

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR**

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE**

Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares

**ESTRATÉGIAS DE RASTREAMENTO SOLAR
PARA SISTEMAS FV PLANOS**

MANOEL HENRIQUES DE SÁ CAMPOS FILHO

ORIENTADOR: PROF. DR. CHIGUERU TIBA

Recife, PE

Julho, 2014

MANOEL HENRIQUES DE SÁ CAMPOS FILHO

**ESTRATÉGIAS DE RASTREAMENTO SOLAR
PARA SISTEMAS FV PLANOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares para obtenção do título de Mestre em Ciências, Área de Concentração: Fontes Renováveis de Energia.

ORIENTADOR: PROF. DR. CHIGUERU TIBA

Recife, PE

Julho, 2014

Catálogo na fonte
Bibliotecário Carlos Moura, CRB-4 / 1502

C198e Campos Filho, Manoel Henriques de Sá.
Estratégias de rastreamento solar para sistemas FV planos.
/ Manoel Henriques de Sá Campos Filho. - Recife: O Autor,
2014.
80 f. : il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Chigueru Tiba.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de
Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em
Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2014.
Inclui referências bibliográficas.

1. Energia solar. 2. Estratégias de rastreamento solar.
3. Rastreamento solar. 4. Painéis fotovoltaicos.
5. Concentradores solares. I. Tiba, Chigueru, orientador.
II. Título.

UFPE
CDD 621.47 (21. ed.) BDEN/2014-25

FOLHA DE APROVAÇÃO

ESTRATÉGIAS DE RASTREAMENTO SOLAR PARA SISTEMAS FV PLANOS

Manoel Henriques de Sá Campos Filho

APROVADA EM 25.07.2014

ORIENTADOR: Prof. Dr. Chigueru Tiba

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira – DEN/UFPE

Prof. Dr. Naum Fraidenaich – DEN/UFPE

Prof. Dr. André Felipe Vieira da Cunha – DEN/UFPE

AGRADECIMENTOS

À minha amada esposa Fabiana por todo o apoio, incentivo e afeto durante essa jornada.

Às minhas queridas filhas Nathália e Amanda que, a seu modo, contribuíram e me encorajaram a enfrentar os desafios que se apresentaram.

Aos meus pais Manoel Henriques e Ana Maria que desde a tenra idade me incentivaram e apoiaram no estudo das Ciências em geral. Ao meu pai, particularmente, por me apresentar a beleza e a importância das áreas de Matemática, Física e Química.

Ao meu orientador, Prof. Chigueru Tiba, um agradecimento especial pela orientação, apoio, incentivo e solidariedade durante todas as etapas, especialmente diante de imprevistos ao longo desse trabalho.

Ao Prof. Tiago Rolim, do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE, pelo valioso auxílio e pelas discussões técnicas durante o projeto e construção da parte mecânica do experimento.

Ao meu amigo e cunhado, Sérgio Leal, agradeço pelos inestimáveis apoio, auxílio e incentivo em inúmeras ocasiões.

Aos amigos do Laboratório de Energia Solar, Rinaldo, Guilherme e Marcelo, pelas sugestões, auxílio e colaboração.

A todas as bancas de professores que avaliaram cada etapa deste trabalho, contribuindo para aperfeiçoar o estudo.

A todos os amigos e colegas que, direta ou indiretamente, contribuíram para realização desse trabalho.

À UFPE - Universidade Federal de Pernambuco e ao DEN – Departamento de Energia Nuclear pela oportunidade de realizar o curso de pós-graduação.

À CAPES pela viabilização e incentivo através da bolsa concedida.

*“We make our world significant by the courage
of our questions and the depth of our answers”*

(Carl Sagan, Cosmos)

RESUMO

As vantagens em termos energéticos do rastreamento solar são conhecidas. A utilização de sistemas de rastreamento, por exemplo, pode aumentar em 20% o total de energia coletada anualmente em áreas típicas e em 30% nas áreas de alta incidência de irradiação solar direta. Por outro lado, a massificação da produção de componentes eletrônicos tornou essa tecnologia muito acessível em termos econômicos, de tal forma que hoje em dia existem disponíveis no mercado mundial centenas de seguidores solares com diferentes graus de precisão e estratégias de acompanhamento solar. Atualmente, a aplicação desses sistemas no Brasil tem várias inconveniências associadas a custos, dificuldades de manutenção e dependência tecnológica, entre outras. Pelo que antecede, foi desenvolvido um sistema multi rastreador com quatro estratégias de acompanhamento solar. Essas estratégias compreenderam uma posição fixa polar, uma posição atualizada a cada minuto com o ângulo solar, outra cuja função foi corrigir erros de posicionamento da anterior por realimentação da energia gerada e finalmente uma última que dividia o ângulo total de rastreamento diário em sete intervalos discretos. Todas compartilharam uma janela de medição de um minuto durante todo o dia. Para atingir a precisão de projeto, foi utilizado um motor de passo com redutor que permitiu alcançar uma resolução de $0,09^\circ$ por passo. Para medir os ângulos, foi incluído um acelerômetro com acurácia de $0,1^\circ$. Além disso, o sistema ainda teve um módulo GPS para medição das coordenadas geográficas e um módulo transceptor de radiofrequência para comunicação e gerenciamento à distância por um sistema mestre. O controle do conjunto foi realizado por meio de um microprocessador e seu *firmware* desenvolvido na linguagem C pôde ser atualizado via radiofrequência. Quanto aos resultados, os ganhos em relação à posição fixa polar foram os esperados considerando o clima do período. Os erros de rastreamento foram inferiores a $0,14^\circ$ em média. As estratégias associadas ao rastreamento diário tiveram desempenho equivalente, mesmo aquela responsável por apenas 7 intervalos.

Palavras-chave: Estratégias de rastreamento solar, rastreamento solar, painéis fotovoltaicos, concentradores solares, energia solar

ABSTRACT

The advantages of solar tracking are well known in terms of energy harnessing. The usage of such systems, for instance, can increase about 20% the total collected energy in typical sites and about 30% in areas of high direct irradiation incidence. On the other hand, by means of massive electronic components production, the technology became affordable in such a way that hundreds of solar trackers arose in the world market, with several accuracy degrees and tracking strategies. Nowadays, in Brazil, those systems have many inconveniences, some associated with acquisition costs, others related to difficulties in maintenance, besides the technological dependence. In this scenario, the main proposal of this approach is the development and evaluation of a single axis multiple tracking system that can accomplish four different tracking strategies: fixed polar mount; continuous tracking; utilization of the energy output as a feedback; and the division of the total tracking angle in seven discrete intervals. All the strategies shared the same window of time within one minute to execute their tasks. In order to increase precision, a stepper motor coupled with a 1:20 reductor was included in the system, reaching a resolution of 0.09° . To measure the angles, an accelerometer based device with accuracy of 0.1° was also included. Besides, as a part of the tracker, there was a GPS module to get the geographic position and a radio frequency transceiver module to allow external management, control and data exchange with the master system. A microprocessor was used to coordinate all functions and modules. Its program was developed in C and the firmware update is done by means of that radio frequency module. Regarding the results, all gains when compared to the fixed polar position had the expected values taking in account the weather conditions of the period. The tracking angle errors were low to the purposes of the experiment, below 0.14° on average. It was concluded that there were no significant differences in the power output among the last three tracking strategies, even the one that uses only seven discrete intervals.

Keywords: Solar tracking strategies, tracking strategies, photovoltaic panels, solar concentrators, solar energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – O raio solar e o ângulo de absorção da radiação pelo coletor	17
Figura 2 – O sol, as estações e o ângulo de incidência da radiação	21
Figura 3 – Sistema de coordenadas considerando um plano coletor inclinado, o raio solar e a rotação da Terra	22
Figura 4 – Sistema de coordenadas particular (para a latitude λ) considerando um plano coletor	23
Figura 5 – Rastreador passivo	28
Figura 6 – Rastreador polar	29
Figura 7 – Rastreador vertical ou azimutal.....	30
Figura 8 – Rastreador com um eixo horizontal	31
Figura 9 – Rastreador com dois eixos (<i>Tip-Tilt</i>).....	32
Figura 10 – Rastreador com dois eixos, montagem azimutal.....	33
Figura 11 – Visão espacial de quatro modos de rastreamento	34
Figura 12 – Circuito conhecido como ponte H.....	37
Figura 13 – Visão lateral do arranjo multi rastreador.....	41
Figura 14 – Visão do arranjo multi rastreador com a caixa de proteção do circuito.....	42
Figura 15 – Circuito do escravo (multi rastreador)	43
Figura 16 – Diagrama em blocos do sistema escravo (multi rastreador)	44
Figura 17 – Transceptor de RF	47
Figura 18 – Comparações entre os Algoritmos de Reda e Rabl.....	50
Figura 19 – Diagrama de funcionamento do programa mestre	52
Figura 20 – Menu principal do programa mestre	53
Figura 21 – Menu secundário do programa mestre	53
Figura 22 – <i>Datalogger</i> CR10X	58
Figura 23 – Estação solarimétrica do Grupo FAE.....	58
Figura 24 – Chuva acumulada mensal na estação automática Recife	61
Figura 25 – Histograma para os valores médios de K_t	62
Figura 26 – Distribuição acumulada de K_t	62
Figura 27 – Irradiância global x estratégia 0 para o dia 23/04	63
Figura 28 – Comparação entre estratégias para o dia 23/04.....	64
Figura 29 – Sombreamento a leste do arranjo	65
Figura 30 – Histograma de K_t para o dia 23/04	65

Figura 31 – Irradiância global x estratégia 0 para o dia 10/05	66
Figura 32 – Comparação entre estratégias para o dia 10/05.....	67
Figura 33 – Histograma de Kt para o dia 10/05	68
Figura 34 – Comparação entre as estratégias para $\sigma_{\text{Irrad}} \leq 1$	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre modos de rastreamento	35
Tabela 2 – Resultados simulados para modos de rastreamento.....	36
Tabela 3 – Resumo dos desvios de posicionamento.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Refere-se à corrente elétrica alternada
A/D	Refere-se à conversão de sinal analógico para digital
AU	Unidade astronômica
CPU	Unidade central de processamento
DC	Refere-se à corrente elétrica contínua
DEN	Departamento de Energia Nuclear da UFPE - Universidade Federal de Pernambuco
DLL	Biblioteca de ligação dinâmica. Arquivo caracterizado pela extensão dll; contém um conjunto de funções utilizadas por programas
FV	Fotovoltaico(a)(s)
GPS	Sistema de posicionamento global
ISM	Designação dada a uma faixa de frequências para uso industrial, científico ou médico
KB	Kbytes, unidade de armazenamento de memória que equivale a 1024 Bytes
LDR	Resistor dependente de luz
MB	Mbytes, unidade de armazenamento de memória que equivale a 1024 Kbytes
MIPS	Mega instruções por segundo
\hat{n}_c	Versor da normal ao painel FV
n'_c	Versor da normal ao painel FV
\hat{n}_s	Versor que representa o raio solar
n'_s	Versor que representa o raio solar
n_s	Versor que representa o raio solar

PC	Computador pessoal
PIC18F4620	Microcontrolador da Microchip®
PIC	Usado para designar microcontrolador da Microchip®
RF	Radiofrequência
RTC	Relógio de tempo real
SBFV	Sistema de bombeamento fotovoltaico
TXT	Formato de arquivo texto caracterizado pela extensão txt
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
USB	Barramento universal de transmissão de dados seriais

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Contextualização.....	15
1.2 Caracterização do Problema	16
1.3 Objetivos.....	18
2. REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 Definições.....	19
2.2 Geometria Solar	20
2.3 Tipos de Rastreadores Solares.....	26
2.3.0 Rastreadores Passivos.....	27
2.3.1 Rastreador com Um Eixo e Montagem Polar	28
2.3.2 Rastreador com Um Eixo Vertical ou Azimutal.....	29
2.3.3 Rastreador com Um Eixo Horizontal	30
2.3.4 Rastreador com Dois Eixos e Montagem <i>Tip-Tilt</i>	31
2.3.5 Rastreador com Dois Eixos e Montagem Azimutal	32
2.4 Comparações entre Modos de Rastreamento	33
2.5 Estudo sobre Rastreador em um Eixo com Controle Microprocessado.....	37
2.6 Experimentos Locais sobre Rastreadores em Um Eixo	38
3. MATERIAL E MÉTODOS	41
3.1 Painel Fotovoltaico	45
3.2 Microcontrolador.....	45
3.3 Motor de Passo.....	46
3.4 Controladora do Motor de Passo	46
3.5 Transceptor de RF para comunicação sem fio (<i>Wireless</i>).....	46
3.6 Relógio Interno RTC, GPS e Memória <i>Flash</i>	47
3.7 Sensores	48
3.8 Baterias.....	48
3.9 <i>Software</i> para Calcular os Ângulos Solares.....	49
3.10 <i>Software</i> dos Módulos Mestre e Escravo	51
3.11 Estratégias de Rastreamento	55
3.11.0 Estratégia 0	56

3.11.1	Estratégia 1	56
3.11.2	Estratégia 2	56
3.11.3	Estratégia 3	57
3.12	Estação Solarimétrica e <i>Datalogger</i>	57
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.	CONCLUSÃO	75
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
	REFERÊNCIAS	78

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

É conhecido o esforço internacional para mudar a matriz energética baseada nos hidrocarbonetos derivados de carvão, gás e petróleo. Várias alternativas de prospecção energética têm sido estudadas ao longo desse período histórico, cada uma envolvendo diferentes processos, tecnologias e recursos naturais disponíveis. Por razões óbvias, as energias limpas, assim denominadas pela menor agressividade ao meio ambiente, são o foco principal da atenção de uma quantidade sem precedentes de pesquisas. Caminhando em paralelo com essa tendência, recursos monetários substanciais têm sido alocados para financiar essas pesquisas, tanto por instituições privadas quanto pelos governos.

Uma expressiva fatia dentro desses estudos é voltada para a captação direta da nossa principal fonte energética, aquela cujo "combustível" vem do espaço, a energia solar. A aplicação mais antiga dessa forma de energia é aquela associada ao aquecimento e secagem em geral. A transformação em tempos mais recentes dessa energia em outra forma mais versátil e facilmente utilizável, a elétrica, encontra-se associada à geração térmica (para utilização direta ou para geração de vapor e subsequente geração de energia elétrica) e à geração fotovoltaica (FV).

A geração solar termoelétrica funciona, em última análise, a partir do aquecimento de um fluido que, ao transferir sua energia térmica para o meio, realiza um trabalho que é convertido em energia elétrica por meio de um gerador apropriado.

A geração fotovoltaica, por outro lado, compreende células fotovoltaicas (FV), cujo funcionamento é baseado essencialmente no efeito fotoelétrico (CHEN, 2011). De modo sucinto, esse fenômeno ocorre quando determinados fótons incidentes, dentro de um espectro de frequências, atingem as junções semicondutoras da célula FV, gerando portadores de cargas aos pares (elétrons-lacunas). Posteriormente, esses pares se afastam da junção, sendo coletados pelos terminais do circuito elétrico conectado, formando uma corrente elétrica. A geração fotovoltaica autônoma tem um leque extenso de aplicações, desde pequenas células que fornecem energia a dispositivos portáteis de baixo consumo, como calculadoras, até sistemas maiores que suprem a energia necessária ao funcionamento de instalações elétricas de pequeno porte, tais como: sistemas de telecomunicações, sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água (SBFV) e sistema de dessalinização por osmose reversa. Finalmente,

existem ainda as centrais fotovoltaicas interligadas à rede elétrica com centenas de MW e capazes de abastecer de energia milhares de consumidores.

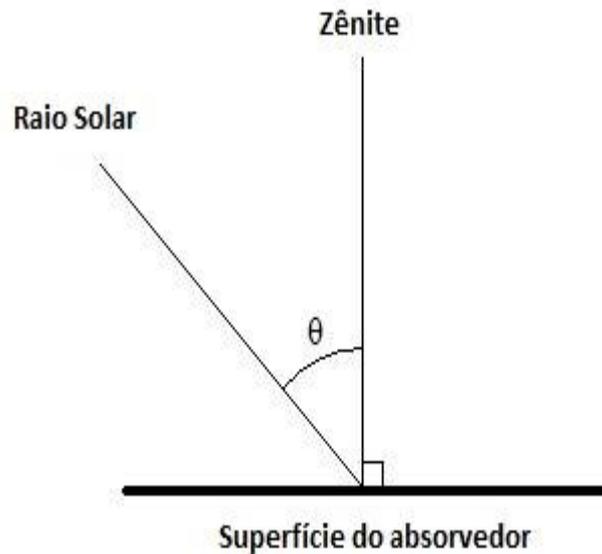
A busca pelos atrativos da energia fotovoltaica ocasiona não apenas uma quantidade crescente de áreas usando esses sistemas, mas também um impulso na procura pelos dispositivos mais eficientes que consigam extrair mais energia dentro de uma mesma área. Isso remete ao estudo da eficiência de sistemas FV. Nesses termos, sobre a superfície de absorção de um painel FV, é importante otimizar o balanço entre o fluxo de energia incidente e o fluxo de saída. Existem dois modos de maximizar a taxa de energia útil: seja pela otimização da conversão no absorvedor através da escolha apropriada do material que o constitui; seja pelo aumento da radiação incidente através de um sistema de rastreamento (ALEXANDRU; POZNA, 2008). Nesse sentido, a ideia principal que permeia esse trabalho será o aumento da captação de energia solar incidente em um painel FV através do rastreamento solar em sistemas sem concentração de radiação. Sistemas com concentração são mais indicados para áreas com alto percentual de dias de céu claro e presença mínima de fumaça e poeira (LOVEGROVE; STEIN, 2012). Além disso, de modo oposto aos sistemas FV planos, não são aptos para coletar radiação solar difusa.

