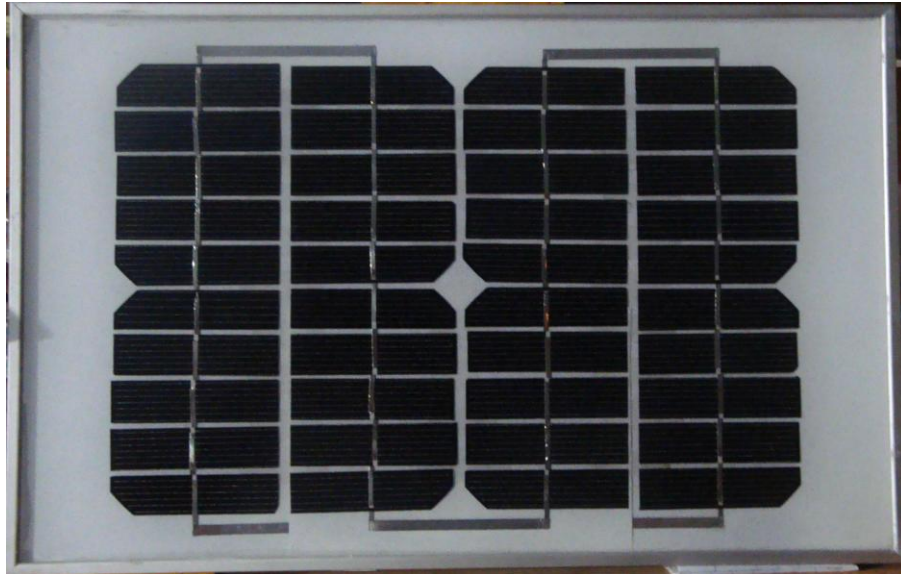


Figura 22. Aspecto do painel solar utilizado no protótipo.

### 3.2.3 Motor de Passo

Tem papel de suma importância no processo de movimentação do painel, e para isso, necessita de uma capacidade de torque suficiente para suportar o seu peso, que é algo elevado, cerca de 0,9Kg.

De acordo com o BSI GROUP (1982), o motor de passo pode ser definido como um motor DC cujo rotor se movimenta em discretos incrementos angulares quando seu enrolamento estator é energizado de uma forma programada. A rotação se dá devido à interação magnética entre os polos do rotor e os polos do estator, energizados sequencialmente.

Ao mesmo tempo, ATHANI (1997), apresenta o motor de passo sob um ponto de vista mais atual, representando um atuador digital cuja entrada se dá na forma de uma energização programada de seu estator, e cuja saída é na forma de uma rotação angular discreta. Dessa forma, o mesmo é adequado como atuador em sistemas controlados por computador, sistemas de controle digital, dentre outros.

O motor de passo adotado para a construção do protótipo (figura 23) é uma unidade compacta e de baixo custo, com torque máximo de 1,5Kg, estando, apto a manejar a carga imposta pelo peso do painel.

Fica integrado ao suporte do painel solar através de uma polia e um cordão resistente, com um sistema de molas para estabilizar sua movimentação.

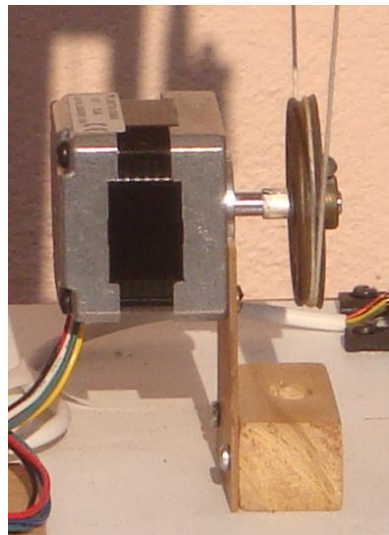


Figura 23. Aspecto do motor de passo, adotado no protótipo.

Tratando-se de um dispositivo que consome uma considerável quantidade de corrente, o uso de um circuito *driver* mostra-se necessário para o acionamento do motor de passo, com a finalidade de prover correto isolamento entre o mesmo e a placa controladora.

Como alternativa simples e de baixo custo para isso, foi escolhido um arranjo estruturado em torno do circuito integrado ULN2003A (figura 24), que constitui de um conjunto de *drivers* especialmente agrupados e dimensionados para aplicações com motores de passo. Sua pequena tamanho e baixa complexidade do circuito permite que todo o conjunto *driver* esteja acoplado externamente ao conjunto da placa controladora já construída.

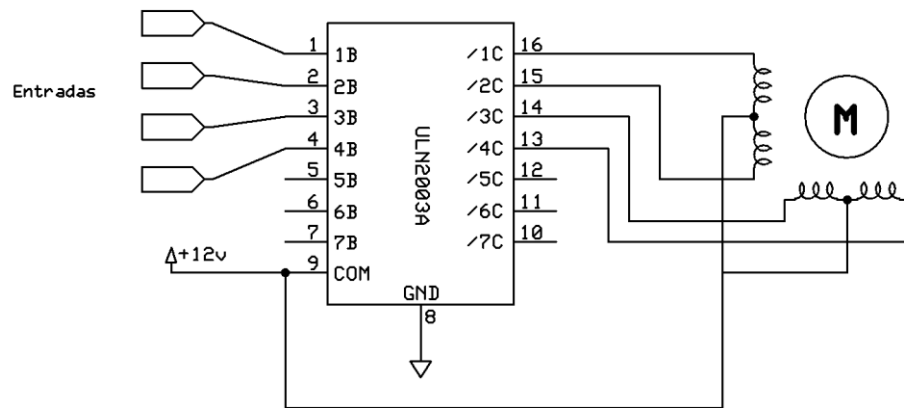


Figura 24. Circuito para acionamento do motor de passo, baseado no integrado específico ULN2003A.

### 3.2.4 Baterias e Controladores de Carga

Como destinação para a energia gerada pelo protótipo, além de fonte de energia para o seu funcionamento, foram escolhidas duas baterias seladas do tipo chumbo-ácido, cada uma capaz de fornecer 12V sob 1,3Ah de corrente máxima, uma para servir de *backup*, mantendo a placa controladora e motor de passo funcionando em *standby* e no caso de algum problema com o painel solar, e outra em regime de carga cíclica, sendo utilizada a alimentação de diversos dispositivos durante a noite.

O circuito controlador de carga cíclica, incumbido de gerenciar o fornecimento de energia para as baterias, é composto por um regulador de corrente e um monitor de tensão estruturados em torno de um circuito integrado LM317 e de um transistor BC547, que desliga o fornecimento de energia para a mesma quando se encontra completamente carregada, e pode ser observado na figura 25, juntamente com um segundo LM317 montado em uma estrutura similar, através do qual é fornecida uma carga contínua para a bateria de *backup* e a alimentação para o restante do circuito, devidamente estabilizada em 12 Volts por um circuito integrado KA7812.

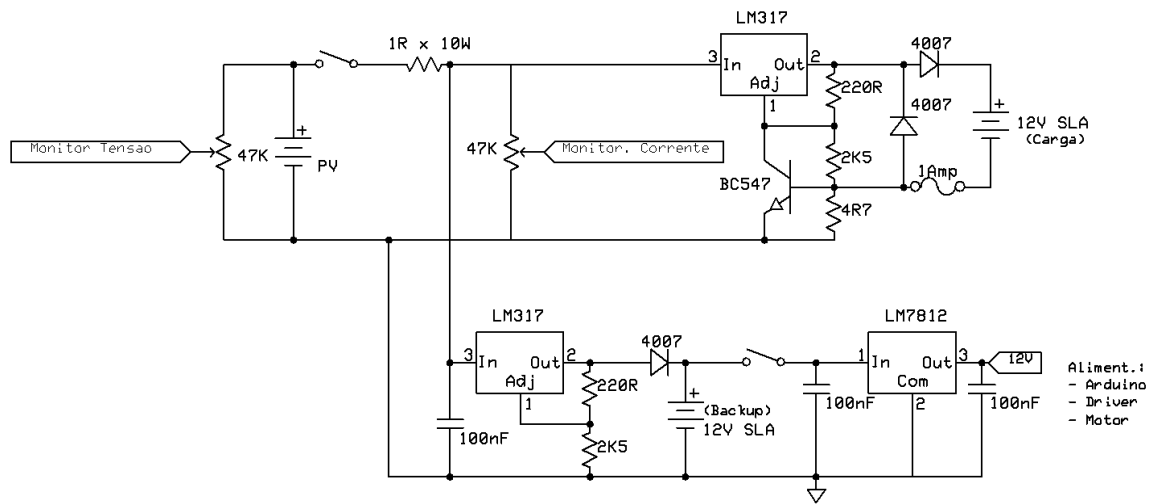


Figura 25: Esquema elétrico do controlador de carga e circuito de alimentação.