Cabe observar ainda que os maiores obstáculos para tornar a energia fotovoltaica competitiva em relação às fontes de energia convencionais são três (OCHIENG, 2010): a baixa eficiência relacionada à produção de energia por área ocupada, o alto custo dos materiais constituintes e, finalmente, a variabilidade da produção (MARKVART; CASTAÑER, 2003), que se correlaciona com as condições meteorológicas do local.

1.2 Caracterização do Problema

Um painel solar, para obter uma maior potência de saída deve, entre outros requisitos, situar-se em um plano cuja posição seja perpendicular aos raios solares incidentes. Isso decorre do fato de a energia coletada pelo painel ser proporcional ao cosseno do ângulo entre a normal ao plano e o raio de luz solar (GOSWAMI; KREITH; KREIDER, 2000). Quanto menor esse ângulo maior a absorção, portanto ela será máxima quando esse ângulo for nulo. A Figura 1 ilustra essa geometria para um coletor plano situado na posição horizontal, onde o cosseno do ângulo θ representa esse fator de proporcionalidade. Na verdade, a componente do vetor de irradiância na direção da normal ao plano é que será a responsável pela absorção, sendo esse outro modo de interpretar o fenômeno.

Figura 1 – O raio solar e o ângulo de absorção da radiação pelo coletor



Pelo que foi exposto, existe vantagem no aspecto de ganho energético ao acompanhar a trajetória do Sol para obter essa condição. Isso foi confirmado por Lee (LEE *et al.*, 2009) em um trabalho de revisão de sistemas de rastreamento solar, cuja conclusão estabeleceu que tais sistemas conseguem coletar uma quantidade expressivamente maior de energia quando comparados aos sistemas de posição fixa. Do ponto de vista do observador na Terra, na medida em que se acompanha o percurso do Sol no hemisfério na direção leste-oeste, é necessário movimentar o painel focalizando sua luz. O propósito é o de manter o ângulo de incidência dos raios solares o mais próximo possível de 90° em relação ao plano da superfície desse painel. Para atingir esse objetivo, conforme será abordado posteriormente, existem diversas proposições de sistemas de rastreamento solar com variações tanto em suas características mecânicas, quanto em seus parâmetros de acompanhamento. A resposta de saída, no que se refere à sua eficiência de captação energética, dependerá não apenas das características físicas do material do painel, mas também de cada concepção de acompanhamento adotada. Assim, é importante saber quais métodos de rastreamento solar são mais eficientes e quais são suas eficiências, levando-se em consideração a localização geográfica, bem como a variação climática e atmosférica local. A questão meteorológica é fundamental dentro dessa análise e suas características se farão sentir ao longo do experimento.

1.3 Objetivos

São os objetivos:

- Projetar, construir e testar um arranjo multi rastreador com controle em malha fechada;
- Avaliar as estratégias propostas de rastreamento solar de um módulo FV plano.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Definições

Existem algumas definições importantes no decorrer da leitura, e por essa razão serão apresentadas a seguir:

- Radiação direta: é aquela recebida diretamente do Sol sem ter sido espalhada pela atmosfera (DUFFIE; BECKMAN, 2006);
- Radiação difusa: é a recebida do Sol após sua direção ter sido mudada por espalhamento pela atmosfera (DUFFIE; BECKMAN, 2006);
- Radiação solar total: é a soma das radiações direta e difusa sobre uma superfície. A medida mais comum de radiação constitui a radiação total sobre uma superfície horizontal, frequentemente referida como radiação global sobre uma superfície (DUFFIE; BECKMAN, 2006);
- Irradiância (W/m^2): é a taxa na qual a energia radiante incide sobre uma superfície por unidade de área da superfície (DUFFIE; BECKMAN, 2006);
- Irradiação (J/m^2): é a energia incidente por unidade de área em uma superfície, obtida por integração da irradiância em um intervalo de tempo específico, normalmente uma hora ou um dia (DUFFIE; BECKMAN, 2006);
- Sistemas de controle em malha fechada: são frequentemente referidos como sistemas de controle com realimentação. Na prática, os termos “controle com realimentação” e “controle em malha fechada” são usados de modo alternativo. Em sistemas de controle de malha fechada, o sinal de erro, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de realimentação (que pode ser o próprio sinal de saída ou função dele incluindo sua derivada ou integral), é introduzido no controlador de forma a reduzir o erro e trazer a saída do sistema ao valor desejado. O termo controle em malha fechada sempre implica uma ação de controle por realimentação com o objetivo de reduzir o erro do sistema (OGATA, 2010);
- Sistemas de controle em malha aberta: são aqueles no qual a saída não tem efeito na ação de controle. Em outras palavras, nesses sistemas a saída não é medida ou não é realimentada para comparação com a entrada. Um exemplo prático está em uma máquina de lavar. Todas as operações de lavagem são executadas em uma base de

tempo. A máquina não mede a saída do sinal que seria o nível de limpeza das roupas (OGATA, 2010);

- *Hardware*: compreende genericamente vários dispositivos eletrônicos associados a computadores, tais como mouse, disco rígido, memórias e processadores (DEITEL; DEITEL, 2013). Essa definição tem sido estendida para designar as partes eletrônicas, eletromecânicas e mecânicas de outros dispositivos e equipamentos;
- *Firmware*: programa ou dados de computador que podem ser armazenados permanentemente em um chip de memória (LAUREANO, 2006). No caso desse trabalho, conforme será abordado posteriormente, foi desenvolvido um programa (*software*) e depois armazenado na memória flash do microcontrolador PIC18F4620, passando a *firmware* do dispositivo rastreador.

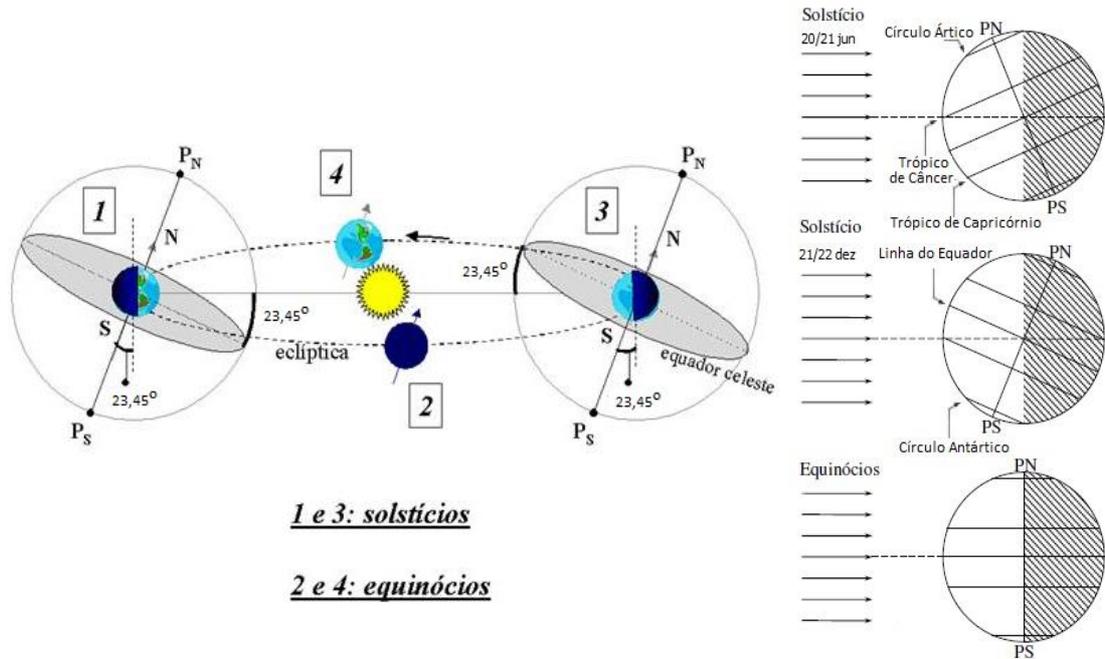
2.2 Geometria Solar

Uma rápida incursão no que diz respeito aos vetores de irradiância Sol-Terra será útil na proporção em que muitos elementos e parâmetros usados nas descrições ao decorrer do texto farão uso desses conhecimentos.

A Terra revoluciona ao redor do Sol em um período de, aproximadamente, 365,25 dias, em uma órbita elíptica e a uma distância média de cerca de $1,496 \times 10^{11}$ m, definida como uma unidade astronômica (1AU). O plano dessa órbita é denominado de plano da eclíptica. A declinação solar, usualmente representada pela letra grega delta minúscula (δ), é definida como o ângulo formado entre o plano do equador e a reta que passa entre os centros da Terra e do Sol. Durante o solstício de inverno (20/21 de junho) a declinação é de $+23,45^\circ$, ao passo que durante o solstício de verão (21/22 de dezembro) seu valor é de $-23,45^\circ$. Porém, durante os equinócios de primavera (20/21 de março) e outono (22/23 de setembro), a declinação é zero. Percebe-se, então, que $-23,45^\circ \leq \delta \leq +23,45^\circ$. A declinação solar tem valor igual à diferença entre a latitude local e o ângulo que o Sol faz com a vertical ao meio-dia solar local. Portanto, pode-se dizer que, a cada dia, a declinação solar tem valor igual ao da latitude para a qual o Sol está na vertical ao meio-dia solar. Assim, se naquela coordenada geográfica, ao meio-dia solar, os raios solares estiverem na vertical, o cálculo da declinação terá um valor correspondente ao da latitude nesse ponto. Os trópicos de Câncer, $23,45^\circ$ N, e de Capricórnio, $23,45^\circ$ S, limitam as latitudes em que o Sol passa pela vertical pelo menos uma vez por ano. Acima das latitudes dos Círculos Polares Ártico ($66,55^\circ$ N) e Antártico ($66,55^\circ$ S),

o Sol não nasce pelo menos uma vez por ano. A Figura 2 mostra a visão espacial do plano orbital bem como o ângulo de incidência da radiação solar com a variação da declinação ao longo das estações.

Figura 2 – O sol, as estações e o ângulo de incidência da radiação



A seguir, são apresentadas duas figuras geométricas importantes para o entendimento visual dos vetores de irradiância e da normal a um plano FV inclinado, bases das operações matemáticas que serão utilizadas nesse trabalho. A Figura 3 mostra um sistema de coordenadas para o cálculo de ângulos de incidência de raios solares sobre um plano coletor considerando a rotação da Terra. O eixo x aponta para o meio-dia solar. O eixo y aponta para o leste, de acordo com o sentido de rotação da Terra representado no desenho. Um versor na direção e sentido de y apontaria perpendicularmente para o plano do desenho (na horizontal) em sentido descendente. O eixo z é o eixo de rotação da Terra, em que o norte é representado por valores positivos. A variável λ é a latitude do local, que, de acordo com a convenção, assume valores positivos para o hemisfério norte e negativos para o hemisfério sul. A declinação solar é representada por δ e a inclinação da normal ao plano coletor (em relação à horizontal) por β . A variável β'_0 representa a elevação da normal ao plano coletor em relação ao plano equatorial, que é visto de perfil através do eixo x. Assim, $\beta'_0 = \lambda - \beta$. Para manter compatibilidade com os desenvolvimentos no livro de Rabl (RABL, 1985), define-se o parâmetro $\beta_0 = -\beta'_0 = \beta - \lambda$, que estará presente em várias expressões matemáticas ao

longo do texto. A variável ω , por sua vez, representa o ângulo horário solar, igual a zero ao meio-dia solar no meridiano local, negativo antes do meio-dia e positivo após. Cada hora equivale a um arco de 15° relativamente a ω . Por fim, n_c é o vetor unitário normal ao plano coletor, n_s é o vetor unitário na direção do Sol e n_h é o vetor unitário normal à superfície da Terra.

A Figura 4 apresenta um conjunto particular de coordenadas para orientação do raio solar e da normal ao coletor, considerando que esse sistema está localizado na latitude λ . \hat{n}_c é o vetor unitário normal ao plano coletor, β representa a elevação desse plano, Φ o seu azimute, Φ_s o azimute solar, θ_z o ângulo zenital e θ o ângulo entre a normal ao plano e o raio solar. Por convenção, o ângulo azimutal será positivo se estiver a oeste em referência ao sul e negativo de estiver a leste da mesma referência sul.

Figura 3 – Sistema de coordenadas considerando um plano coletor inclinado, o raio solar e a rotação da Terra

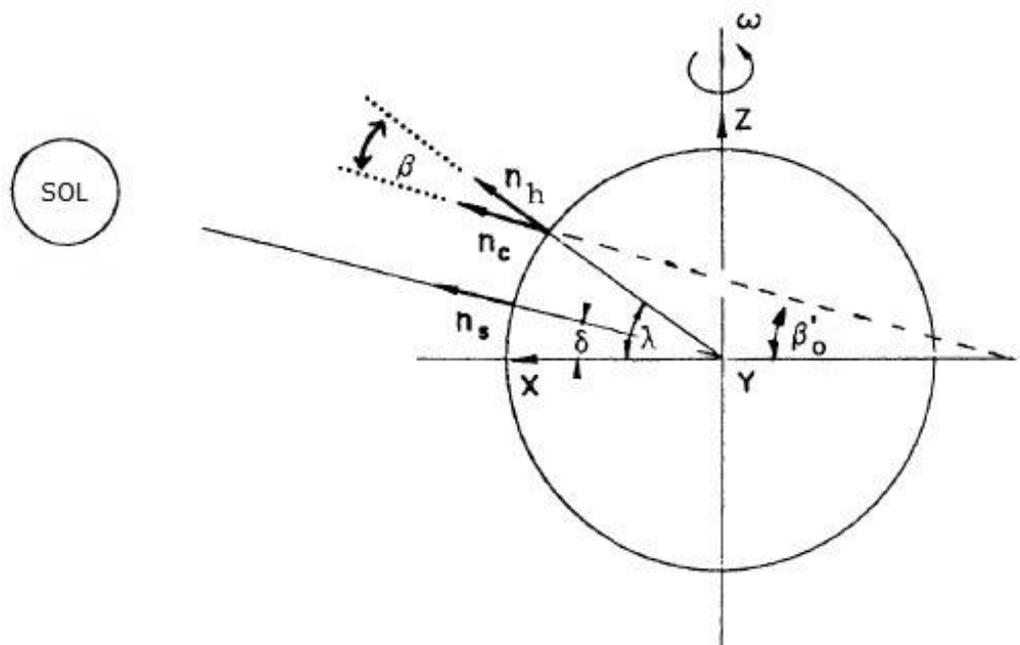
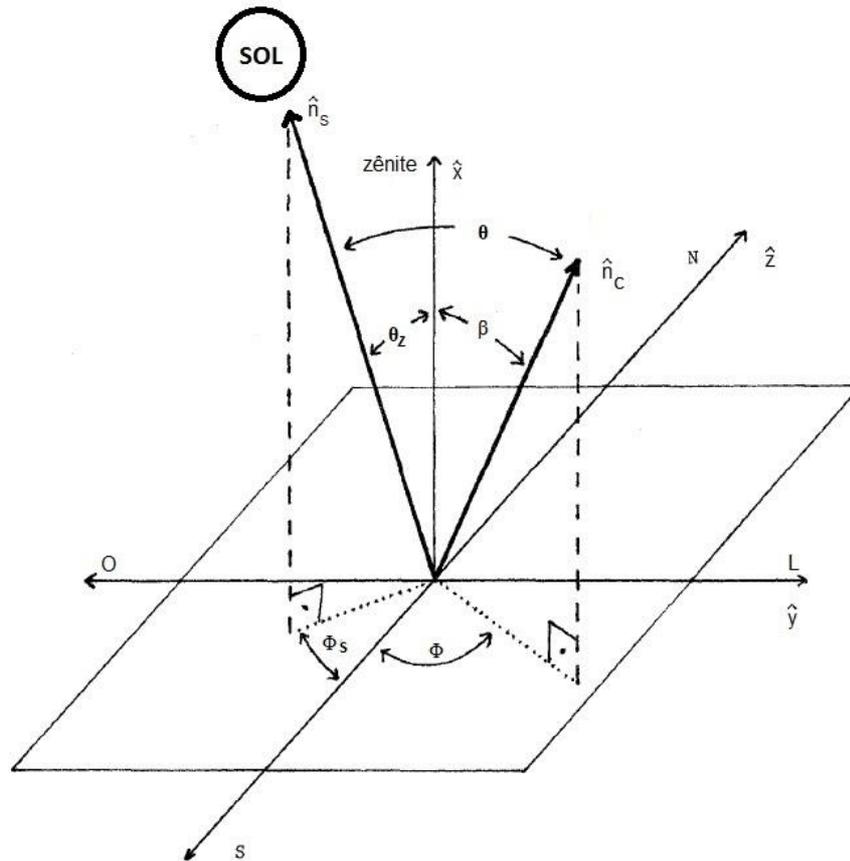


Figura 4 – Sistema de coordenadas particular (para a latitude λ) considerando um plano coletor



Pela Figura 4 e pelas convenções adotadas, pode-se escrever o vetor \hat{n}_c da seguinte forma:

$$\hat{n}_c = (\cos \beta, -\sin \beta \sin \Phi, -\sin \beta \cos \Phi). \quad (2.1)$$

O sinal negativo em $-\sin \beta \sin \Phi$ deve-se ao fato de Φ ser negativo na situação ilustrada na figura e o valor da coordenada \hat{y} ser positivo nesse quadrante.

Através da Figura 3, o vetor do raio solar pode ser escrito conforme a expressão 2.2:

$$\mathbf{n}_s = (\cos \delta \cos \omega, -\cos \delta \sin \omega, \sin \delta) \quad (2.2)$$

Através das expressões em 2.3 pode-se realizar uma rotação do sistema de coordenadas (x,y,z) em torno do eixo y segundo o ângulo λ e, dessa forma, escrever o versor \hat{n}_s nas coordenadas (\hat{x} , \hat{y} , \hat{z}), denominado agora \hat{n}_s :

$$\begin{aligned}\hat{x} &= x \cos (\lambda) + z \sin (\lambda) \\ \hat{y} &= y \\ \hat{z} &= -x \sin (\lambda) + z \cos (\lambda)\end{aligned}\tag{2.3}$$

e

$$\hat{n}_s = (\cos \delta \cos \omega \cos \lambda + \sin \delta \sin \lambda, -\cos \delta \sin \omega, -\cos \delta \cos \omega \sin \lambda + \sin \delta \cos \lambda)\tag{2.4}$$

O produto interno dos versores da normal ao plano \hat{n}_c e do raio \hat{n}_s resulta no cosseno do ângulo entre esses versores de acordo com a expressão 2.5:

$$\begin{aligned}\hat{n}_c \cdot \hat{n}_s &= \cos \theta = \cos \delta \cos \beta \cos \lambda \cos \omega + \sin \delta \sin \lambda \cos \beta + \cos \delta \sin \Phi \sin \beta \sin \omega + \\ &+ \cos \delta \cos \omega \sin \lambda \sin \beta \cos \Phi - \sin \delta \cos \lambda \sin \beta \cos \Phi\end{aligned}\tag{2.5}$$

Além do resultado acima, há um caso particular de extremo interesse. Seja considerado um sistema FV de rastreamento com um (01) eixo na direção norte-sul e com sua normal inclinada (em relação à horizontal) segundo um ângulo β . Para manter o ângulo de rotação do painel em foco e sincronizado com a projeção dos raios solares sobre o plano perpendicular ao eixo de rotação, é necessário que (Rabl, 1985):

$$\tan \psi_{NS} = \sin \omega / (\cos \omega \cos \beta_0 - \tan \delta \sin \beta_0)\tag{2.6}$$

e

$$\cos \theta_{NS} = \cos \psi_{NS} (\cos \delta \cos \omega \cos \beta_0 - \sin \delta \sin \beta_0) + \sin \psi_{NS} \cos \delta \sin \omega\tag{2.7}$$

Em que:

- ψ_{NS} = ângulo do eixo de rotação que move o painel FV de leste para oeste acompanhando o sol. O índice NS, na verdade, refere-se à direção norte-sul do eixo de rotação (contido no plano XZ da Figura 3);
- θ_{NS} = ângulo do raio solar com a normal ao painel FV. Na Figura 4 é o ângulo θ ;
- ω , δ , e β_0 são os ângulos já comentados das figuras anteriores.

Após algumas manipulações algébricas e identidades trigonométricas, pode-se reescrever a identidade da equação 2.7 da seguinte forma:

$$\cos \theta_{NS} = \cos \delta \sqrt{\sin^2(\omega) + [\cos(\beta - \lambda) \cos(\omega) - \tan \delta \sin(\beta - \lambda)]^2} \quad (2.8)$$

O desenvolvimento matemático a seguir será essencial à compreensão dos fundamentos desse trabalho. Particularizando o caso acima para uma montagem polar (onde $\beta = \lambda$), pela equação 2.8, resulta que:

$$\cos \theta_{NS} = \cos \delta \quad (2.9)$$

O que implica, nesse caso, a identidade $\theta_{NS} = \delta$. Assim, o ângulo que os raios solares fazem com a normal ao absorvedor FV ao longo do dia será a própria declinação do Sol naquele instante. Além disso, pela equação 2.6, como outra consequência (de $\beta = \lambda$):

$$\tan \psi_{NS} = \tan \omega$$

$$\text{ou seja, } \psi_{NS} = \omega \quad (2.10)$$

Enfim, o resultado acima mostra que, para uma configuração de construção polar do rastreador, o ângulo de acompanhamento ψ_{NS} será o próprio ângulo solar ω . Mais ainda, dada a igualdade entre θ_{NS} e a declinação δ , o cosseno do ângulo θ_{NS} (entre o raio solar e a normal ao painel) percorre durante um ano o intervalo entre 0,917 e 1, assumindo o valor médio de

0,972. Então, considerando apenas o ponto de vista geométrico e desprezando importantes fatores relacionados à atmosfera, a montagem polar iria perder apenas 2,8% do valor total da energia recebida pelo mesmo sistema caso utilizasse 2 eixos para rastreamento (assumindo nenhuma perda por geometria). É importante frisar que o resultado do valor médio do cosseno do ângulo θ_{NS} é calculado tendo em vista sua posterior multiplicação por um valor constante referente ao módulo do vetor de irradiância. Entretanto, na realidade, esse módulo não é constante ao longo do ano e sofre flutuações tanto em decorrência da pequena excentricidade da órbita do planeta, aproximadamente 0,01673, como também pelos fenômenos físicos que envolvem a geração de energia solar luminosa eletromagnética expressa pela irradiância. Assim, a componente média do vetor irradiância (na direção normal ao plano) ao longo do ano deveria com mais rigor ser o valor médio do produto entre o módulo desse vetor (considerando suas flutuações) pelo cosseno do ângulo θ_{NS} , que é função de δ para o caso polar.

2.3 Tipos de Rastreadores Solares

Há, atualmente, sistemas de rastreamento de diversos tipos que variam em termos de complexidade, funções e custos, podendo ser classificados de acordo com vários critérios (MOUSAZADEH *et al.*, 2009). Inicialmente, seu movimento pode ser classificado como passivo, composto apenas de partes mecânicas, ou ativo (eletromecânico), formado por motores e engrenagens. Dentro do tipo de movimento rotacional, podem ser classificados como os que utilizam um único eixo (passivos e ativos) ou com dois eixos (somente ativos). Rastreadores com dois eixos têm, por consequência, dois graus de liberdade. Esses eixos são normalmente perpendiculares entre si. O eixo que se mantém fixo em relação ao solo pode ser denominado de eixo primário. O segundo eixo, que está posicionado em relação ao primeiro, é chamado de secundário. Os módulos FV nesses sistemas estão tipicamente orientados em paralelo ao eixo secundário.

Quanto aos rastreadores solares ativos, esses também podem ser classificados de acordo com as seguintes tecnologias eletrônicas: as que utilizam microprocessadores e sensores óticos eletrônicos, as controladas via PC (baseadas em data e hora), aquelas baseadas em células solares bifaciais e outras como combinação das anteriores. Essas tecnologias incluem dispositivos puramente analógicos ou então associados a circuitos digitais, sejam microprocessados ou não.

No tocante ao movimento associado ao processo de rastreamento, é importante observar que existem várias soluções e estratégias classificadas de acompanhamento com um e dois eixos (GIL *et al.*, 2009). Estão relacionadas abaixo as mais usadas que serão detalhadas nos próximos subtópicos:

- Rastreador com um eixo e montagem polar;
- Rastreador com eixo vertical ou azimutal;
- Rastreador com eixo horizontal;
- Rastreador com dois eixos e montagem *tip-tilt*;
- Rastreador com dois eixos e montagem azimutal.

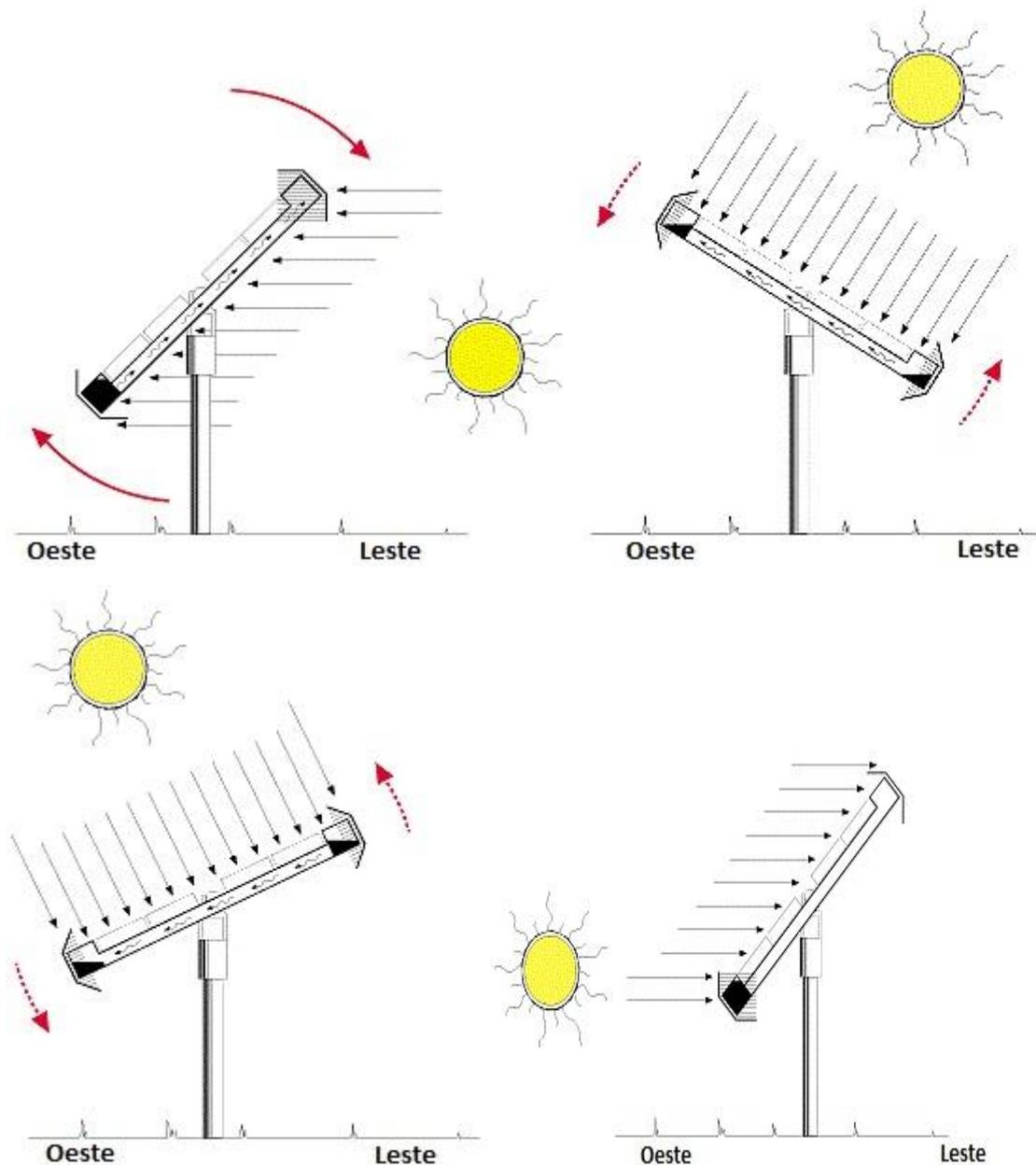
2.3.0 Rastreadores Passivos

Os rastreadores solares passivos baseiam-se na expansão térmica de uma substância de baixo ponto de vaporização (gás freon) ou em uma liga com memória de forma. Através do uso desse tipo de liga, mais especificamente do uso de uma fita bimetálica, existe o potencial, segundo modelagem computacional, para aumentar a eficiência do sistema FV em até 23% (CLIFFORD; EASTWOOD, 2003). O sistema projetado para funcionamento com o gás freon faz uso de dois reservatórios montados nas extremidades do painel e conectados entre si por uma tubulação. É colocada sobre os reservatórios uma estrutura de sombreamento adequada para permitir uma situação de equilíbrio diante da incidência normal dos raios solares. Em outras palavras, atuando como um motor a vapor de rotação muito lenta, pode-se pensar em cada reservatório a trabalhar em oposição mútua na direção leste-oeste: o reservatório que receber maior incidência ou intensidade de radiação solar, ao transformar seu líquido em vapor (que percorre o tubo que une os reservatórios), transfere essa massa gasosa para o outro reservatório onde, por estar mais frio, volta a se liquefazer. Essa transferência de massa, enfim, estabelece o ponto de equilíbrio momentâneo da rotação mecânica. A Figura 5 ilustra o ciclo diário de rastreamento.

Esse dispositivo apresenta alguns inconvenientes. A espera pela transferência de massa entre os reservatórios ocasiona uma latência refletida no tempo de resposta à variação angular do raio solar. Isso resulta em atrasos e erros de rastreamento. Diante de situações de nebulosidade, o sistema irá parar de rastrear até o retorno da radiação direta. Se essa intermitência for frequente durante determinado dia, o erro de rastreamento deverá

aumentar e o sistema não será capaz de aproveitar de forma eficaz os intervalos de incidência de radiação direta.

Figura 5 – Rastreador passivo



2.3.1 Rastreador com Um Eixo e Montagem Polar

Os rastreadores de eixo único com montagem polar são dispositivos com um eixo fixo segundo a orientação N-S e disposto em um ângulo de inclinação apropriado, igual à latitude

do local (Figura 6). O nome polar decorre justamente desse alinhamento com o eixo que passa pelos polos da Terra. Dessa forma, os raios solares permanecem perpendiculares ao absorvedor durante os equinócios de primavera e outono. Em outros dias do ano, há um desvio angular em relação aos equinócios que assume valor máximo de pico nos solstícios de verão e inverno. Esses tipos de rastreadores são relativamente simples, mas ainda assim resultam, em teoria, num considerável incremento na eficiência da taxa de captura de energia solar quando comparado a estruturas fixas. Convém lembrar, conforme foi mencionado, que a energia média coletada em um ano, por análise de natureza geométrica, fica 2,8% abaixo daquela recebida por um sistema de rastreamento com dois eixos.

Figura 6 – Rastreador polar

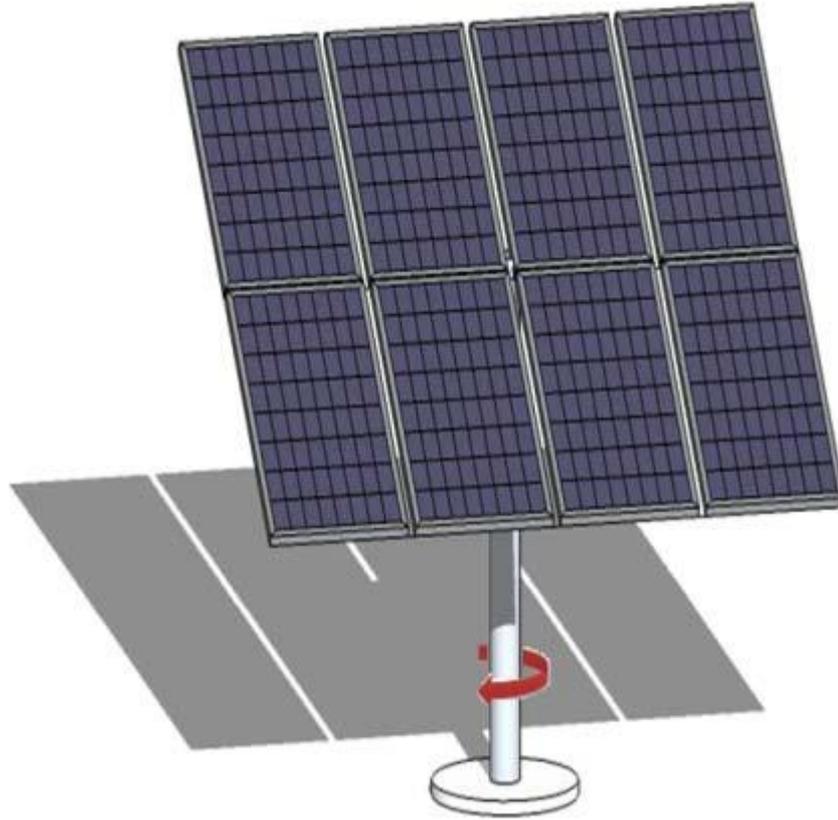


2.3.2 Rastreador com Um Eixo Vertical ou Azimutal

Nesse tipo de rastreador, a estrutura gira em torno de um eixo vertical, conforme a Figura 7. Por apresentar uma mecânica mais simples e robusta, essa estrutura tem sido usada mais frequentemente em muitos casos, visto que essa vantagem compensa menores níveis de radiação coletada (em relação ao rastreamento total em dois eixos). A elevação do coletor pode ser selecionada através de simulações em computador que consideram o desempenho de absorção durante o período de interesse (MEHRTASH *et al.*, 2012). Em parques solares é

preciso considerar a questão do espaçamento e inter-sombreamento (entre painéis) para um dimensionamento adequado de todo o sistema (LORENZO et al.,).

Figura 7 – Rastreador vertical ou azimutal

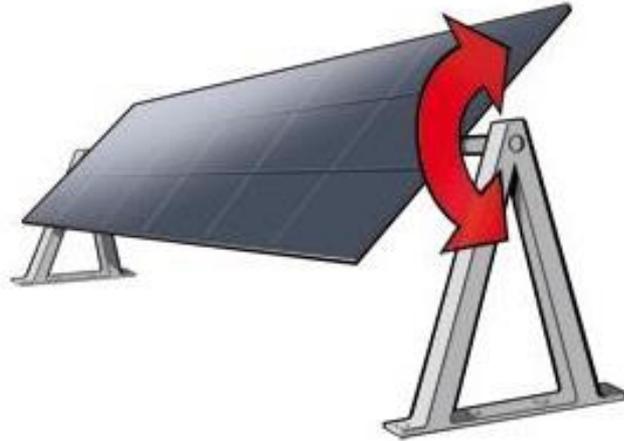


2.3.3 Rastreador com Um Eixo Horizontal

Em se tratando desse outro tipo de rastreador, o mecanismo tem um eixo horizontal que age como um pivô para o painel, permitindo, desse modo, um rastreamento diário (leste-oeste) ou sazonal (norte-sul). São dispositivos simples, conforme se pode observar na Figura 8. Além dessa simplicidade, suas maiores vantagens estão na instalação econômica e nos custos extremamente baixos de manutenção. Embora o aumento de eficiência não seja tão significativo quando comparado a outros tipos de rastreadores, esse tipo representa uma opção interessante para instaladores que desejam evitar grandes investimentos e ainda pretendem aumentar a eficiência total do sistema de captação de energia solar. Além do mais, diferentemente da maioria dos outros sistemas de rastreamento, não é exigido um rastreamento automático quando se considera que o rastreamento será apenas na direção norte-sul levando-se em conta a variação da declinação solar. Pode-se ter um conjunto de posições pré-fixadas, o que possibilitará ao operador realizar o ajuste manual dos ângulos do

painel em épocas determinadas por datas ao longo do ano. Isso também equivale a diminuir custos de instalação e manutenção, tornando-se outro aspecto vantajoso.