### 3.3 Software de Controle

#### 3.3.1 Introdução

O *Software* Embarcado responsável pelo controle do sistema será desenvolvido com base nas etapas do ciclo de desenvolvimento em espiral (figura 26), contemplando as etapas de:

1. Avaliar;
2. Identificar;
3. Projetar e,
4. Construir.

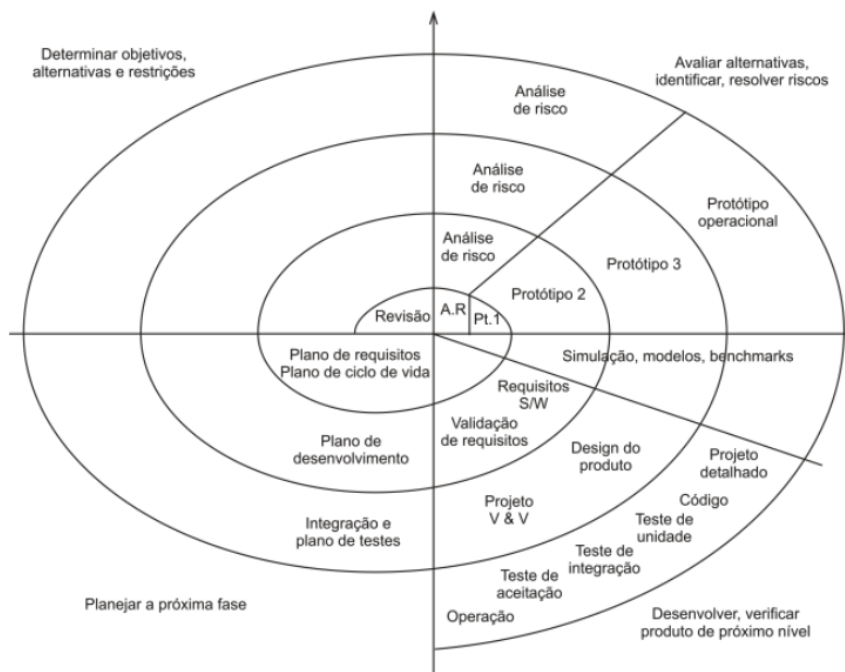


Figura 26: Espiral de Boehm (BOEHM, 1988).

Para a primeira etapa, foram levantadas diversas informações na parte da pesquisa bibliográfica, com o intuito de reunir conhecimento necessário para definir o tipo de tratamento dado aos sinais provenientes do painel solar, o comportamento do sistema em relação a eles, e o conjunto de ações a serem executadas pelo conjunto.

Seguidamente a ela, foi executada uma primeira análise dos riscos envolvidos no projeto através da ferramenta proposta em NOGUEIRA (2009) (figura 27), e uma primeira projeção do protótipo.

**Lista de Riscos**

**Lista de Riscos Analisados e Priorizados**

Código	Descrição	Peso
15	Tempo de desenvolvimento do projeto mal estimado	0,8
8	Falta de adoção de Metodologia de Gestão de Projetos	0,6
16	Custos do desenvolvimento do projeto mal estimados	0,6
26	Omissão de informações importantes durante o projeto	0,6
22	Não utilização de Métricas no projeto	0,4
36	Contrato de prestação de serviços falho ou incompleto	0,4
34	Insatisfação do cliente para com o software desenvolvido	0,4
3	Falta de motivação da equipe	0,4
11	Não Utilização de Ferramentas para Gestão de Projetos	0,4
9	Não Utilização de Ferramentas de Controle de Requisitos	0,4
35	Quantidade de pessoal inadequada para o porte do projeto	0,4
29	Documentação do projeto ausente ou incompleta	0,4
13	Mudanças contínuas dos Requisitos	0,4
12	Requisitos mal Definidos, incompletos ou mal Entendidos	0,4
10	Não Utilização de Ferramentas de Controle de Configurações	0,4
25	Ausência de plano de testes no projeto	0,2
21	Mudanças contínuas dos objetivos e escopo do projeto	0,2


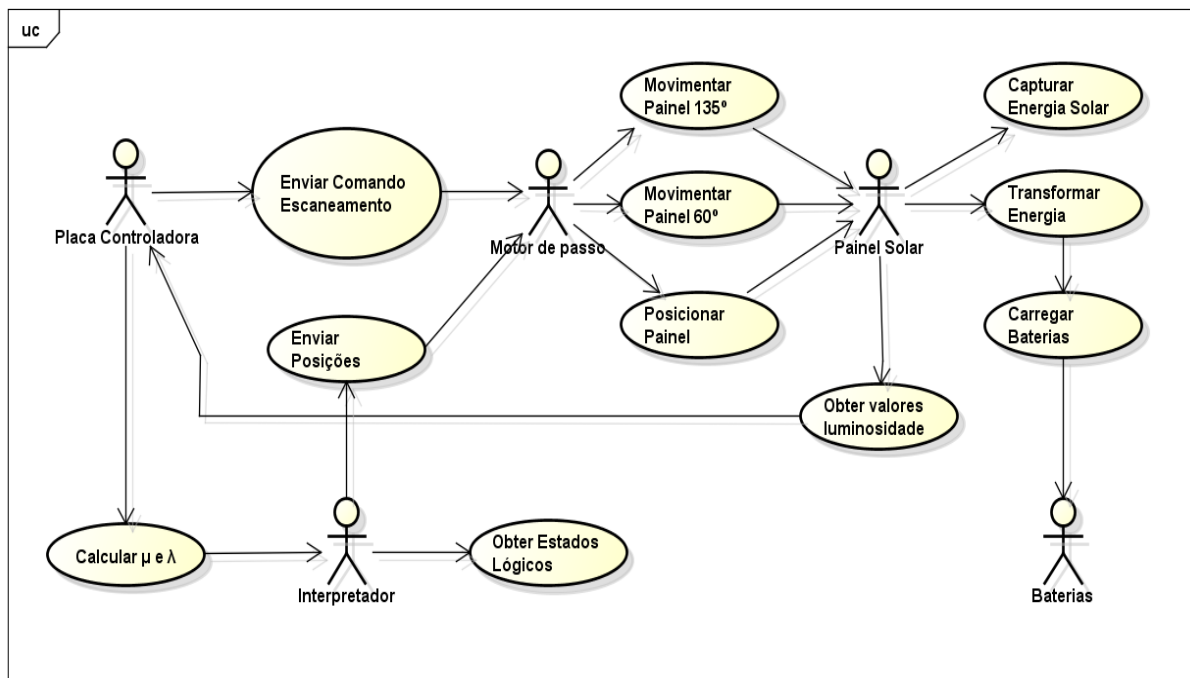
Quantidade de Riscos Analisados: **36**    Quantidade de Riscos Validados: **17**     **Fechar**

Figura 27. Análise dos riscos feitas pela ferramenta proposta em NOGUEIRA (2009).