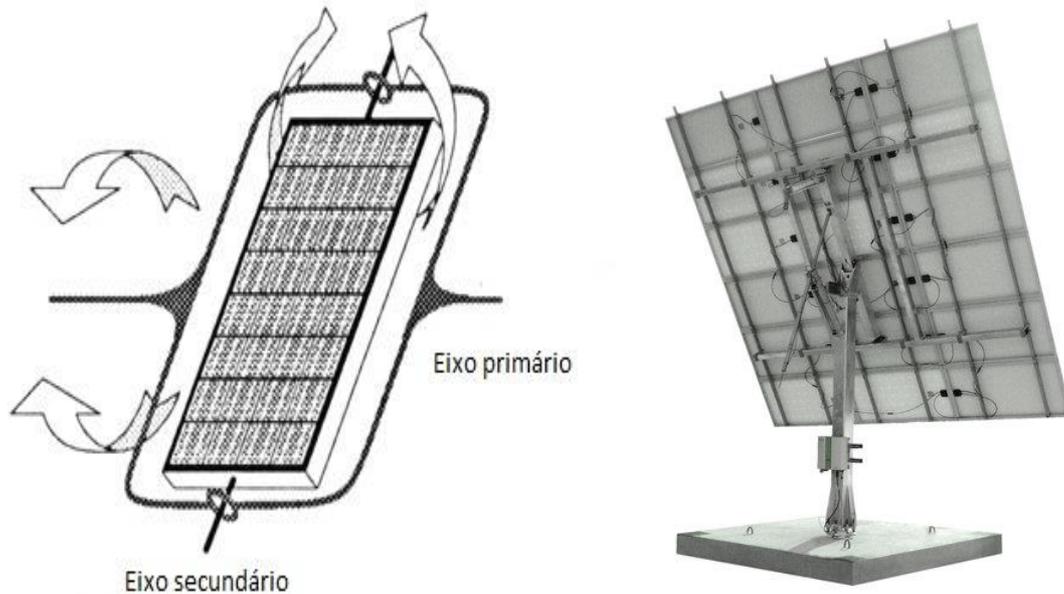
Figura 8 – Rastreador com um eixo horizontal



2.3.4 Rastreador com Dois Eixos e Montagem *Tip-Tilt*

Esse tipo está associado ao rastreamento onde o eixo primário encontra-se na horizontal e sobre o qual é montado o eixo secundário, normalmente perpendicular ao primário (Figura 9). Em comparação com o sistema polar de um eixo, essa estrutura permite corrigir a diferença angular sazonal que se reflete no ângulo de declinação solar, de forma que é possível um alinhamento com os raios solares dentro das limitações do sistema eletromecânico. Os painéis aqui são fixados sobre uma estrutura que é solidária ao segundo eixo.

Figura 9 – Rastreador com dois eixos (*Tip-Tilt*)



2.3.5 Rastreador com Dois Eixos e Montagem Azimutal

Nesse caso, o eixo principal é vertical e está associado ao azimute (Figura 10). O segundo eixo, também denominado de eixo de elevação, é tipicamente perpendicular ao primeiro. Seu funcionamento é similar ao da montagem anterior, mas ambos diferem no modo em que o conjunto de painéis faz sua rotação diária. Ao invés de girar os painéis sobre um eixo que se encontra no topo da estrutura, a rotação é feita sobre um acoplamento no eixo vertical que funciona sobre rolamentos. Sua principal vantagem sobre a estrutura anterior é que a distribuição do peso sobre os rolamentos permite suportar uma quantidade maior de painéis do que ocorre no outro caso, quando o peso fica distribuído apenas sobre um eixo. Por outro lado, sua desvantagem é que exige uma maior área livre sem outros rastreadores, sob pena de haver o problema de inter-sombreamento durante o rastreamento diário.

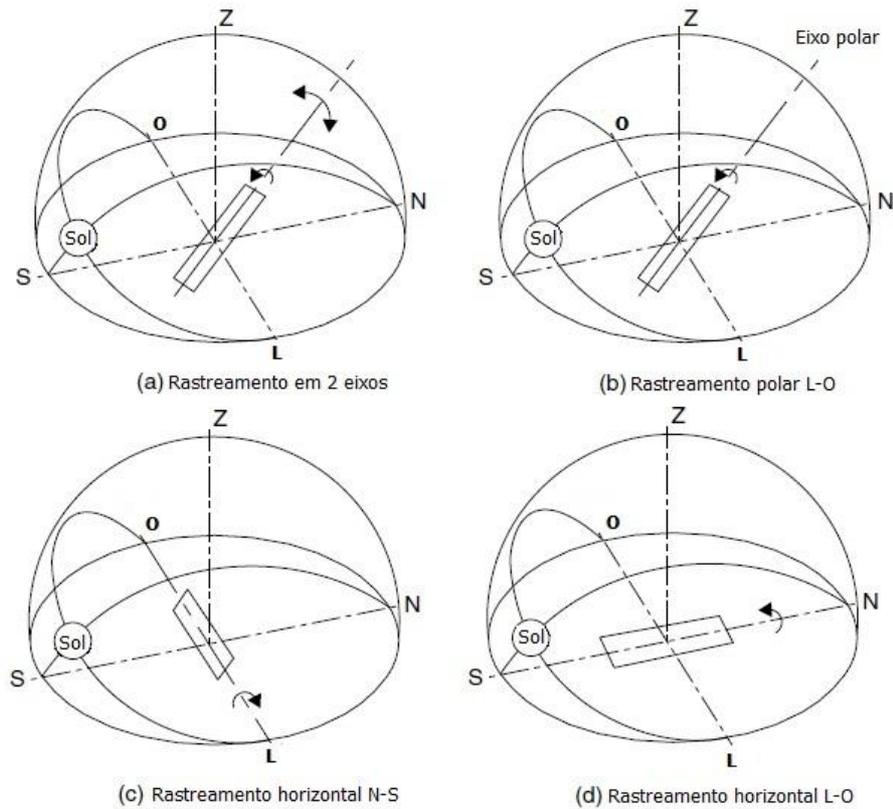
Figura 10 – Rastreador com dois eixos, montagem azimutal



2.4 Comparações entre Modos de Rastreamento

Para auxiliar na compreensão dos estudos, uma visão espacial comparativa dos quatro modos de rastreamento foi esquematizada na Figura 11. A Figura 11-a refere-se ao rastreamento em dois eixos e o desenho ilustra a rotação realizada pela montagem Tip-Tilt, com movimentos na direção norte-sul e leste-oeste. Na montagem polar abordada na Figura 11-b, a capacidade de se movimentar segundo a direção norte-sul é suprimida e o ângulo nessa direção é fixado de acordo com a latitude do local, como já foi discutido. A rotação permitida ocorre entre o leste e oeste, acompanhando a trajetória diária do Sol. Os dois últimos exemplos de rastreamento da Figura 11 referem-se ao rastreamento horizontal, seja ele sazonal (na direção norte-sul) ou diário (leste-oeste).

Figura 11 – Visão espacial de quatro modos de rastreamento



Como exemplo de captação de energia associada aos diferentes modos de rastreamento, são mostrados na Tabela 1 (KALOUGIROU, 2009) os resultados para uma situação específica de rastreamento em uma latitude 35° norte. Foram colocados alguns dos sistemas de rastreamento aqui apresentados e considerados os solstícios de verão e inverno, bem como os equinócios. Todos os modelos são comparados com o rastreamento total, que coleta o máximo possível de energia, apresentado como 100%. Dessa tabela percebe-se que, para o rastreamento com um eixo nas condições daquele experimento, o modo polar e aquele com orientação norte-sul horizontal são os mais vantajosos, visto que suas performances são as que mais se aproximam de 100%. Contudo, no segundo caso é preciso acautelar-se com seu baixo desempenho durante o inverno (60,9%), pois esse representa o rastreamento que mais reduz a captação de energia durante essa estação.

Tabela 1 – Comparação entre modos de rastreamento

Métodos de Rastreamento	Energia Solar Recebida (Kwh/m ²)			Porcentagem para Rastreamento Completo		
	E	SV	SI	E	SV	SI
Rastreamento Completo	8,43	10,60	5,70	100	100	100
L-O Polar	8,43	9,73	5,23	100	91,7	91,7
N-S Horizontal	7,51	10,36	4,47	89,1	97,7	60,9
L-O Horizontal	6,22	7,85	4,91	73,8	74,0	86,2

Notas: E=Equinócio, SV=Solstício de Verão, SI=Solstício de Inverno, LAT=35°N

Em outro trabalho (MEHRTASH *et al.*, 2012), foram simulados conjuntos de painéis solares em 4 montagens diferentes: uma montagem fixa horizontal, fixa com inclinação igual à latitude (montagem polar), com rastreamento azimutal em um eixo (ângulo de inclinação de 55°) e com rastreamento em dois eixos. As simulações foram executadas por meio do programa PVSOL Pro para avaliação diária, mensal e anual, considerando a localização e as condições climáticas de Montreal, Canadá. O ângulo anterior de 55° foi calculado pelo programa como um valor anual ótimo para a elevação fixa do painel na montagem azimutal. Cada sistema consistia em 48 módulos FV com potência total de 11,04KW. Três inversores de 4,6KW foram incluídos para converter a corrente elétrica DC em AC.

Os resultados das simulações estão apresentados na Tabela 2. A análise da quantidade anual de energia (da radiação incidente) demonstra, em relação à posição horizontal fixa, acréscimos de 16,8%, 50,1% e 55,7% para a posição polar fixa, para o rastreamento azimutal em um eixo e para o rastreamento em dois eixos, respectivamente. Em outra comparação com a posição horizontal fixa, haveria um aumento da produção de energia de 23,22%, 65% e 71% em relação à posição polar fixa, ao rastreamento azimutal e ao rastreamento em dois eixos, respectivamente. Nota-se que os aumentos percentuais anteriores da radiação incidente e da produção de energia não são iguais uma vez que a correlação entre radiação incidente e eficiência não é linear. Além disso, observa-se que o rastreamento azimutal em um eixo e o rastreamento em dois eixos foram aqueles que apresentaram maiores eficiências.

Conforme a referida tabela, esse estudo ainda faz inferências para a energia total que incide sobre cada montagem em três dias típicos: nublado, de céu claro no inverno e de céu claro no verão. Em dias nublados todas as montagens são praticamente equivalentes, embora

as posições fixas horizontal e polar, como se poderia pensar pela predominância de radiação difusa, tenham apresentado os maiores valores diários. Observa-se uma inversão referente à superioridade de energia coletada para um dia típico de céu claro no verão e no inverno em relação às montagens fixas horizontal e polar. A explicação para esse resultado decorre da diferença de ângulos entre essas montagens, em que a montagem polar fixa, inclinada 55° a partir da horizontal em direção ao sul, claramente favorece a coleta de energia durante os meses de inverno em Montreal. No verão do Canadá, por outro lado, com o Sol privilegiando o hemisfério norte, a montagem horizontal fixa obtém mais energia que a polar fixa.

Com base nos resultados dessa tabela, esse trabalho concluiu que a melhor estratégia para rastreamento foi aquela com dois eixos para a condição de céu claro. E em condições de céu nublado, essa estratégia deveria se colocar na posição horizontal. Entretanto, é salientado que a estratégia de rastreamento em dois eixos receberia anualmente apenas 3,7% a mais de energia que a estratégia de acompanhamento azimutal em um eixo que, por sua vez, representaria um menor custo inicial, maior simplicidade de funcionamento e menores custos de manutenção.

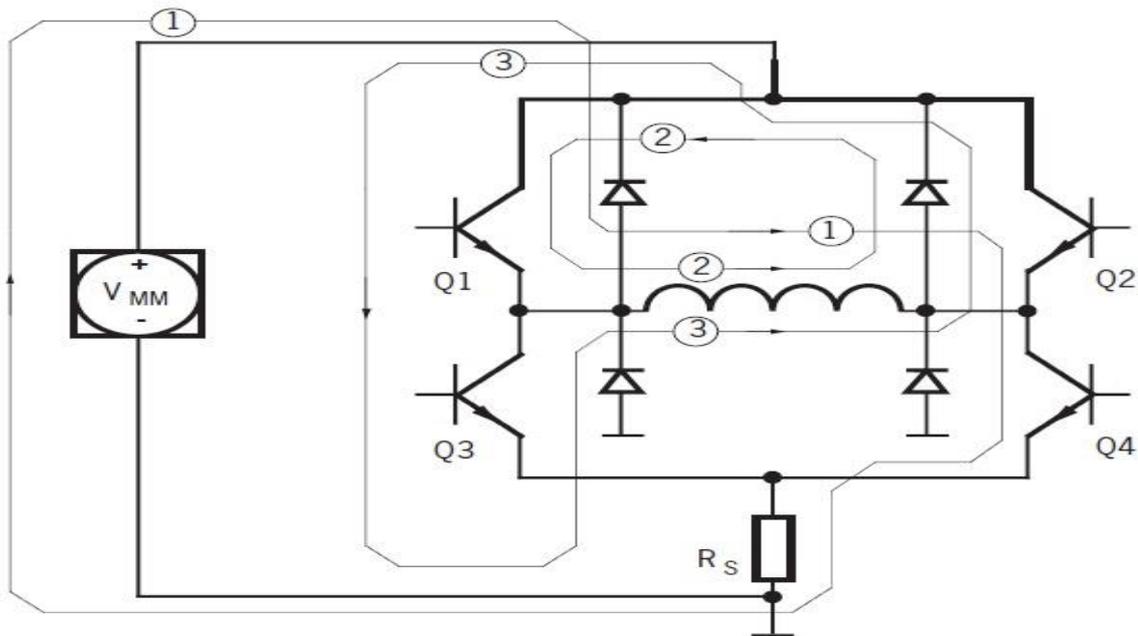
Tabela 2 – Resultados simulados para modos de rastreamento

Montagem	Energia Anual (Radiação Incidente) (MWh)	Produção anual de Energia (MWh)	Eficiência de (%)	Energia: Dia Nublado (KWh)	Energia: Inverno, Dia de Céu Claro (KWh)	Energia: Verão, Dia de Céu Claro (KWh)
Horizontal Fixa	104,5	11,6	11	31,4	200,6	659
Polar Fixa	122,1	14,3	11,7	30,8	486,4	586
Rastreamento Azimutal em um eixo	156,9	19,1	12,2	30,4	585,7	910
Rastreamento em dois eixos	162,7	19,9	12,2	29,3	623,8	954

2.5 Rastreador em um Eixo com Controle Microprocessado

Citando, entre suas referências, um dos estudos comentados no próximo tópico, um trabalho incluído no V Congresso Brasileiro de Energia Solar apresentou o rastreamento em um eixo usando um kit com microcontrolador (VIEIRA *et al.*, 2014). O eixo de rotação desse rastreador foi orientado segundo a direção norte-sul em uma montagem horizontal, porém próxima da polar pela sua latitude ($1,45^\circ$ sul). O movimento diário leste-oeste compreendia um ângulo total de rastreamento de $162,1^\circ$. Para realizar a movimentação do painel FV, foi empregado um conjunto motorreductor alimentado com 12V. A gravação de dados de saída consistiu no ângulo e horário das medições realizadas. Para tanto, foi incluído um relógio de tempo real (chip RTC) e uma placa com memória flash. O acionamento do motor e o controle do sentido de rotação do eixo foram implementados através de um circuito denominado ponte H. Abaixo, outra ponte H, similar ao desse trabalho, encontra-se ilustrada na Figura 12. Contudo, os quatro diodos de recirculação de corrente presentes nesta figura não foram incluídos no circuito do rastreador, de modo que sua falta poderia ocasionar danos aos transístores.

Figura 12 – Circuito conhecido como ponte H



O sistema de alinhamento com os raios solares foi construído a partir de dois LDR's (resistores dependentes de luz) separados por uma superfície perpendicular a ambos com a

função de causar sombreamento em um desses sensores na condição de desalinhamento. O ângulo de posicionamento do painel foi medido por intermédio da saída de tensão da derivação central de um potenciômetro linear acoplado ao eixo de rotação. Previamente executou-se um procedimento de calibração manual desse potenciômetro. A análise posterior dos resultados em planilha demonstrou um comportamento linear através do qual se extraiu uma equação relacionando o ângulo do eixo com a tensão medida do potenciômetro. A necessidade de recalibrar manualmente o sistema durante o uso não foi discutida.

Por fim, concluiu-se que o rastreamento foi realizado de forma satisfatória. Não foi discutido o desvio angular relacionado ao rastreamento diário (com seus valores médios e máximos) ou ao longo do período de medições em condições de céu claro, de tempo instável ou nublado. Os ganhos de energia nessas situações de céu claro ou nublado também não foram mencionados. O uso de um potenciômetro para leitura do ângulo de inclinação também foi usado por Shingleton (SHINGLETON, 2008), mas nesse estudo, apesar da precisão ter sido considerada suficiente, foi posteriormente substituído por um sensor de inclinação para assegurar maior confiabilidade a longo prazo.

2.6 Experimentos com Rastreadores em Um Eixo

Sistemas de rastreamento em um eixo para comparação do ganho em relação a sistemas fixos já foram alvo de dissertações de mestrado no DEN. Apesar de não terem se beneficiado pelo auxílio de microcontroladores, esses trabalhos pioneiros conseguiram obter êxito ao alcançarem desvios de posicionamento dentro das expectativas desejadas. Ainda mais importante, foi demonstrar a eficácia do sistema de rastreamento proposto quando houve condições meteorológicas favoráveis. É importante observar o desempenho desses sistemas juntamente com as dificuldades gerais, as soluções encontradas e as sugestões propostas.

Em um deles, a avaliação ocorreu durante os meses de maio e junho de 2006 (OLIVEIRA, 2007). Foram então relatados dias com tempo bastante instável e desfavorável para sistemas de rastreamento, com alternância entre situações de céu claro ou nublado. Diante da preponderância de radiação difusa em certas ocasiões, como seria de se esperar, o sistema avaliado não apresentou ganho de energia em relação ao sistema fixo. Observa-se, pelos resultados apresentados, que o intervalo dos dias avaliados começou às 05:00, terminando um pouco após às 17:00. Para medir a radiação incidente e seu consequente ganho relativamente às posições polares fixa e móvel, foram utilizados piranômetros, dispositivos de

alta sensibilidade e linearidade. Não foi mencionada comparação da produção de energia do painel do rastreador em relação à produção de um segundo painel em posição fixa. A energia produzida pelo painel do rastreador foi usada para o funcionamento dos circuitos e motor.

Baseado em um circuito analógico e motor de corrente contínua, o sistema apresentou diferentes erros de posicionamento associados a situações de tempo nublado ou de céu claro. O alinhamento com os raios solares foi obtido por meio de dois sensores conhecidos por LDR's, de modo semelhante ao descrito no tópico anterior. Em condições de alta irradiância, o erro de posicionamento apresentado foi inferior a 1° . Já em situações de tempo nublado, foi relatado um aumento nesse erro devido a atrasos, chegando a $8,5^\circ$. Em outra situação semelhante houve uma parada total do sistema por volta das 15:00 horas devido a essa baixa irradiância, não atingindo então a posição em 70° , onde havia uma chave de fim de curso. As medições dos ângulos de posicionamento foram realizadas manualmente durante o rastreamento, de 10 em 10 minutos, por meio de um instrumento denominado goniômetro (com erro máximo de $0,5^\circ$). Quanto aos intervalos horários dessas medições, esses se situavam, aproximadamente, entre 09:00 e 17:00. Com relação aos ganhos, medições feitas para alguns dias, apresentaram valores entre 15% e 31%, dependendo das condições meteorológicas desse dia. Esses ganhos, comparados a um sistema fixo, foram relativos à montagem polar adotada.

Outro trabalho, com esse mesmo propósito de avaliação de desempenho na captação de energia por rastreamento em um eixo, foi realizado entre os meses de outubro e novembro de 2006 (MONTEIRO, 2007). Aqui as medições pareceram mais privilegiadas em termos meteorológicos e não houve queixas de mau tempo. Como reflexo, entre os dias 24/10 e 13/11 houve o relato de, em um conjunto de seis dias observados, ganhos variando entre 28 e 42,9%. Esses ganhos, em comparação a um sistema fixo, corresponderam a uma montagem não polar (com concentradores do tipo V) e um eixo de rotação na direção norte-sul inclinado para o norte em 23° . Esse experimento utilizou circuitos analógicos e digitais, assim como um motor de corrente contínua para atingir seus objetivos, mas não teve as facilidades características de um sistema microprocessado. Contudo, de modo diferente da abordagem anterior, fez uso das vantagens de baterias e de um carregador. Novamente, os ganhos energéticos foram tomados pela comparação das saídas dos piranômetros utilizados (um no plano fixo e outro no plano do rastreador) e não em relação à produção de energia do painel do rastreador com a de um painel no plano fixo. Quanto aos intervalos de medição, os resultados mostraram o período das 06:00 às 18:00 para avaliação dos ganhos e de, aproximadamente, 10:00 às 17:00 para análise dos erros de posicionamento. Tais erros,

conforme relatado, ficaram dentro de um intervalo de tolerância de $\pm 3^\circ$ quando não havia presença de nuvens, caso esse em que houve discrepâncias e erros maiores. O alinhamento com os raios solares fez uso de montagem semelhante a dos relatos anteriores (à base de LDR's com banda de sombreamento). Houve ainda momentos em que o sistema se adiantou em relação ao sol. Para a medição desses ângulos, voltou a ser utilizado o equipamento manual goniômetro com erro máximo de $0,5^\circ$.

Oliveira (OLIVEIRA, 2007) e Monteiro (MONTEIRO, 2007) propuseram como sugestões para trabalhos futuros, dentre outros pontos:

- A utilização de microcontroladores;
- Melhorias do sistema eletro-mecânico;
- O desenvolvimento de um rastreador solar de alta precisão para instrumentação e aplicações de alta concentração;
- O aperfeiçoamento de um carregador de baterias.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para efeito de concepção da estrutura lógica de funcionamento do rastreador, foi adotada a arquitetura mestre-escravo. Dessa maneira, o processamento mais trabalhoso, cálculos de coordenadas e tudo o que envolveu maior capacidade de processamento foi efetuado no computador mestre pelo seu programa (ou *software*). O hardware do sistema mestre é simples de se visualizar: é composto de uma CPU (um pc desktop ou notebook) e um transceptor de RF (radiofrequência) com uma interface USB através da qual se pode conectar esse transceptor à porta USB da CPU. A partir dessa concepção de funcionamento, as instruções são enviadas ao módulo escravo por meio do *software* residente no mestre. O módulo escravo fica situado em uma caixa de proteção na parte lateral da estrutura do arranjo multi rastreador, apresentado na Figura 14. Juntamente com a Figura 13, essas ilustrações descrevem o arranjo mecânico, a montagem polar adotada e o local escolhido para o experimento.

Figura 13 – Visão lateral do arranjo multi rastreador



Figura 14 – Visão do arranjo multi rastreador com a caixa de proteção do circuito

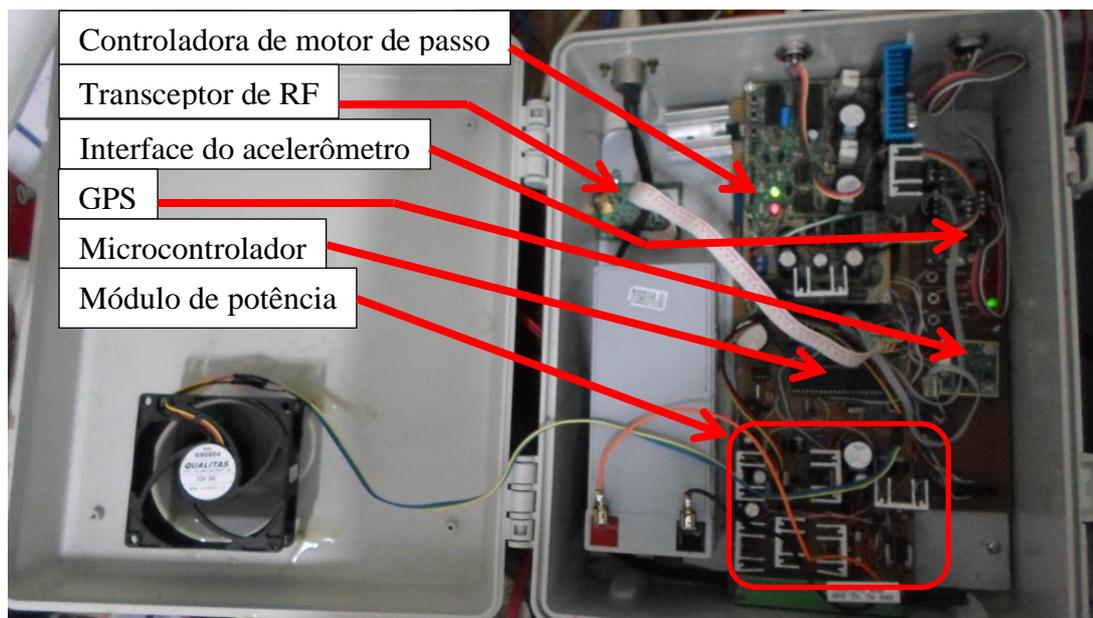


A função básica do escravo é, em síntese, armazenar uma base de dados enviada pelo mestre que permita ao mesmo (o escravo) determinar o movimento do motor, acumular os dados de saída de cada estratégia de acompanhamento (por meio da leitura dos sensores) e executar os comandos enviados por ondas de rádio pelo *software* do computador mestre.

Periodicamente, ao longo do experimento, foi realizada a leitura dos últimos dados armazenados na memória flash externa e, assim, transferidos para a base de dados no disco rígido do mestre. A partir desse momento, essas informações foram visualizadas, analisadas e resultaram em estatísticas, gráficos e conclusões. O fluxo de informações entre mestre e escravo foi feito via comunicação sem fio, ou *wireless*, pois, dessa forma, houve não apenas praticidade na introdução e coleta de dados, mas também foram evitadas eventuais fontes de erros em cabearmentos e conexões. Além disso, o subsistema de comunicação sem fio possibilitou realizar, durante o período inicial de testes do rastreador, as alterações necessárias do *firmware* (programa) gravado no escravo por meio desse mesmo canal *wireless*, por onde também trafegaram dados das medições. Isso tornou possível reprogramar o escravo sem necessidade da remoção do equipamento para o laboratório onde, mais uma vez, poderiam

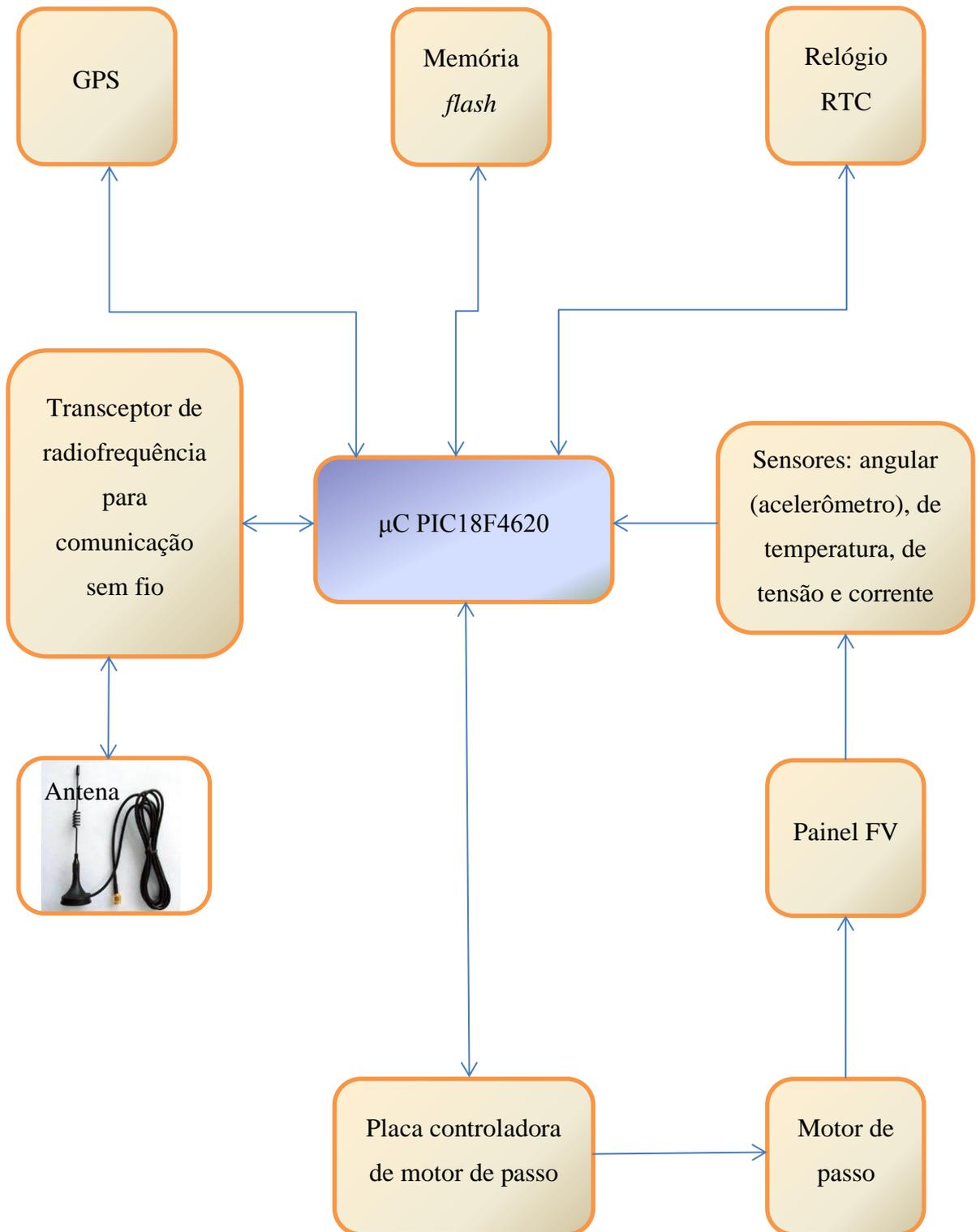
surgir problemas com conectores, fios, maus contatos, acidentes, etc. Adicionalmente, evitou-se o inconveniente operacional de se transportar a caixa metálica pesada com o aparato eletrônico durante os vários dias chuvosos enfrentados. Uma visão geral do hardware do rastreador é apresentada na Figura 15.

Figura 15 – Circuito do escravo (multi rastreador)



Através da Figura 16, pode ser visto o diagrama em blocos do funcionamento do rastreador. Em síntese, o funcionamento básico do rastreamento por minuto começa a partir de quando o microcontrolador lê os registros (na memória *flash*) que guardam data, hora, minuto, segundo e ângulo solar, calculados previamente a partir dos dados do GPS. A cada novo minuto que é informado pelo relógio RTC, o sistema envia um comando de rotação para a placa controladora de motor de passo. Essa executa o comando e o painel é movimentado. O acelerômetro fixado ao painel passa a informar o novo ângulo medido e esse dado é lido pelo microcontrolador que, se for necessário, realiza ainda um segundo ajuste (ajuste fino). Finalmente, as grandezas tensão e corrente entregues pelo painel são medidas, é calculada a potência e são armazenadas nessa memória *flash* juntamente com a data, hora, minuto, segundo, valor do ângulo medido, valor do ângulo de referência e um índice de rastreamento. Esses dados armazenados serão transferidos posteriormente para o computador por meio do transceptor de RF.

Figura 16 – Diagrama em blocos do sistema escravo (multi rastreador)



3.1 Painel Fotovoltaico

Foi utilizado o módulo fotovoltaico Isofotón, modelo IS-75-12, com células de silício monocristalino. Suas principais características para uma irradiância de $1000\text{W}/\text{m}^2$ e 25°C são:

- Potência máxima: $75\text{Wp} \pm 10\%$.
- Corrente de máxima potência: $4,34\text{A}$
- Tensão de máxima potência: $17,3\text{V}$
- Corrente de curto-circuito: $4,67\text{A}$
- Tensão de circuito aberto: $21,6\text{V}$
- Dimensões: $1224 \times 545 \times 39,5 \text{ mm}$
- Área: $\sim 0,667 \text{ m}^2$

3.2 Microcontrolador

Foi escolhido o microcontrolador da Microchip, o PIC18F4620 que possui algumas características que possibilitaram o desenvolvimento do projeto: memória flash de 64KB , memória RAM de cerca de 4KB , 1KB de memória EEPROM, 13 canais de leitura A/D, 36 portas de entrada/saída, uma porta RS232C e 10 MIPS (milhões de instruções por segundo) com 40MHz de *clock*. Para os padrões de microprocessamento atuais, 10 MIPS não caracterizam uma velocidade alta. Poderia, talvez, ser classificada como média diante dos microprocessadores mais comumente utilizados em aplicações similares. Os mais novos e modernos microcontroladores/microprocessadores, onde alguns têm mais de um núcleo de processamento e são a base de funcionamento de *smartphones*, *tablets*, etc., ultrapassam a casa de $1,2 \text{ GHz}$ de *clock*. No entanto, esse chip e essa velocidade ainda são usados atualmente por boa parte de projetos onde a velocidade não figura como um ponto crítico ou de importância significativa. É bom lembrar que o movimento do sol é muito lento ao longo do dia e isso facilita seu acompanhamento. A disponibilidade de mercado é um ponto forte e atrativo desse chip, pois é muito fácil adquirir outras unidades.

3.3 Motor de Passo

Ao invés dos motores de corrente contínua usados em outros trabalhos, optou-se por usar um motor de passo NEMA 23, com $1,8^\circ$ por passo e, acoplado, um redutor com razão de redução de 1:20. Essa escolha permitiu um controle com boa precisão do ângulo de posicionamento solar, pois é possível atingir a resolução de $0,09^\circ$ para um passo normal ou $0,045^\circ$ para meio passo. Além disso, o retorno ao mesmo ângulo, visto que são manipuladas grandezas inteiras, possibilita a reprodutibilidade de um determinado posicionamento.

3.4 Controladora do Motor de Passo

A finalidade desse módulo, ou melhor, dessa placa incorporada ao *hardware* do sistema, é receber comandos do microcontrolador PIC18F4620 (ou genericamente PIC) e movimentar o eixo do motor. O ângulo de movimentação é dado pelo comando enviado pelo PIC. Foram desenvolvidos diversos comandos adicionais além daquele de posicionamento. Na realidade, o *firmware* dessa placa, que havia sido desenvolvida em outra ocasião, precisou ser completamente refeito para suportar tanto um novo barramento de comunicação compatível com o circuito principal do PIC, quanto novas funções de comando para executar atividades específicas ao processo de rastreamento. Ao todo, foram mais de 1300 linhas de programação em C para deixá-la pronta, permitindo ainda desconectá-la logicamente do PIC e assim movimentar o painel livremente (sem interferência do rastreamento) por meio de botões do tipo micro chave.