Seguidamente, foi feita a modelagem dos requisitos necessários ao projeto, feita através dos diagramas da *Unified Modelling Language* (UML).

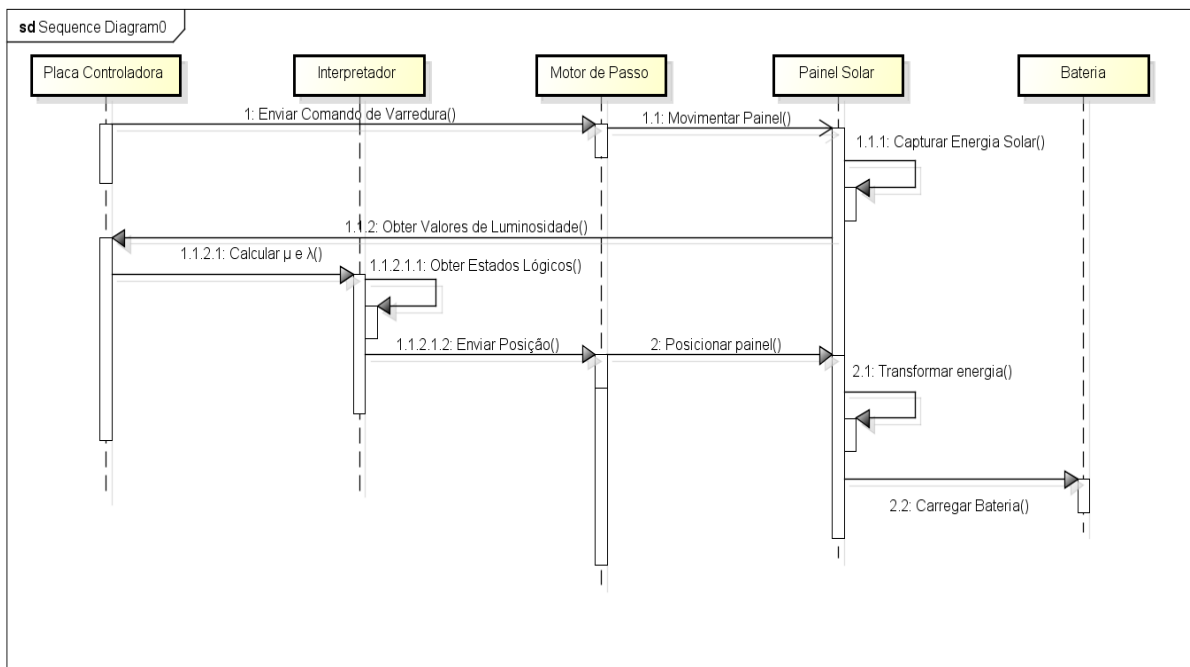
LEE (2002) define que: “A UML é uma linguagem de modelagem para documentar e visualizar os artefatos que especificamos e construímos na análise e desenho de um sistema”.

Como resultado do processo de modelagem, foram gerados os diagramas da UML através da ferramenta Astah, relativos a Caso de Uso (figura 28), Sequência (figura 29), Estados (figura 30), com os quais foi possível validar os requisitos.



powered by astah

Figura 28. Diagrama de Caso de Uso.



powered by astah

Figura 29: Diagrama de Sequência.



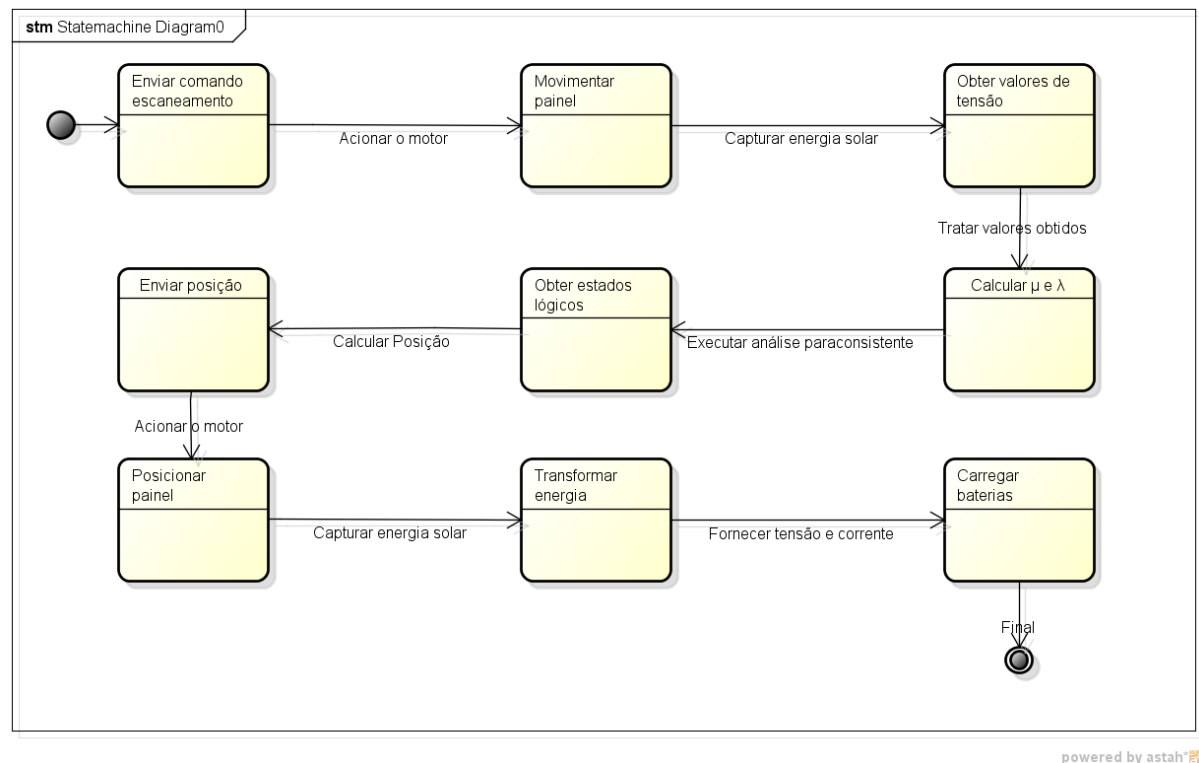


Figura 30. Diagrama de Estados.

Posteriormente à modelagem dos requisitos, foi feito o design do produto, com a integração entre seus componentes e a definição dos testes a serem aplicados para a medição de sua performance final, com o que se partiu para a execução do protótipo operacional, avaliação dos resultados alcançados e geração da documentação sobre o projeto.

### 3.3.2 Operação do *Software* Embarcado

#### 3.3.2.1 Obtenção dos graus de evidência

Para a obtenção dos graus de Evidência Favorável ( $\mu$ ) e Evidência Contrária ( $\lambda$ ), optou-se por prover um tratamento adequado, via *software*, aos valores obtidos diretamente da saída do painel fotovoltaico, em dois momentos, e já atenuados externamente. Chamou-se a estrutura responsável por esta atividade de Inversor.

Para os valores capturados no primeiro momento, seu aproveitamento é direto – categorizando uma Evidência Favorável ( $\mu$ ).

$$\mu = V_{\text{tensão}}$$

Para os valores capturados no segundo momento, a tensão é subtraída de 1,7 para que se obtenha um efeito de inversão – quanto mais baixa a tensão obtida, maior a evidência contrária ( $\lambda$ ).

$$\lambda = 1,7 - V_{\text{tensão}}$$

Ambos os valores de evidência são obtidos em momentos distintos, com um intervalo de tempo de 500 milissegundos entre si, o que permite uma correta diferenciação entre eles, permitindo a captura dos estados lógicos extremos Inconsistente ( $\perp$ ) – onde  $\mu$  e  $\lambda$  são uniformes e de fraca intensidade, representando um ambiente fracamente iluminado – e Paracompleto ( $\top$ ), onde  $\mu$  e  $\lambda$  são uniformes e de grande intensidade, representando um ambiente externo com perturbações, como sombras de árvores, pássaros ou outros obstáculos móveis.