3.5 Transceptor de RF para Comunicação *Wireless*

Como já foi exposto, o sistema mestre-escravo, formado pelo PC (ou *notebook*) e o rastreador, se comunica por ondas de rádio. Isso se passa dentro da faixa de frequências denominada ISM e licenciada pela Anatel – Agência Nacional de Telecomunicações. Desse modo, existe um transceptor de RF no interior do equipamento rastreador e uma antena do lado externo. O mesmo ocorre no PC/*notebook* que faz uso do outro módulo transceptor de RF, conforme ilustrado na Figura 17. E essa é a base desse sistema de comunicação. Foi idealizada dentro da concepção de que, na existência de muitos rastreadores próximos uns aos

outros, o mestre poderá se comunicar com cada um independentemente através do endereço digital do *firmware* de cada um.

Figura 17 – Transceptor de RF



3.6 Relógio Interno RTC, GPS e Memória *Flash*

Esses três dispositivos se comunicam com o microcontrolador e têm extrema importância dentro do conjunto.

O GPS fornece as coordenadas geográficas vitais às equações que retornam os parâmetros de posicionamento solar. O dispositivo também é microprocessado e, segundo o fabricante, seu erro de posicionamento é inferior a 1 metro. Se os valores obtidos, “-8.054965, -34.954948” para latitude e longitude, respectivamente, forem colocados (sem as aspas) em um mecanismo de mapeamento disponível na internet, a localização estará muito próxima da localização exata do equipamento. Os pontos foram propositalmente colocados nos valores numéricos das coordenadas anteriores ao invés de vírgulas para indicar que esses mecanismos de buscas com mapeamentos normalmente adotam esse padrão.

O relógio interno, também chamado RTC, que significa relógio de tempo real, desempenha um papel fundamental quando é ele quem informa o horário local, base do sistema de rastreamento solar do banco de dados.

Finalmente, e não menos importante, é a memória *flash* externa de 4MB. Nesse chip estão guardadas as informações dos ângulos solares a cada minuto e é também onde o rastreador armazena os dados de medições relativas ao painel FV.

3.7 Sensores

Existem sensores de posição angular, temperatura, tensão e corrente cuja leitura é feita pelo microcontrolador. Os mais importantes são aqueles que retornam os valores a partir dos quais são extraídas as informações de potência de saída do painel e ângulo de posicionamento.

A potência é calculada a partir de uma impedância resistiva de 5,6 ohms que é colocada em paralelo com a saída do painel no momento de medição de tensão e corrente. Através de chaves baseadas em semicondutores, a energia (proveniente do painel FV) fornecida ao circuito de rastreamento é desligada pelo microcontrolador nesse período para evitar a perda de parte da corrente elétrica, ainda que pequena. Essa impedância é então conectada em paralelo com a saída do painel por meio de outras chaves semicondutoras. Nesse intervalo de medição, a energia que vai para o circuito rastreador é suprida pelas baterias.

Já o ângulo de posicionamento do painel é medido por meio de um dispositivo que funciona com base em um acelerômetro. Esse dispositivo possui precisão de $0,1^\circ$.

3.8 Baterias

Existem duas baterias em paralelo de 12V que fornecem energia ao sistema. Elas foram adicionadas ao projeto por algumas razões:

- Durante as medições de potência, quando a energia fornecida pelo painel ao circuito for desconectada, será preciso se obter energia de uma fonte auxiliar;
- Em dias muito nublados, no fim da tarde ou em horário noturno, não seria possível conectar mestre e escravo sem essa fonte auxiliar;
- Se, eventualmente, esse projeto for transformado em um produto comercial, seria vantajoso poder incluir baterias como opção de funcionamento juntamente com um circuito controlador de carga dessas baterias. Esse circuito também foi incluído na parte de potência do projeto eletrônico.

3.9 Software para Calcular os Ângulos Solares

O sistema de posicionamento adotado usou o controle em malha fechada. Uma vantagem desse sobre o controle em malha aberta é o fato de que o uso da realimentação faz o sistema relativamente insensível a perturbações externas e variações internas nos parâmetros do sistema (OGATA, 2010). Essa abordagem torna possível o uso de componentes relativamente imprecisos e de baixo custo para obter um controle preciso, o que seria impossível de fazê-lo no caso de controle em malha aberta. É importante enfatizar que, em sistemas cujas entradas são conhecidas antecipadamente no tempo e onde não existem perturbações, é aconselhado usar o controle em malha aberta. O controle em malha fechada tem vantagens apenas quando estão presentes perturbações imprevisíveis e/ou variações igualmente imprevisíveis nos componentes do sistema.

Do ponto de vista de estabilidade, o controle em malha aberta é mais fácil de implementar, pois a estabilidade não constitui um problema fundamental. Por outro lado, a estabilidade pode representar um grande problema em sistemas com controle em malha fechada, que pode tentar sobrecorrigir erros e causar oscilações de amplitude constante ou variável. Por essa razão, em termos de dispositivos analógicos de rastreamento, torna-se eventualmente necessário dispor de recursos de *hardware* como a incorporação de histerese em módulos de circuitos eletrônicos para evitar oscilações provocadas pelo sistema de controle, como aconteceu em um dos trabalhos analisados (MONTEIRO, 2007). Isso pode ser evitado em sistemas microprocessados de modo relativamente simples por meio de algoritmos desenvolvidos em blocos de programação com esse propósito, constituindo mais uma vantagem em se usar o processamento e controle digitais.

O controle de posicionamento em malha fechada do rastreador requer que se obtenha fórmulas ou algoritmos que informem o ângulo de incidência dos raios solares a qualquer instante, em qualquer data e em uma localização geográfica particular. Para alcançar um alto grau de precisão, esses valor angular pré-calculado é confrontado com o valor de saída de um sensor de posicionamento, o que origina um sinal de erro usado na realimentação (CHONG; WONG, 2009). A precisão do valor desse ângulo torna-se imprescindível quando se trata de rastreamento para sistemas FV com tecnologias de alta concentração em que há uma tolerância pequena relativa aos erros de rastreamento. Erros maiores além da tolerância teriam como consequência uma redução drástica de desempenho do concentrador

(RUBIO *et al.*, 2007). Os sistemas FV sem concentração, por outro lado, são mais tolerantes a esses erros de rastreamento.

Para se avaliar as opções que fornecessem esse ângulo de rastreamento, inicialmente foi criado um programa em C++ com base no algoritmo de Reda (REDA; ANDREAS, 2004), cujos valores de saída foram comparados com os resultados similares das equações do livro de Rabl (RABL, 1985). Essas equações foram naturalmente selecionadas como base de comparação, corroboradas pela evidência de que os trabalhos de desenvolvimento de sistemas rastreadores (já comentados) no DEN foram bem sucedidos ao utilizarem seus resultados. Por outro lado, a escolha do algoritmo de Reda para essa análise se justificou pelo fato de contar com uma margem de incerteza (mínima para essa aplicação) de $\pm 0,0003^\circ$ no intervalo entre os anos de -2000 a 6000. A Figura 18 ilustra o programa desenvolvido.

Após as devidas verificações, esses algoritmos foram transformados em uma biblioteca DLL que posteriormente foi incorporada como um dos módulos do programa mestre (em C#) instalado no *notebook*, figurando lá como um projeto dentro da solução geral. E, finalmente, os resultados de Reda foram os selecionados para o rastreamento solar.

Figura 18 – Comparações entre os Algoritmos de Reda e Rabl

Entrada	Saída: Ibrahim Reda and Afshin Andreas	Saída: Rabl
Latitude:	Declinação (°):	Declinação (°):
-8	-23.43591	-23.44977
Longitude:	Zenith (°):	Zenith (°):
-34.91667	24.79557	24.95984
Elevação (m):	Azim. N->E (+) (°):	Azimuth S->W (+) (°):
0	130.79017 -> 130.79017	-49.43124
Data:	Ângulo de incidência no plano (°):	Ângulo de incidência no plano (°):
21/12/2013	24.79557	24.95984
Hora local:	Horário do amanhecer (local):	Horário do amanhecer (local):
09:56:50	05:00:05	05:04:39
Elev. do plano (°):	Meio dia Solar (local):	Meio dia Solar (local):
0	11:17:52	11:18:38
Azimuth do plano (°):	Horário do por do sol (local):	Horário do por do sol (local):
-90	17:35:38	17:32:37
Temperatura anual média (°C):	Equação do tempo (minutos):	Equação do tempo (minutos):
25.6	1.82942	1.02912
Pressão anual média (hPa):	Hora Solar:	Hora Solar:
1012	10:38:59	10:38:11
Zona de tempo:	Refracção atmosférica. (°):	
-3	0.00741	
Longitude padrão local:	Delta T (TT - UT) (s):	
-45	68.05275	

Copyright ©2012 by Henriques Campos

3.10 *Software* dos Módulos Mestre e Escravo

Essa etapa foi a que demandou maior montante de tempo. Nela foram desenvolvidos os softwares do mestre e do escravo com a seguinte particularidade: os algoritmos para comunicação entre ambos tiveram de ser escritos duas vezes, uma do lado do escravo, em C e outra em C# (lê-se *C sharp*) do lado do mestre, responsável pelo envio dos comandos.

O sistema rastreador (ou escravo), na realidade, teve dois programas implementados no PIC18F4620: um auxiliar em assembler e um principal em C. Ambos co-existem dentro da memória *flash* desse PIC. O primeiro, sob o ponto de vista cronológico, foi escrito em assembler pela velocidade exigida, pelo tamanho compacto e pelo controle do processador. Desempenhou o papel importante de funcionar como um gravador do programa principal e foi o responsável por todas as atualizações do *firmware*. Assim, cada vez que o programa principal foi modificado, esse programa em assembler foi o responsável por receber o código de máquina (do principal) por meio do transceptor de RF e instalá-lo na parte superior da memória do microcontrolador. O programa assembler ocupou pouco mais de 1K Byte.

O segundo programa escrito para o escravo, o programa principal, é o responsável por todo o processo de rastreamento. Seu tamanho total em linhas de programação fica próximo a 10.000 linhas e é muito complexo, pois tem que gerenciar muitas atividades, algumas simultaneamente, como rastrear, receber comandos do mestre e processá-los em tempo real.

Quanto ao programa do mestre, no PC/*notebook*, esse é ainda maior em linhas e muito maior em memória ocupada. Mas, nesse ambiente, as limitações são consideravelmente menores em se tratando de programação. Escrito em C#, não só é responsável pelos comandos, configurações e atualizações de *firmware* do escravo, como ainda cria o banco de dados solares que é introduzido nesse (escravo). Através de uma de suas opções de menu, também é possível efetuar o *download* dos dados gerados pelo escravo. Além disso, contém as rotinas necessárias para auxiliar no estudo posterior dos dados coletados, executando filtragens e estatísticas sobre os mesmos enquanto opera diretamente com a base de dados. No decorrer do programa, foram criados diversos botões, janelas e demais ferramentas para atribuir as funcionalidades desejadas. Uma visão global do funcionamento do programa

mestre é apresentada no diagrama da Figura 19. Ambas, Figura 20 e Figura 21, mostram o menu principal e um dos menus secundários.

Figura 19 – Diagrama de funcionamento do programa mestre

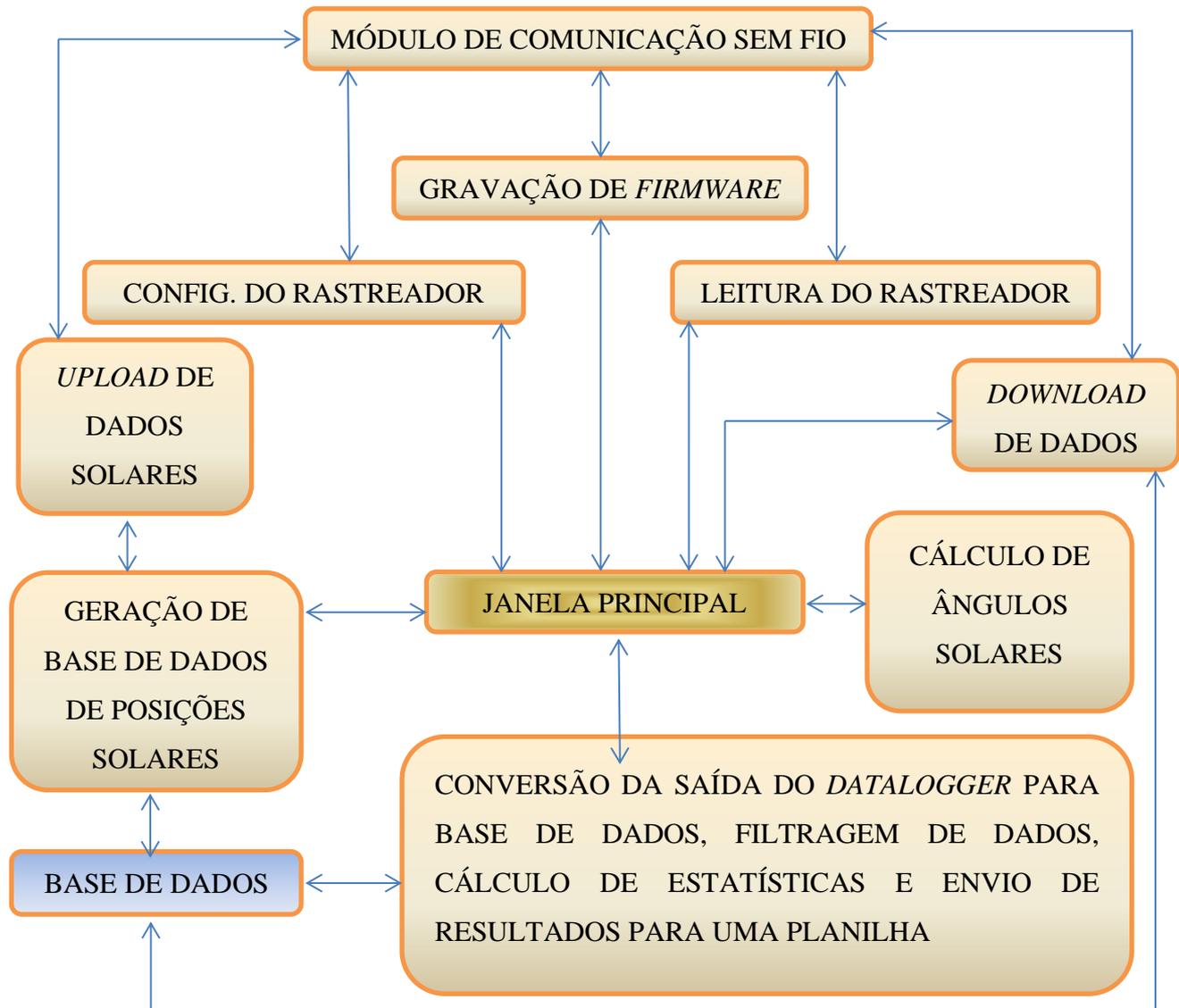


Figura 20 – Menu principal do programa mestre



Figura 21 – Menu secundário do programa mestre



Levando-se em consideração o volume total de dados de saída gerados, foi imprescindível a automatização dos processos envolvidos, pois já se previa uma certa dificuldade na manipulação dessas informações caso não fossem devidamente organizadas em uma base de dados robusta residente no computador. Para tanto, foi selecionada uma das melhores da atualidade. Trata-se do Postgresql, tão bom quanto o popular MySQL de propriedade da Oracle. Por fim, o Postgresql abrigou os dados gerados tanto pelo rastreador, como aqueles (em formato TXT e convertidos pelo programa mestre) provenientes do *datalogger* CR10X, equipamento associado à estação solarimétrica do Grupo FAE. Os dados utilizados dessa estação solarimétrica foram a irradiância horizontal total, a irradiância direta, a irradiância difusa, a data e o instante de tempo de medição, em segundos, de ocorrência de cada valor. Do processo de rastreamento vieram diversos dados já mencionados durante a apresentação da Figura 16.

A respeito do banco de dados solares introduzido no rastreador, ele foi previamente calculado e compactado no computador para ocupar um espaço menor no chip de memória *flash*. Em uma montagem polar, se requer uma quantidade de memória substancialmente menor que em uma montagem não polar, pois se pode tirar proveito do fato do ângulo de rastreamento ser o próprio ângulo solar, como já foi colocado. Mas o sistema foi desenvolvido preparando o equipamento para o pior caso, não polar. Então essa foi a justificativa para a compactação (ou compressão), que exigiu também a construção de uma rotina correspondente de descompactação do lado do rastreador. A primeira versão de compactação, a mais simples, foi introduzida imediatamente após o cálculo das posições e, para 7 meses, ocupou algo em torno de 125K Bytes. A segunda versão partiu da primeira e reduziu esse tamanho para, aproximadamente 64K Bytes, quase a metade do tamanho inicial. Como, àquela época, o chip de memória a ser usado seria bem menor, 64KB, foi feita uma terceira compressão, reduzindo ainda mais agora para 35K Bytes. Entretanto, como foi adquirida uma memória muito maior, de 4M Bytes e o algoritmo de descompressão havia ficado muito complexo, optou-se por usar apenas a segunda etapa de compressão/descompressão. Depois de tudo, como recompensa pela criação dessa base de dados digitais compactada, foram obtidas duas vantagens importantes. A primeira é que sobrou mais espaço de memória no chip, seja para compartilhá-la com os dados gerados pela leitura do painel ou então para aumentar o tempo de autonomia de rastreamento. Atualmente foram gravados 7 meses ininterruptos de dados de posição solar terminando no fim de setembro, mas, se não fosse o compartilhamento com os dados de saída do painel, seria possível gravar algo próximo a 37 anos de posições. A segunda vantagem do

cálculo solar prévio foi que, devido à complexidade dos cálculos matemáticos envolvidos no algoritmo de Reda (REDA; ANDREAS, 2004), muito iria ser gasto em memória de programação do microcontrolador, sobrando, provavelmente, pouco para o programa principal. Mas, tão ruim quanto, seria também a latência introduzida na hora que o microcontrolador precisasse saber qual o ângulo solar daquele horário, pois a velocidade de processamento dele, 10 MIPS, poderia causar um retardo indesejável até a resposta do algoritmo. Como alternativa, foi deixado um espaço em um dos barramentos de comunicação do circuito para introduzir futuramente um co-processador com o propósito de, eventualmente, efetuar esses ou outros cálculos mais trabalhosos.