Tendo em mente que a tensão de saída apresentará uma excursão entre zero e 1.7V, escolheu-se experimentalmente a marca de 50% desse total (0.85V) como limite entre os estados Inconsistente e Verdadeiro, bem como Inconsistente e Falso.

Após esse processo, os valores são normalizados para a escala utilizada pelo algoritmo para-analisador, que varia entre zero e um, para serem devidamente utilizados por ele.

### 3.3.2.2 Funcionamento do Software Embarcado

Dentro da operação do *software*, foram previstas as seguintes ações para o painel solar:

- Painel ficar na mesma posição.
- Executar uma varredura completa de  $135^\circ$ .
- Executar uma varredura parcial, em um raio de  $81^\circ$
- Após uma varredura completa, o sistema entrar em *Stand-by*.

De acordo com o exposto em TORRES (2004), buscou-se otimizar a parte da saída dos estados do algoritmo para-analisador, com a finalidade de obter-se uma performance otimizada do sistema de controle, com estados lógicos não-extremos convenientemente escolhidos de acordo com as necessidades da aplicação.

Levando-se em conta de que em grande parte do tempo o painel solar estará exposto a níveis de luminosidade próximos de seu máximo (estado lógico verdadeiro), optou-se pela utilização dos estados não-extremos mais próximos deste. A exemplificação do reticulado, com seus valores de evidência favorável ( $\mu$ ) e evidência contrária ( $\lambda$ ) expressos em seus valores de tensão correspondentes aos estados lógicos utilizados é expressa na figura 18.

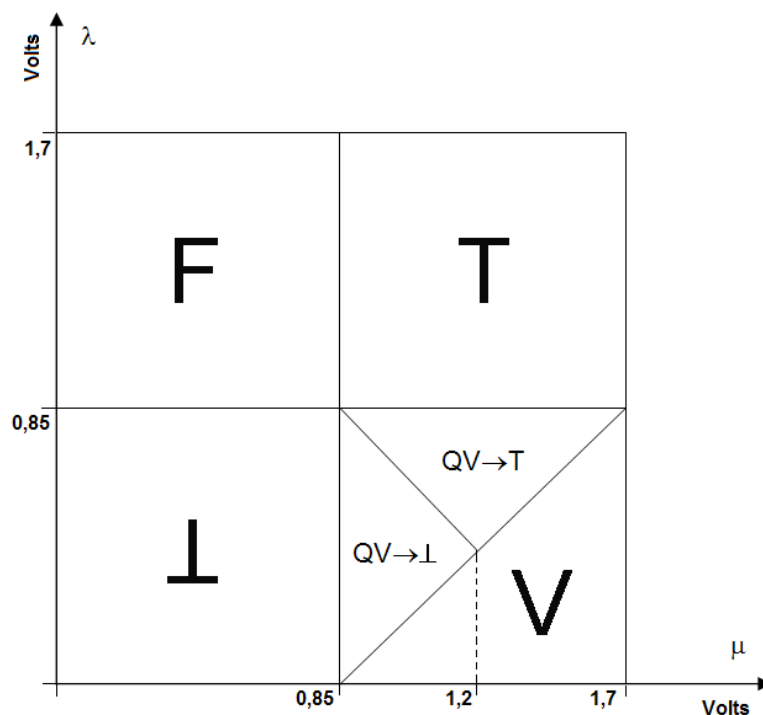


Figura 31: Aspecto do reticulado, com os níveis de tensão correspondentes aos estados lógicos utilizados, baseado em TORRES, 2004.

Uma vez ligado, o protótipo iniciará um escaneamento completo de 135°, parando em cinco pontos para a leitura dos sinais, e posicionando-se onde encontrar maior evidência favorável.

A partir daí, poderá tomar as ações correspondentes ao estado lógico encontrado nessa posição, partindo da proposição “O painel está plenamente iluminado”, tendo para cada estado lógico possível as seguintes decisões:

Estado V: O painel encontra-se plenamente iluminado, ficando na posição em que está.

Estado F: O painel encontra-se sob um nível de luminosidade incapaz de fazer-lhe produzir energia suficiente para utilização, com grande evidência contrária e baixa evidência favorável. Sob essa condição, deve executar um último escaneamento completo, entrando o sistema em *Stand-by* em seguida.

Estado  $\perp$ : O painel encontra-se sob luminosidade uniforme, de fraca intensidade, fornecendo baixas evidências favorável e contrária. Deve fazer um escaneamento completo, posicionando-se onde houver maior evidência favorável disponível.

Estado T: O painel encontra-se sob luminosidade uniforme, de boa intensidade, porém com alguma sombra ou reflexo grandes incidindo sobre o painel durante o processo de varredura. Deve efetuar um escaneamento completo em relação ao ponto que está, posicionando-se onde encontrar maior evidência favorável ou menor evidência contrária.

Estado  $QV \rightarrow \perp$ : O painel encontra-se sob luminosidade quase uniforme, de boa intensidade. Pode ter uma pequena sombra ou reflexo sobre o painel. Deve fazer um escaneamento em um ângulo de 81° em relação ao ponto em que está, de forma a obter maior evidência favorável.

Estado  $QV \rightarrow T$ : O painel encontra-se quase que plenamente iluminado. Deve executar um escaneamento num ângulo de 81° em relação do ponto em que está, colocando-se na posição onde houver menor evidência contrária.

Tais decisões, disponíveis na saída do controlador paraconsistente, são devidamente interpretadas e traduzidas em instruções para o *software* embarcado, que serão entregues ao motor de passo através de um circuito *driver*, responsável pelo correto isolamento entre a saída da placa controladora e as tensões e correntes mais elevadas necessárias para a movimentação do dispositivo (figura 32).

A adoção dos estados lógicos T e Estado  $QV \rightarrow T$  justifica-se para a operação em ambientes com muitos obstáculos móveis, como sombras de árvores, pássaros e trânsito de pessoas, capazes de perturbar o processo de escaneamento, induzindo um posicionamento errado do painel caso fosse utilizado algum outro modelo que não permitisse o tratamento de contradições, com o que se obtém maior criticidade e precisão no processo de funcionamento.

A cada hora, o sistema executará novo escaneamento, seguido das ações correspondentes ao estado lógico encontrado.

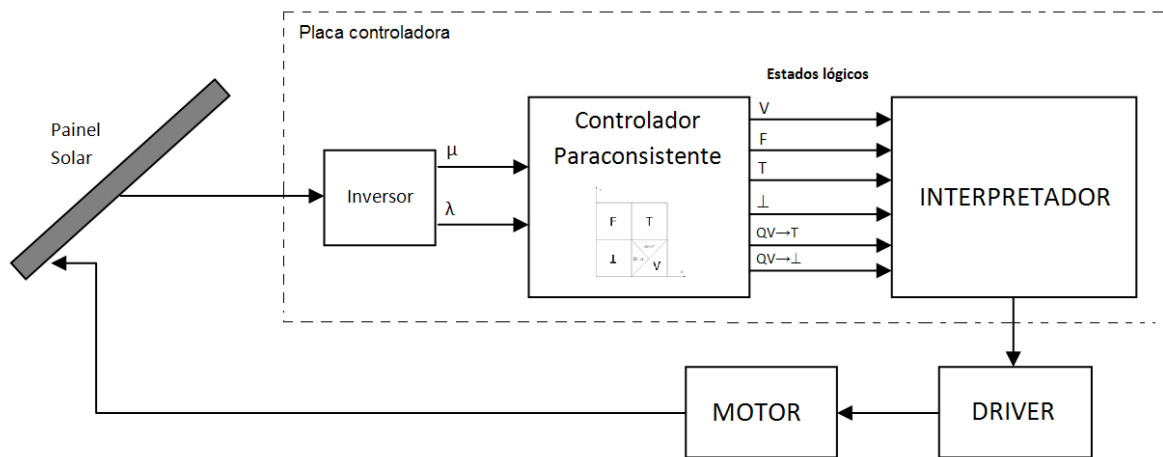


Figura 32: Esquema do sistema de controle do painel solar auto-orientável.