3.11 Estratégias de Rastreamento

Foram quatro (04) as estratégias de rastreamento escolhidas, numeradas de 0 a 3 e multiplexadas no tempo, ou seja, dentro de um mesmo intervalo de tempo que, nesse caso, foi de um (01) minuto, cada qual ocupou um dos 4 subintervalos indexados segundo essa sequência numérica. Esses 4 subintervalos não foram necessariamente iguais, pois o tempo de posicionamento do painel de uma estratégia para outra varia de acordo com o ângulo horário solar.

Cada estratégia assume o controle do sistema dentro de sua vez, posiciona o painel FV de acordo com suas instruções, faz as medições relativas ao horário, ângulo, tensão, corrente e potência gerados pelo painel, guarda esses resultados na base de dados interna e libera o controle para a próxima estratégia, se ainda houver uma à espera do controle dentro do mesmo intervalo. E assim, intervalo após intervalo de um minuto de rastreamento, os dados das quatro estratégias são coletados e armazenados.

Esse tempo total escolhido de um minuto para as quatro estratégias refletiu um compromisso. Por um lado, seria importante assegurar para cada intervalo valores de irradiância com menor desvio padrão da média, especialmente na presença de instabilidades atmosféricas. Isso permitiria comparar as estratégias segundo uma mesma condição atmosférica. De outro lado, cada estratégia consome tempo devido à velocidade de posicionamento da parte mecânica cuja inércia envolvida precisa ser considerada. Além disso, no cálculo de tempo gasto para movimentação é preciso levar em conta o pior caso, quando ocorre de as estratégias estarem no ponto máximo de afastamento angular entre si de acordo

com a sequência de 0 a 3. Também deve ser considerado o tempo necessário para estabilização e leitura da resposta do acelerômetro ao novo posicionamento.

A amplitude total de tempo de rastreamento ao longo de um dia foi determinada no processo de geração do banco de dados de posições solares no computador mestre e definida como sendo o período de 95% de duração de cada dia. O cálculo de duração do dia, que se mostra geometricamente como função da declinação solar e latitude local (RABL, 1985), foi obtido através das equações de Reda (REDA; ANDREAS, 2004).

3.11.0 Estratégia 0

Essa é a estratégia base de comparação. Simula um painel na posição polar fixa. É muito importante frisar que foi escolhida uma montagem polar para o sistema de rastreamento, descrito anteriormente no tópico 2.3.1. O ângulo polar, que deve ser igual à latitude local, foi medido com o auxílio do acelerômetro deslocado para uma posição ortogonal à sua posição de trabalho, ou seja, em posição paralela ao eixo de rotação do painel. Seu valor medido resultou em $8,11^\circ$ que, comparado aos $-8,05^\circ$ de latitude medidos pelo módulo GPS, mostrou uma diferença muito pequena em módulo.

3.11.1 Estratégia 1

A estratégia 1 baseia-se na divisão do intervalo diário de rastreamento em 7 subintervalos. Em cada uma dessas 7 divisões, o painel se posiciona no centro angular delas. A passagem de uma divisão para a próxima ocorre do seguinte modo: minuto a minuto é verificado o ângulo de rastreamento para aquele instante e quando ele ultrapassa o intervalo atual, o sistema passará a se posicionar no centro do intervalo seguinte. Isso até o horário final diário de rastreamento que corresponde ao último dos 7 subintervalos.

3.11.2 Estratégia 2

A estratégia 2 é aquela em que o sistema rastreia minuto a minuto a posição solar a partir da base de dados gravada na memória flash e do sinal de realimentação do acelerômetro.

3.11.3 Estratégia 3

A última das estratégias, a 3, é aquela que tenta corrigir desvios de posicionamento da estratégia 2. Começando da posição da estratégia 2, a 3 mede a tensão na saída do painel (acoplado a uma carga resistiva de 5,6 ohms) que é usada como sinal de realimentação. Depois é verificado se o desvio angular da estratégia 2 foi excedente ou não em relação ao posicionamento calculado. Em seguida, desloca o ângulo do painel no sentido oposto ao desvio, varrendo um total de $1,7^\circ$, buscando um ponto máximo de tensão na saída do painel que vai corresponder à produção máxima de energia que alimenta essa carga resistiva. Finalmente, se for encontrado esse ponto de geração máxima de energia, posiciona-se no ângulo correspondente. Em caso contrário, retorna à posição da estratégia 2.

3.12 Estação Solarimétrica e *Datalogger*

Para fornecer dados sobre a irradiância global, direta e difusa no plano horizontal foi utilizado o *datalogger* CR10X (fabricado pela empresa Campbell), modelo visto na Figura 22, para leitura dos dados provenientes da estação solarimétrica do Grupo FAE, mostrada na Figura 23. Os dados foram lidos a cada segundo, diariamente, entre 05:30 e 17:30 e armazenados nesse *datalogger*. Periodicamente executava-se a transferência para a memória do *notebook* na forma de arquivo texto e então, através do programa mestre, os dados passavam por uma conversão para serem introduzidos no interior de uma tabela na base de dados.

Figura 22 – Datalogger CR10X

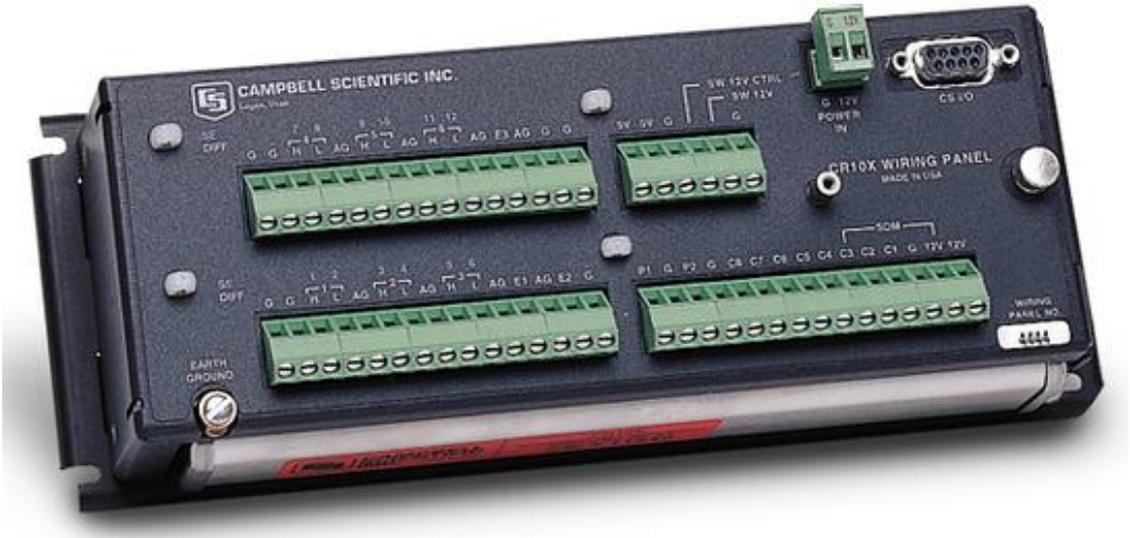


Figura 23 – Estação solarimétrica do Grupo FAE



4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, para uma melhor compreensão das discussões que se seguem, é importante recorrer da definição de um parâmetro extremamente útil para avaliação das condições atmosféricas durante as medições. Trata-se do K_t , coeficiente de transmitância, também chamado de índice de claridade. Ele é definido como a razão entre a irradiação global que atinge a superfície terrestre e a irradiação que incide no topo da atmosfera. É adimensional. Esse parâmetro pode ser interpretado como um coeficiente de atenuação da irradiação pela atmosfera. Será fundamental para análise posterior dos efeitos da nebulosidade sobre as estratégias de rastreamento.

É muito importante ressaltar que, para efeito de comparação entre as estratégias, é fundamental que cada intervalo de 1 minuto que as contém seja caracterizado por uma situação de estabilidade da irradiação global. A eventual passagem de nuvens poderia privilegiar uma estratégia sobre a outra, agindo como um ruído sobre as medições feitas e mascarando as respostas. Então, para cada um dos intervalos de um minuto foi calculada a irradiação média global (no plano horizontal) e seu respectivo desvio padrão. O padrão ISO 9060:1990 (*Solar energy - Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation*) estabelece dentro das especificações sobre piranômetros, sob a referência 3c, que equipamentos classificados como de primeira ou segunda classe têm uma faixa de erros de $\pm 20 \text{ W/m}^2$. E a classificação como padrão secundário, caso do piranômetro da estação solarimétrica do Grupo FAE, significa uma faixa de erros de $\pm 10 \text{ W/m}^2$. Então, para selecionar a estabilidade desejada, os pontos caracterizados por um intervalo cuja irradiação tivesse desvio padrão acima de 10 W/m^2 foram descartados dos cálculos e dos gráficos, uma vez que provavelmente representariam ruído provocado pelas variações atmosféricas.

Para comparação diária entre as potências geradas pelas estratégias, foram tomadas as potências médias a cada quarto de hora (correspondente a $3,75^\circ$ de variação do ângulo de rastreamento), depois as médias horárias desses valores e, por fim, a média diária. Para o caso de todo o período de dias observados, depois de também descartados os pontos de desvio padrão superior ao estabelecido, cada minuto foi representado por sua média ao longo desse período para cada estratégia. Essa abordagem auxiliou muito a caracterização e comparação entre as estratégias diante das instabilidades climáticas. Vale a pena mencionar, através da Tabela 3, o cálculo do desvio médio absoluto de posicionamento (relativo ao algoritmo de

Reda (REDA; ANDREAS, 2004)) para cada estratégia, considerando os critérios acima de aceitabilidade dos intervalos das amostras. Na mesma tabela também estão presentes o desvio padrão e o desvio máximo por estratégia. O desvio médio absoluto foi calculado através da expressão:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|x_i - R_i|), \quad (4.1)$$

em que R_i representa o valor do ângulo calculado por Reda e x_i o valor medido. O desvio padrão das amostras foi calculado por:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.2)$$

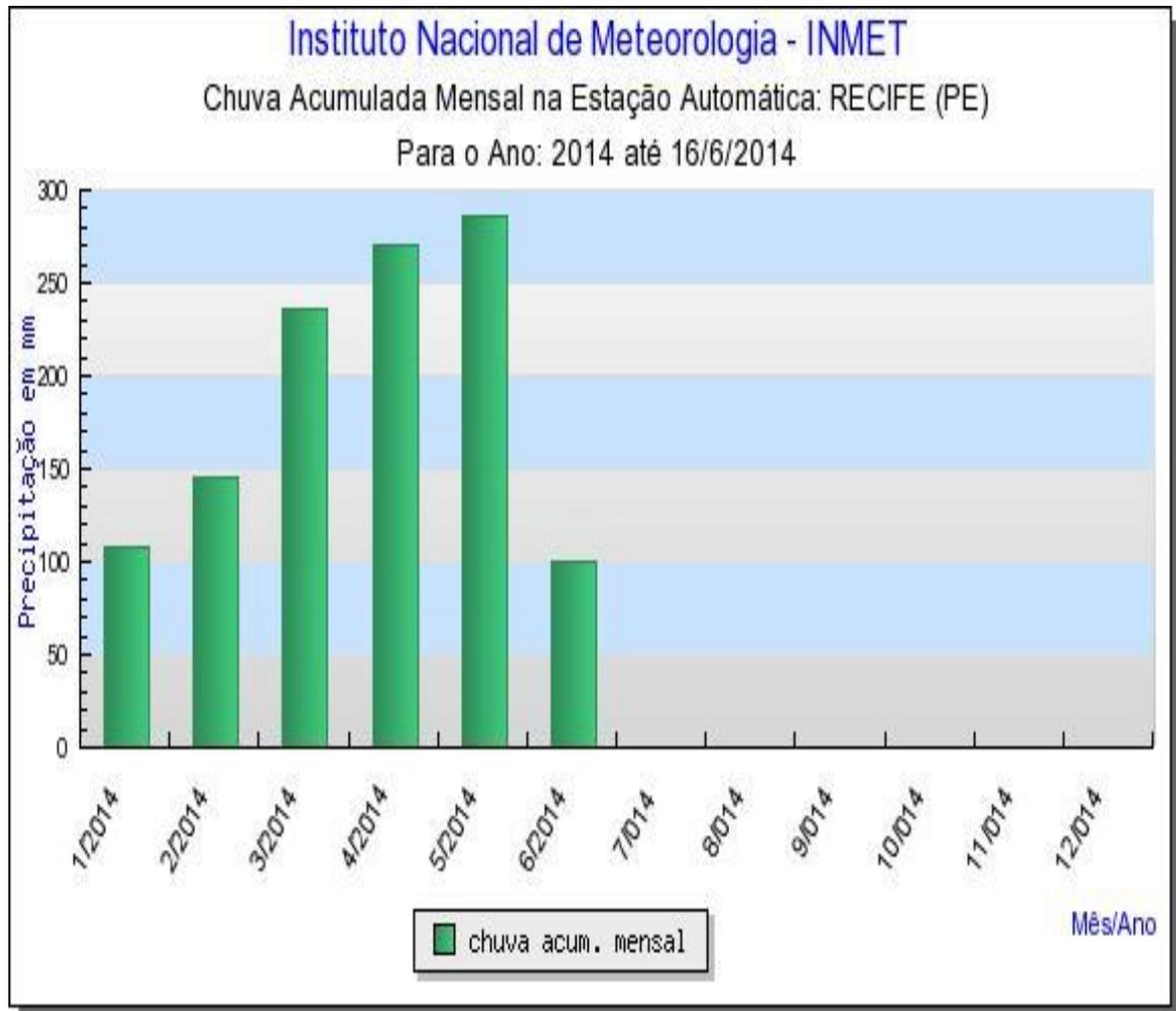
Tabela 3 – Resumo dos desvios de posicionamento

Estratégia\Parâmetro	Desvio médio absoluto (em graus)	Desvio padrão (em graus)	Máximo desvio absoluto (em graus)
0	0,048	0,011	0,28
1	0,076	0,003	0,15
2	0,097	0,009	0,45
3	0,148	0,013	0,74

A exemplo do que ocorreu com um dos trabalhos já comentados (OLIVEIRA, 2007), que transcorreu durante os meses de maio e junho, o período de avaliação do experimento também foi marcado por dias com forte nebulosidade e chuvas. Após uma fase inicial de testes e ajustes de software, os dados foram coletados no período de 01/04 a 19/05. A Figura 24 apresenta um gráfico com a chuva acumulada mensal para 2014 contendo o período acima. Entre abril e maio choveu 550 mm, o que significou mais de 30% da média anual (1804 mm). Em conjunto com esse gráfico pluviométrico, existem outros dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia, incluindo a radiação horária, cuja média diária revelou, aproximadamente, 18,05MJ/m². Esse valor é concordante com os dados típicos obtidos através do Atlas Solarimético do Brasil (GRUPO FAE, 2000) para o período

em questão. Foram então escolhidos os dias e intervalos menos instáveis para avaliação dos resultados.

Figura 24 – Chuva acumulada mensal na estação automática Recife



Os gráficos apresentados na Figura 25 e na Figura 26 ilustram o comportamento atmosférico observado do ponto de vista dos valores médios (por minuto) de Kt durante o período de coleta de dados. O gráfico da Figura 25 sugere uma distribuição bimodal, contudo seria necessário um estudo específico, mais aprofundado e dentro de um intervalo de tempo maior para uma melhor caracterização. Os valores médios de Kt ao longo do experimento refletiram a nebulosidade que acompanhou o período, sendo possível notar pela Figura 26 que aproximadamente 30% dos valores médios desse parâmetro ficaram abaixo de 0,3.