## 4 TESTES E RESULTADOS

### 4.1 Testes

Para os testes práticos do protótipo, preferiu-se um ambiente com boa elevação e poucos obstáculos bloqueando os raios solares durante o dia, e escolheu-se o telhado da residência do autor no bairro Penha de França, em São Paulo (figura 33).

O período de testes foi de seis dias, sendo que em três deles a performance em geração de energia foi medida com o painel parado (posicionado apontando apenas para cima) e nos outros três dias, com o conjunto inteiro operacional. Foi adotado esse método de comparação, uma vez que o sistema com painel fixo é o mais comumente adotado, além de poder servir como referência para mensurar diretamente, em um intervalo de tempo igual, o ganho de performance no sistema auto-orientável.



Figura 33: Protótipo em operação, sobre o telhado da casa do autor.

Para a captura dos dados, preferiu-se utilizar uma função disponível na própria IDE Arduino, o “*Serial Monitor*”, que permite o monitoramento em tempo real de quaisquer variáveis manipuladas pela placa controladora, via cabo serial de dados, conectado a ela e a um

computador comum (figura 34), o que dispensa a utilização de um *hardware* de aquisição separado, gerando maior praticidade e confiabilidade nos dados coletados.

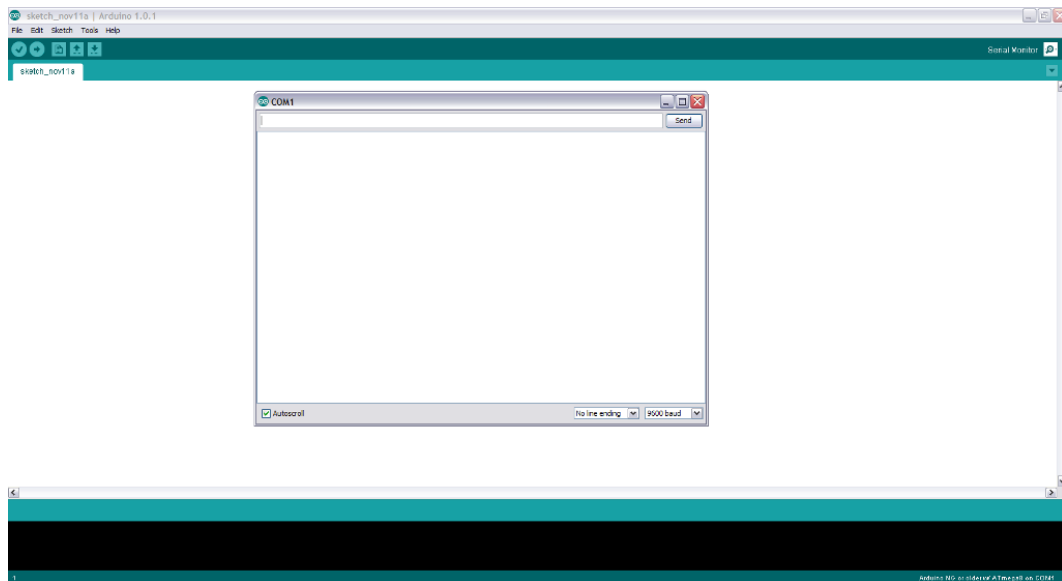


Figura 34: IDE Arduino, com função ‘*Serial Monitor*’.

Dessa forma, o protótipo pôde ser colocado em local elevado e exposto aos raios solares, conectado com um cabo de comprimento adequado ao computador, disposto em uma posição acessível para um cômodo monitoramento e rápido acesso aos dados coletados.

Os valores de tensão e corrente foram enviados ao computador em intervalos de uma hora – tempo pré-definido experimentalmente pelo autor, também para o painel solar efetuar nova checagem da luminosidade disponível no ambiente.

## 4.2 Resultados Práticos

Durante os testes práticos, pôde-se medir um incremento de 31,56% no rendimento médio do sistema baseado na Lógica E $\tau$  em relação ao painel fixo, especialmente durante as horas da manhã e do final da tarde, levando-se em conta de que os testes foram executados em dias de céu relativamente encoberto, com significativas variações na insolação, provocadas por nuvens. Os valores de potência obtidos das leituras, feitas entre as 07:00 e 19:00, estão listados na Tabela 5, com as médias para cada dia destacadas na última linha.

Tabela 5. Valores de potência coletados nos testes.

Dia 1		Dia 2		Dia 3	
Painel Fixo	Painel LPAE $\tau$	Painel Fixo	Painel LPAE $\tau$	Painel Fixo	Painel LPAE $\tau$
Potência (W)	Potência (W)	Potência (W)	Potência (W)	Potência (W)	Potência (W)
1,13	2,641	1,498	2,546	2,34	2,76
1,536	2,86	1,905	2,8	2,84	3,212
1,95	3,024	1,8	2,641	2,717	3,256
2,448	3,234	2,261	3,45	2,574	3,256
2,8	2,92	2,55	3,768	2,592	3,672
3,344	2,9	3,744	4,32	3,72	3,875
3,3	3,519	3,542	3,792	3,565	4,16
3,087	3,496	3,15	3,768	3,087	3,322
2,8	3,388	2,86	3,344	2,88	3,3
2,192	3	2,192	3,256	2,484	2,84
1,82	3	1,792	3,045	1,8	2,982
1,265	2,66	1,265	2,484	1,332	2,484
<b>2,306</b>	<b>3,0535</b>	<b>2,3799</b>	<b>3,2678</b>	<b>2,6609</b>	<b>3,2599</b>

Foi gerada no período, uma média de 3,19W com o painel auto-orientável, contra um total de 2,42W com o painel fixo, e a curva de potência média versus horas de luz para todos os seis dias de testes está expressa no gráfico da figura 35.



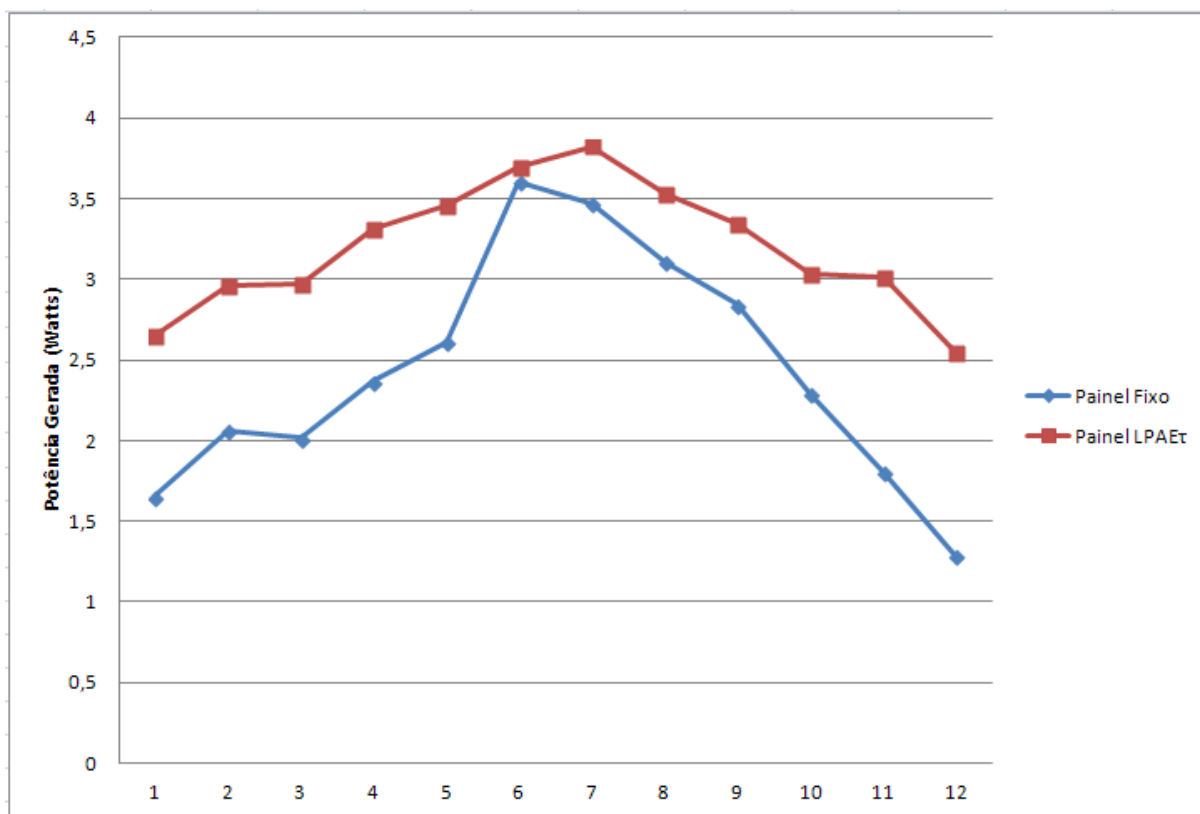


Figura 35: Gráfico da potência média versus tempo.

Foi observado durante a operação do sistema sob condições ideais de insolação, entre os períodos de escaneamento, que se a bateria de *backup* for desligada, o sistema permanece funcionando normalmente apenas com a energia do painel solar, somente necessitando da bateria para acionar o motor.

Durante os testes, o painel solar apresentou grande tendência para acertar sempre na posição em que pudesse fornecer maior tensão de saída e consequentemente, estar em direção ao sol, enganando-se apenas quando no nível do chão (e não sobre o telhado), e na proximidade de grandes superfícies refletivas, como paredes pintadas com cores claras, superfícies metálicas e janelas de vidro em momentos em que o sol não estava diretamente visível. Ainda assim, as tensões entregues na saída mostraram-se nesses casos as mais altas disponíveis, atestando o correto funcionamento do algoritmo para-analisador.

Quando comparado com outros arranjos existentes, como por exemplo SALAS et al. (2004), o sistema apresentou resultados compatíveis.

Após o período de doze horas de cada teste, a bateria sob carga cíclica pôde ser utilizada para a alimentação de diversos dispositivos, como LEDs destinados a iluminação ambiente,

receptores de rádio, amplificadores de áudio e até um pequeno transmissor para comunicações, respeitando-se as limitações de tensão e corrente que a mesma pode fornecer.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi proposta a aplicação da Lógica Paraconsistente Anotada Evidencial  $E\tau$  em um sistema de posicionamento para painel solar, destinado a gerar energia para a carga de baterias, aplicação destinada a localidades isoladas e desprovidas de energia elétrica, seguindo uma tendência crescente na busca por dispositivos confiáveis, menos danosos ao meio ambiente, e que apresentem um consumo de recursos reduzido durante sua operação.

Foi utilizada uma variação do reticulado  $\tau$  devidamente adaptada à aplicação, com seis estados lógicos – os quatro extremos e dois não-extremos mais próximos do Verdadeiro – permitindo a operação em situações de iluminação em que os resultados coletados estarão sempre próximos desse estado.

A alimentação das entradas do algoritmo para-analisador foi feita com base nos valores de tensão fornecidos pelo próprio painel solar, capturados em dois tempos e devidamente normalizados para serem aplicados à placa controladora, sendo então convertidos em evidência favorável e evidência contrária. Tal implementação permite entregar ao *software* uma amostragem de tensão que represente de forma fiel o que sucede na superfície do painel fotovoltaico.

A implementação prática do protótipo foi feita utilizando-se uma placa controladora de construção caseira baseada no modelo Arduino Severino, e nomeada pelo autor de “Virgulino”, capaz de acionar através de um circuito *driver*, um preciso motor de passo, responsável por posicionar o painel ao longo de uma excursão completa de  $135^\circ$ .

O *software* embarcado baseado na lógica  $E\tau$  busca a posição de maior evidência favorável, e em seguida, executa as ações correspondentes ao estado lógico encontrado através de novo ciclo de escaneamento total (estados lógicos F,  $\perp$  e T), ciclo de escaneamento parcial (estados lógicos  $QV \rightarrow \perp$  e  $QV \rightarrow T$ ) ou colocar o sistema em *stand by* quando o estado lógico é F. Esse processo completo é repetido em intervalos de uma hora, exceto quando em estado de *stand by*, situação em que o sistema passa a aguardar comando de *reset* para restabelecer seu ciclo normal de funcionamento.

De acordo com os testes práticos, realizados ao longo de seis dias sobre o telhado da casa do autor, verificou-se um rendimento médio de 3,193W fornecidos pelo painel móvel baseado na Lógica  $E\tau$  contra 2,448W obtidos do mesmo painel quando fixo, posicionado na direção do

sol do meio-dia, o que representa uma diferença de 31,56% a mais entre a configuração proposta neste trabalho e a que utiliza painel fixo, classicamente adotada, também sendo compatível com outros arranjos existentes (SALAS et al. 2004). Isso demonstra que a implementação real é perfeitamente exequível.

Tanto o *software* embarcado quanto o arranjo experimental ora apresentados permitem implementações em sistemas maiores, com maior número de painéis solares, aliando maior sofisticação e capacidade de geração de energia, uma necessidade que vem mostrando-se cada vez mais importante, em tempos de recursos naturais e energéticos cada vez mais escassos.

Isso, aliado a uma maior sofisticação na implementação do algoritmo para-analisador, visando eliminar os problemas causados por superfícies refletivas próximas, permitindo a operação portátil do sistema sem a necessidade de elevação em relação ao solo, além do estudo de uma melhor proteção física à parte eletrônica, especialmente contra a água da chuva, constituem assunto para futuras iterações.

## 6 REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, S. BADRAN, O. O. **Sun tracking system for productivity enhancement of solar still**. Desalination. Elsevier, 2007.
- ABE, J.M., **Fundamentos da Lógica Anotada**, Tese de Doutorado, FFLCH - USP, 135 pp, 1992.
- ABE, J. M. SILVA FILHO, J. I. da. CELESTINO, U. ARAÚJO, H. C. de. **Lógica Paraconsistente Anotada Evidencial Et**, 2011, Ed. Comunicar.
- ABE, J.M. & J.I. DA SILVA FILHO, **Manipulating Conflicts and Uncertainties in Robotics, Multiple-Valued Logic and Soft Computing**, V.9, ISSN 1542-3980, 147-169, 2003.
- AHMAD, S. SHAFIE, S. KADIR, M. Z. A. A. **Power feasibility of a low power consumption solar tracker**. Procedia Environmental Sciences. Elsevier, 2012.
- ALTAS, I. H. SHARAF, A. M. **A novel maximum power fuzzy logic controller for photovoltaic solar energy systems**. Renewable Energies. Elsevier, 2007.
- ARRUDA, A. I. DA COSTA, N. C. A. CHUAQUI, R. **Proceedings of the third latin-american symposium on mathematical logic**. Amsterdam: North Holland, 1977.
- ATAHANI, V.V. **Stepper Motors: Fundamentals, Applications and Design**, 1997, New Age International.
- BELLABY, Paul. **Uncertainties and risks in transitions to sustainable energy, and the part ‘trust’ might play in managing them: a comparison with the current pension crisis**. Energy Policy, Elsevier, 2009.
- BENMESSAOUD, M. T. ZERHOUNI, F. Z. ZEGRAR M. BOUDGHENE, A. S. TIOURSI, M. **New approach modeling and a maximum power point tracker method for solar cells**. Computers and Mathematics with Applications. Elsevier, 2010.
- BERMANN, Célio. **Energia no Brasil: Para quê? Para quem? Crise e alternativas para um país sustentável**, 2002, Livraria da Física/Fase Editora.
- BSI GROUP. **British Standard Specification No. BS5000**, part 60, 1982.
- BOENTE, A. BRAGA, G. **Metodologia científica contemporânea para universitários e pesquisadores**. 2004, Editora Brasport.
- BOICO, F. LEHMAN, B. **Multiple-input Maximum Power Point Tracking algorithm for solar panels with reduced sensing circuitry for portable applications**. Solar Energy. Elsevier, 2011.
- BURSZTYN, Marcel. **A Difícil Sustentabilidade: política Energética e Conflitos Ambientais**, 2001, Garamond.
- CAMACHO, Eduardo F; BERENGUEL, Manuel; RUBIO, Francisco R; MARTÍNEZ, Diego. **Control of Solar Energy Systems**. Springer, 2012.
- CESARE, G. CAPUTO, D. NASCETTI, A. **Maximum power point tracker for portable photovoltaic systems with resistive-like load**. Solar Energy. Elsevier, 2005.

CHAO, R. M. KO, S. H. PAI, F. S. LIN, I. H. CHANG, C. C. **Evaluation of a new maximum power point tracker (MPPT) applied to the photovoltaic stand-alone systems.** Solar Energy. Elsevier, 2009.

CHONG, K. K. WONG, C. W. **General formula for on-axis sun-tracking system and its application in improving tracking accuracy of solar collector.** Solar Energy. Elsevier, 2008.

CRESESB, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Energia Solar: Princípios e Aplicações.** 2006. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em agosto/2013.

DA COSTA, N.C.A., J.M. ABE, J.I. DA SILVA FILHO, A.C. MUROLO & C.F.S. LEITE, **Lógica Paraconsistente Aplicada**, ISBN 85-224-2218-4, Editôra Atlas, 214 págs., 1999.

DANTAS, J. M. **Sistema Fotovoltaico para Comunidades Isoladas utilizando ultracapacitores para armazenamento de energia.** Dissertação. Universidade Federal do Ceará, 2013.

DELL, Ronald. RAND, David Anthony James. **Clean Energy.** James H. Clark, 2004.

DÍAZ-DORADO, E. SUÁREZ-GARCÍA, A. CARRILLO, C. J. CIDRÁS, J. **Optimal distribution for photovoltaic solar trackers to minimize power losses caused by shadows.** Renewable Energy. Elsevier, 2011.

ENRIQUE, J. M. ANDÚJAR, J. M. BOHÓRQUEZ, M. A. **A reliable, fast and low cost maximum power point tracker for photovoltaic applications.** Solar Energy. Elsevier, 2009.

GHONEIM A. A. **Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems.** Energy Conversion and Management. Elsevier, 2005.

GUYEMARD, C. A. **Direct and Indirect uncertainties in the prediction of tilted irradiance for solar engineering applications.** Solar Energy, Elsevier, 2008.

HUANG, B. J. DING, W.L. HUANG, Y. C. **Long-term field test of solar PV power generation using one-axis 3-position sun tracker.** Solar Energy. Elsevier, 2011.

IEA (International Energy Agency). **Key World Energy Statistics.** OECD/IEA, Paris, 2012.

ISHAQUE, K. SALAM, Z. **A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier, 2012.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Climate Change 2007: The Physical Science Base, Summary for Policymakers.** IPCC, 2007.

KAUSHIKA, N. D. GAUTAM, N. K. KAUSHIK K. **Simulation model for sizing of stand-alone solar PV system with interconnected array.** Solar Energy Materials and Solar Cells. Elsevier, 2004.

KIM, Il-Song. **Robust maximum power point tracker using sliding mode controller for the three-phase grid-connected photovoltaic system.** Solar Energy. Elsevier, 2006.

KOUSSA, M. HADDADI, M. SAHEB, D. MALEK, A. HADJI, S. **Sun tracker systems effects on flat plate photovoltaic PV systems performance for different sky states: A case of an arid and hot climate.** Energy Procedia. Elsevier, 2012.

KÜHNEL, Klaus. **Avr Risc Microcontroller Handbook**, 1998, Butterworth-Heinemann.

MACHADO, C. A. F. **A-Risk: um método para identificar e quantificar risco de prazo em projetos de desenvolvimento de *software***. 2002. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada, Pontifícia Universidade Católica do Paraná – Curitiba.

MANZANO-AGUGLIARO, F. ALCAYDE, A. MONTOYA, F.G. ZAPATA-SIERRA, A. GIL, C. **Scientific Production of renewable Energies Worldwide: An Overview**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 2011.

MELLIT, A. KALOGIROU, S. A. **Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review**. Progress in Energy and Combustion Science. Elsevier, 2008.

MOUSAZADEH, H. KEIHANI, A. JAVADI, A. MOBLI, H. ABRINIA, K. SHARIFI, A. **A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier, 2009.

OCRAN, T. A. CAO, J. BINGGANG, C. SUN, J. **Artificial Neural Network Maximum Power Point Tracker for Solar Electric Vehicle**. Tsinghua Science and Technology. Vol.10, Nº2, Abril - 2005

OSHANA, R. KRAELING, M. **Software Engineering for Embedded Systems: Methods, Practical Techniques, and Applications**. Elsevier, 2013.

OZCELIK, S. PRAKASH, H. CHALOO, R. **Two-Axis Solar Tracker Analysis and Control for Maximum Power Generation**. Procedia Computer Science. Elsevier, 2011.

PETREUŞ, D. PĂTĂRĂU, T. DĂRĂBAN, S. MOREL, C. MORLEY, B. **A novel maximum power point tracker based on analog and digital control loops**. Solar Energy. Elsevier, 2011.

PETROVA-KOCH, V. HEZEL, R. GOETZBERGER, A. (org.) **High-Efficient Low-Cost Photovoltaics: Recent Developments**. Springer, 2009.

PRADO, J. P. A. **Uma arquitetura em IA baseada em Lógica Paraconsistente**. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, 1996.

PRESSMAN, R. **Engenharia de Software**, 8ª edição, Pearson Makron Books, 2007.

RAI, A. K. KAUSHIKA, N. D. SINGH, B. AGARWAL, N. **Simulation model of ANN based maximum power point tracking controller for solar PV system**. Solar Energy Materials and Solar Cells. Elsevier, 2010.

RUBIO, F. R. ORTEGA, M. G. GORDILLO, F. LOPEZ-MARTÍNEZ, M. **Application of new control strategy for sun tracking**. Energy Conversion and Management. Elsevier, 2007.

SALAH, C. B. OUALI, M. **Comparison of fuzzy logic and neural network in maximum power point tracker for PV systems**. Electric Power Systems Research. Elsevier, 2010.

SALAS, V. OLÍAS, E. LÁZARO A. BARRADO, A. **Evaluation of a new maximum power point tracker (MPPT) applied to the photovoltaic stand-alone systems**. Solar Energy Materials and Solar Cells. Elsevier, 2004.

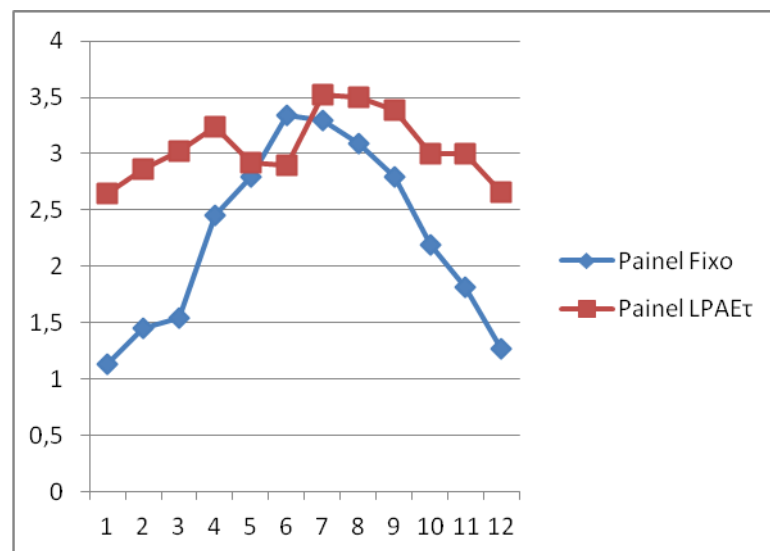
- SALAS, V. OLÍAS, E. LÁZARO A. BARRADO, A. **New algorithm using only one variable measurement applied to a maximum power point tracker.** Solar Energy Materials and Solar Cells. Elsevier, 2004.
- SANTOS, J. L. ANTUNES, F. CHEBAB, A. CRUZ, C. **A maximum power point tracker for PV systems using a high performance boost converter.** Solar Energy, Elsevier, 2005.
- SILVA FILHO, João Inácio da, **Métodos de Aplicações da Lógica Paraconsistente Anotada**, 1999, Tese (Doutorado)
- SILVA, N. F. da. ROSA, L P da. FREITAS, M. A. V. PEREIRA, M. G. **Wind Energy in Brazil: From the power sector's expansion crisis model to the favorable environment.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 2013.
- SOLANGI, K. H. ISLAM, M. R. SAIDUR, R. RAHIM, N. A. FAYAZ, H. **A review on global solar energy policy.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier, 2011.
- SOLAR ENERGY INTERNATIONAL. **Photovoltaics, Design and Installation Manual**, New Society, 2004.
- SOMMERVILLE, Ian. **Engenharia de Software**; tradução Ivan Bosnic e Kalinka G. de O. Gonçalves; revisão técnica Kechi Hirma. – 9ª. Ed. – São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011, 1ª. Reimpressão – julho 2012.
- SHAW, ALLAN C. **Sistemas e Software de Tempo Real**, Editora Bookman, 2003.
- TAKI, M. AJABSHIRCHI, Y. BEHFAR, H. TAKI, M. **Experimental Investigation and Construction of PV Solar Tracker Control System Using Image Processing.** Modern Applied Science, vol.5, Nº6. Canadian Center of Science and Education, 2011.
- TORRES, A. M. **Aproveitamento Fotovoltaico controlado por Redes Neurais Artificiais Interligado ao Sistema Elétrico.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, 1998.
- TORRES, C. R. **Sistema Inteligente Para Controle de Robôs Móveis Autônomos.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Itajubá, 2004.
- TORRES, C. R. **Sistema inteligente baseado na lógica paraconsistente anotada  $\epsilon\tau$  para controle e navegação de robôs móveis autônomos em um ambiente não estruturado.** Tese de doutorado, Universidade Federal de Itajubá, 2010.
- ZEGAOUI, A. AILLERIE, A. PETIT, P. SAWICKI, J. P. JAAFAR, A. SALAME, C. CHARLES, J. P. **Comparison of Two Common Maximum Power Point Trackers by Simulating of PV Generators.** Energy Procedia. Elsevier, 2011.
- ZEGAOUI, A. AILLERIE, A. PETIT, P. SAWICKI, C. CHARLES, J. BELARBI, A. W. **Dynamic behaviour of PV generator trackers under irradiation and temperature changes.** Solar Energy. Elsevier, 2011.
- ZELKOVITZ, Marvin. **Advances in Computers**, vol. 56, Elsevier, 2002.



## 7 APÊNDICE

Dados das leituras obtidas nos testes práticos, dia 1.

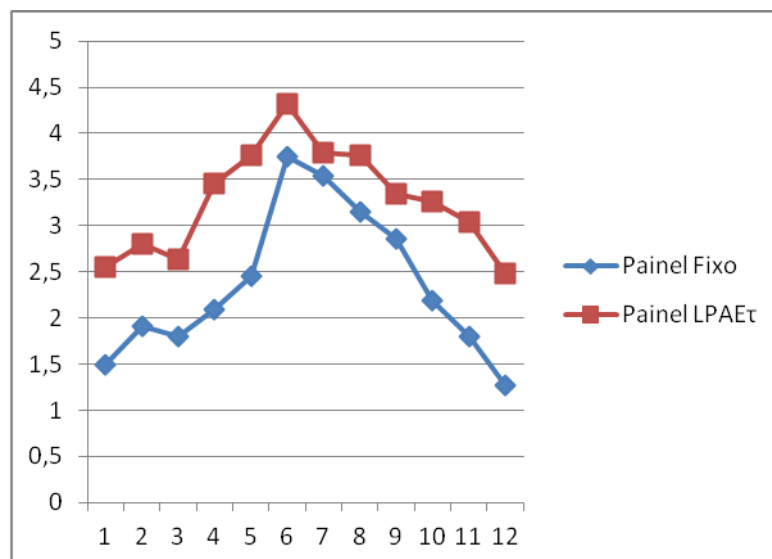
Painel Fixo			Painel LPAEτ		
Volts	Amperes	Watts	Volts	Amperes	Watts
11,3	0,1	1,13	13,9	0,19	2,641
12,1	0,12	1,452	14,3	0,2	2,86
12,8	0,12	1,536	14,4	0,21	3,024
13,6	0,18	2,448	14,7	0,22	3,234
14	0,2	2,8	14,6	0,2	2,92
15,2	0,22	3,344	14,5	0,2	2,9
15	0,22	3,3	15,3	0,23	3,519
14,7	0,21	3,087	15,2	0,23	3,496
14	0,2	2,8	15,4	0,22	3,388
13,7	0,16	2,192	15	0,2	3
13	0,14	1,82	15	0,2	3
11,5	0,11	1,265	14	0,19	2,66
Dia 1	Pmédia	2,2645		Pmédia	3,0535
Ganho %		34,84213			



Dados das leituras obtidas nos testes práticos, dia 2.

Painel Fixo			Painel LPAEτ		
Volts	Amperes	Watts	Volts	Amperes	Watts
10,7	0,14	1,498	13,4	0,19	2,546
12,7	0,15	1,905	14	0,2	2,8
12	0,15	1,8	13,9	0,19	2,641
12,3	0,17	2,091	15	0,23	3,45
14,4	0,17	2,448	15,7	0,24	3,768
15,6	0,24	3,744	16	0,27	4,32
15,4	0,23	3,542	15,8	0,24	3,792
15	0,21	3,15	15,7	0,24	3,768
14,3	0,2	2,86	15,2	0,22	3,344
13,7	0,16	2,192	14,8	0,22	3,256
12,8	0,14	1,792	14,5	0,21	3,045
11,5	0,11	1,265	13,8	0,18	2,484
Dia 2		<b>Pmédia</b>			<b>Pmédia</b>
		2,35725			3,267833

**Ganho %** 38,62905



Dados das leituras obtidas nos testes práticos, dia 3.

Painel Fixo			Painel LPAEτ		
Volts	Amperes	Watts	Volts	Amperes	Watts
13	0,18	2,34	13,8	0,2	2,76
14,2	0,2	2,84	14,6	0,22	3,212
14,3	0,19	2,717	14,8	0,22	3,256
14,3	0,18	2,574	14,8	0,22	3,256
14,4	0,18	2,592	15,3	0,24	3,672
15,5	0,24	3,72	15,5	0,25	3,875
15,5	0,23	3,565	16	0,26	4,16
14,7	0,21	3,087	15,1	0,22	3,322
14,4	0,2	2,88	15	0,22	3,3
13,8	0,18	2,484	14,2	0,2	2,84
12	0,15	1,8	14,2	0,21	2,982
11,1	0,12	1,332	13,8	0,18	2,484
Dia 3		Pmédia 2,660917			Pmédia 3,259917

Ganho % 22,51104