Figura 25 – Histograma para os valores médios de Kt

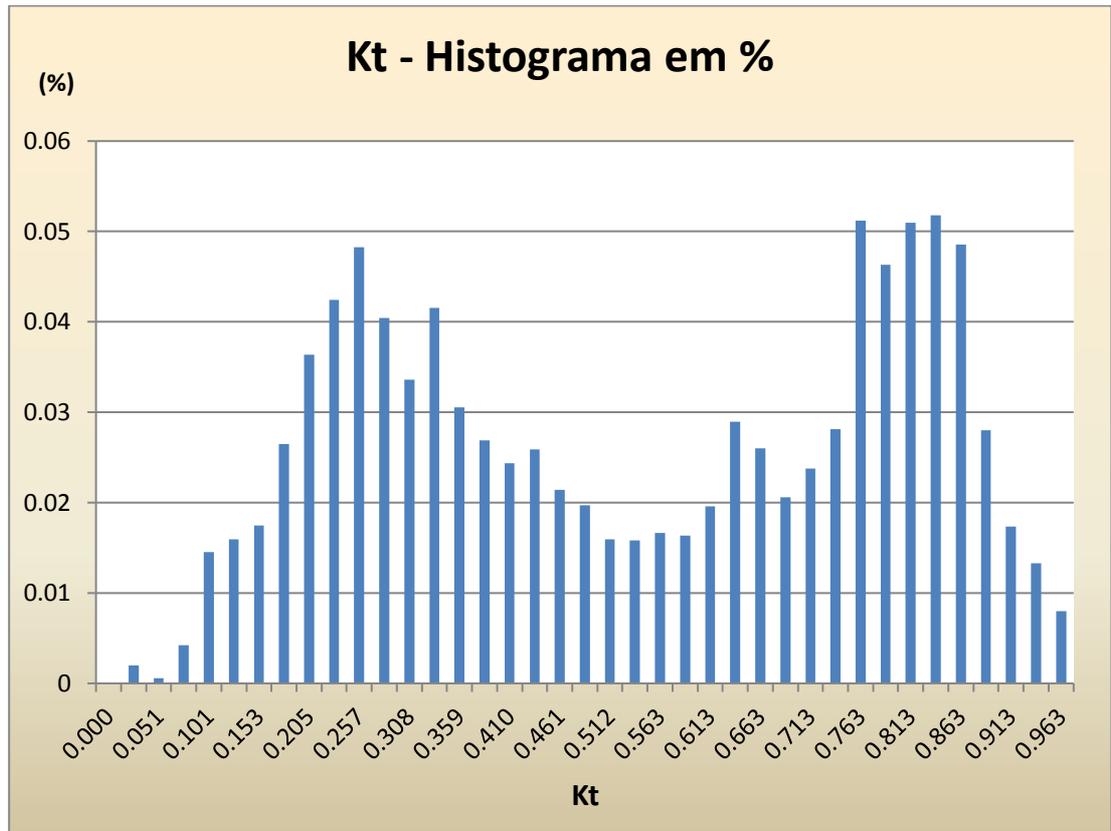
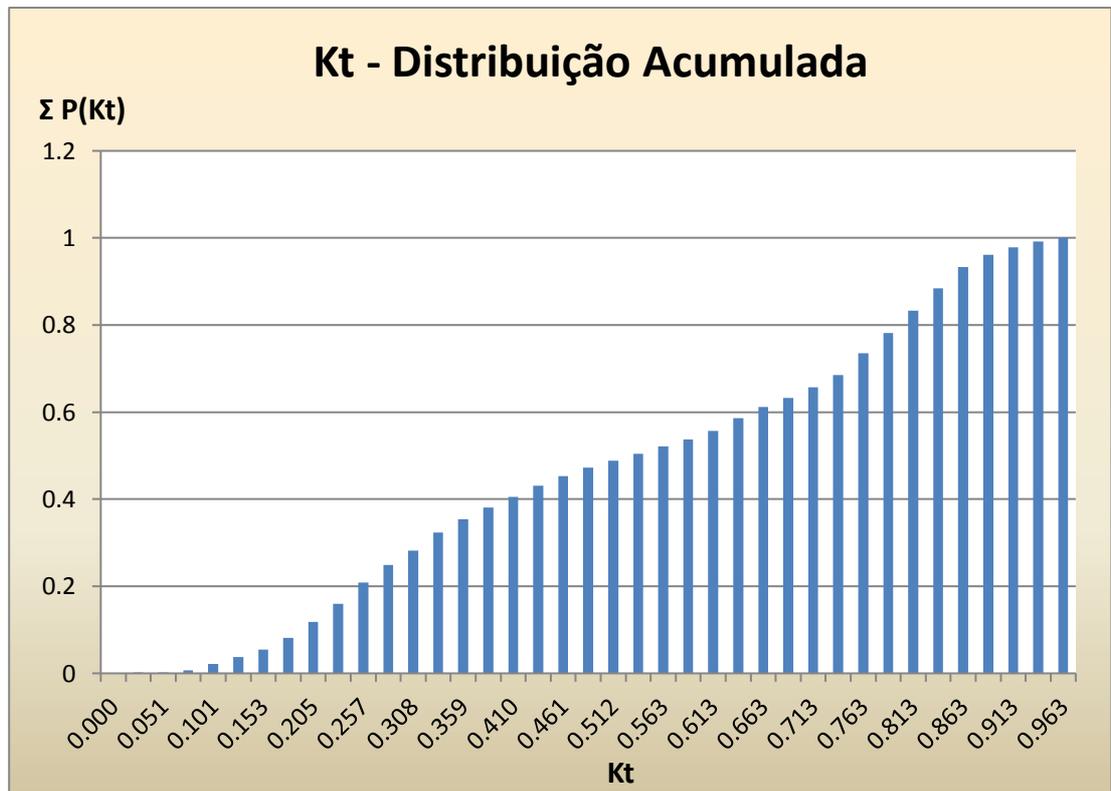
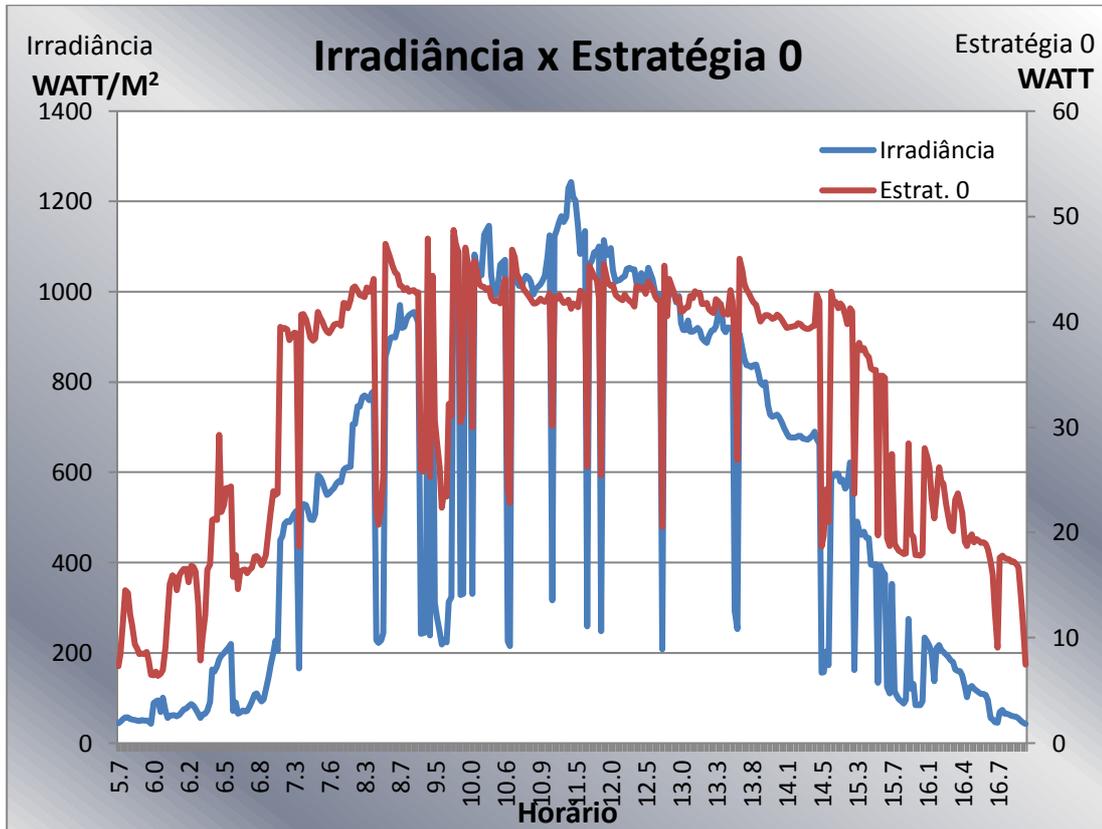


Figura 26 – Distribuição acumulada de Kt



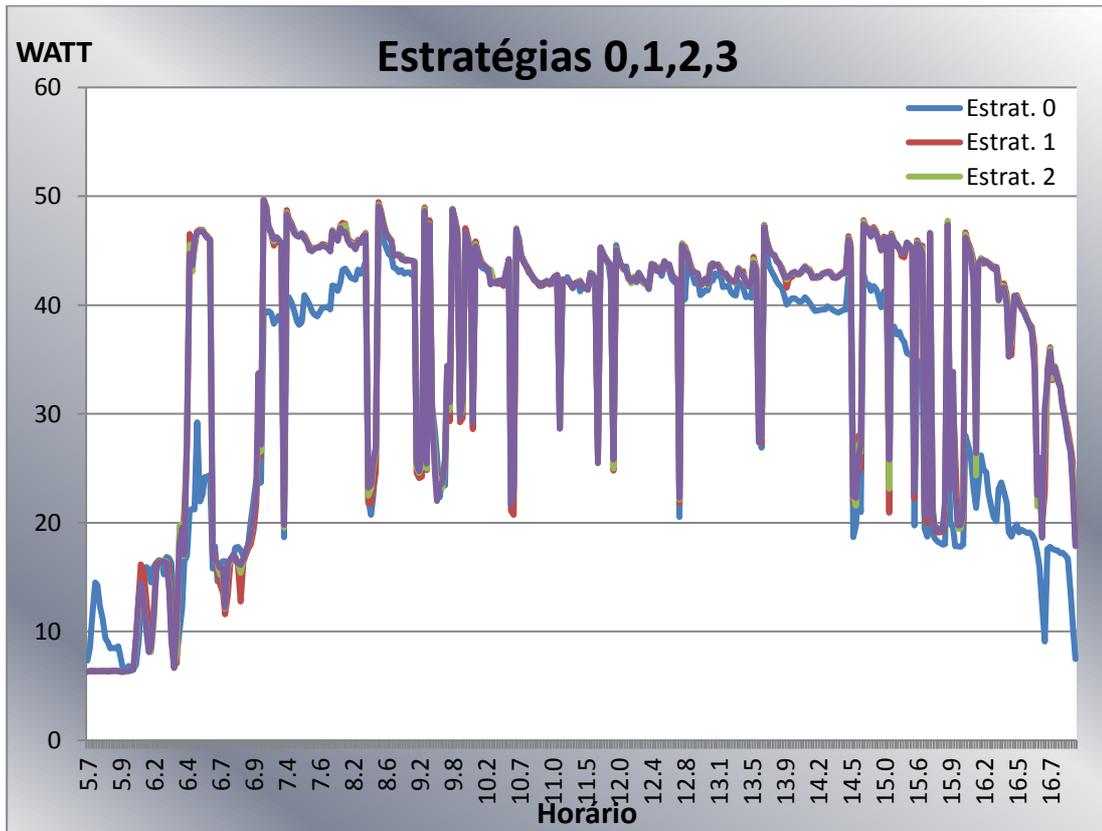
Como exemplo dessa instabilidade meteorológica, o dia 23/04 é representado a seguir por meio da Figura 27 e da Figura 28. São colocadas as variações da irradiância global no plano horizontal e as suas consequências sobre as quatro estratégias.

Figura 27 – Irradiância global x estratégia 0 para o dia 23/04



O ganho proporcionado pelo rastreamento minuto a minuto (estratégia 2) sobre a posição polar fixa (estratégia 0) foi de 8,82%, estando as estratégias 1 e 3 ligeiramente abaixo e acima, respectivamente, por uma quantidade desprezível.

Figura 28 – Comparação entre estratégias para o dia 23/04.



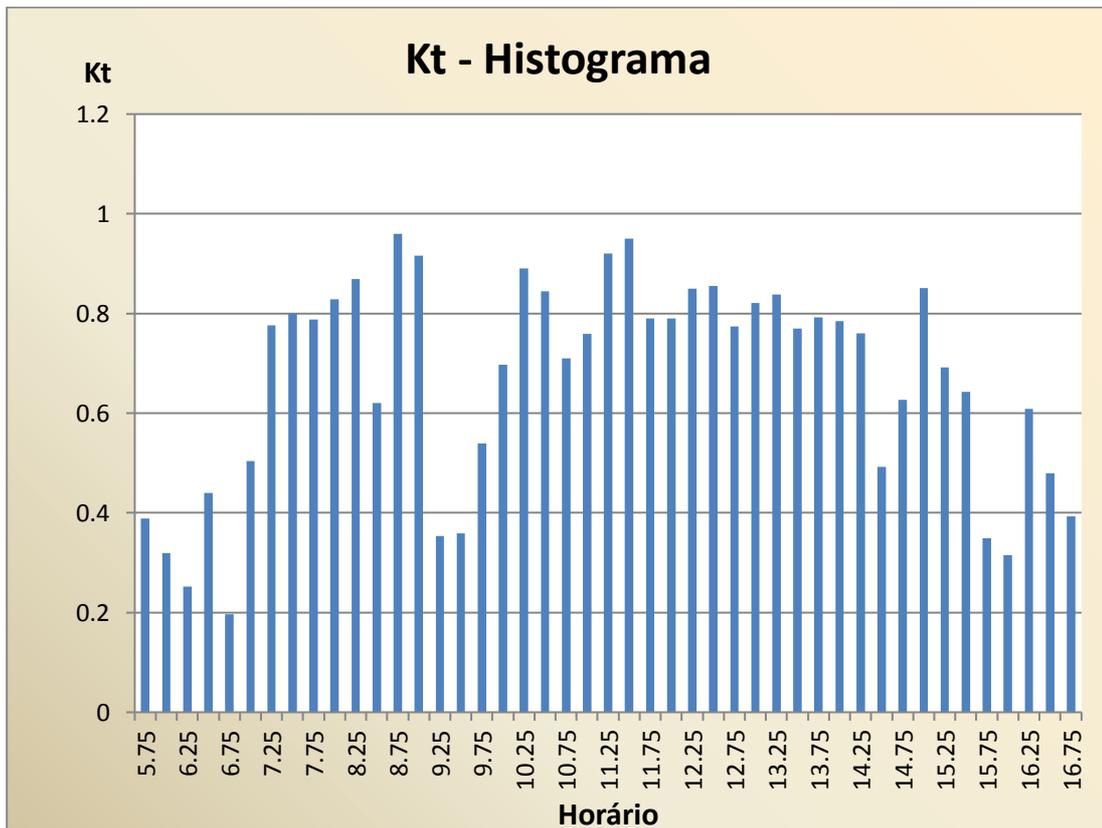
Os gráficos mostram a correspondência entre a variação da irradiância global e a resposta em potência do rastreador em cada estratégia, exceto nos primeiros momentos da manhã até por volta das 06:00 quando, muito provavelmente pela presença de construções e árvores que bloqueiam o sol nesse horário (conforme Figura 29), essa correspondência não foi observada.

Figura 29 – Sombreamento a leste do arranjo



Através do gráfico da Figura 30, informações adicionais sobre a nebulosidade desse dia podem ser visualizadas pelo parâmetro K_t , complementando a análise.

Figura 30 – Histograma de K_t para o dia 23/04



Há de se mencionar que a estação solarimétrica do Grupo FAE, responsável pela medição das irradiâncias, encontra-se a alguns metros do painel, porém no topo de uma estrutura de metal que a coloca em um plano mais elevado. E o índice de claridade, K_t , tem seu cálculo baseado nos dados oriundos dessa estação.

Outro aspecto que merece atenção é a grande superposição de curvas entre as estratégias 1, 2 e 3, notadamente entre a 2 e a 3. Recordando, a estratégia 3 é aquela que tenta corrigir erros de posicionamento tomando como realimentação a produção de energia do painel FV (submetido a uma carga resistiva) e não através do sinal de resposta do acelerômetro, que, por sua vez, é usado na estratégia 2. No caso de pequenos erros de posicionamento da estratégia 2, se imaginava ocorrer essa superposição com a 3, o que foi verificado em termos gráficos e numéricos.

Em outro dia (10/05) com forte instabilidade, o rastreamento produziu os resultados apresentados nos gráficos da Figura 31 e Figura 32.

Figura 31 – Irradiância global x estratégia 0 para o dia 10/05

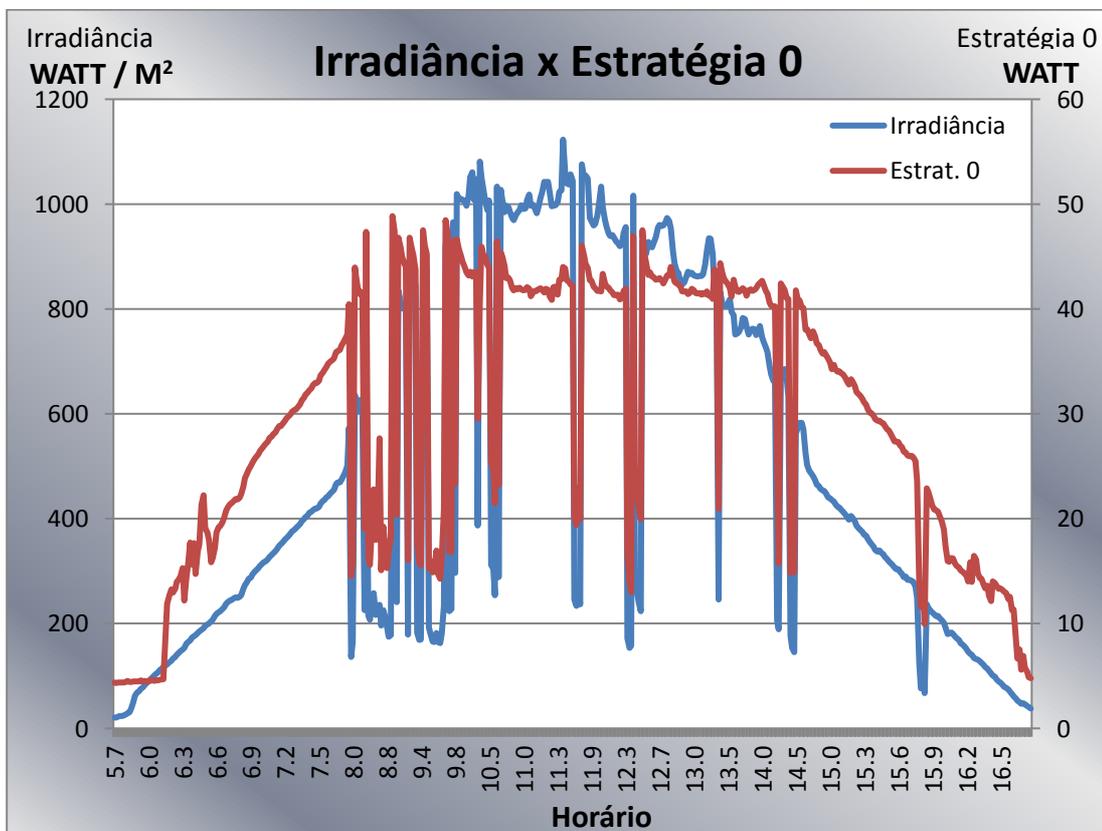
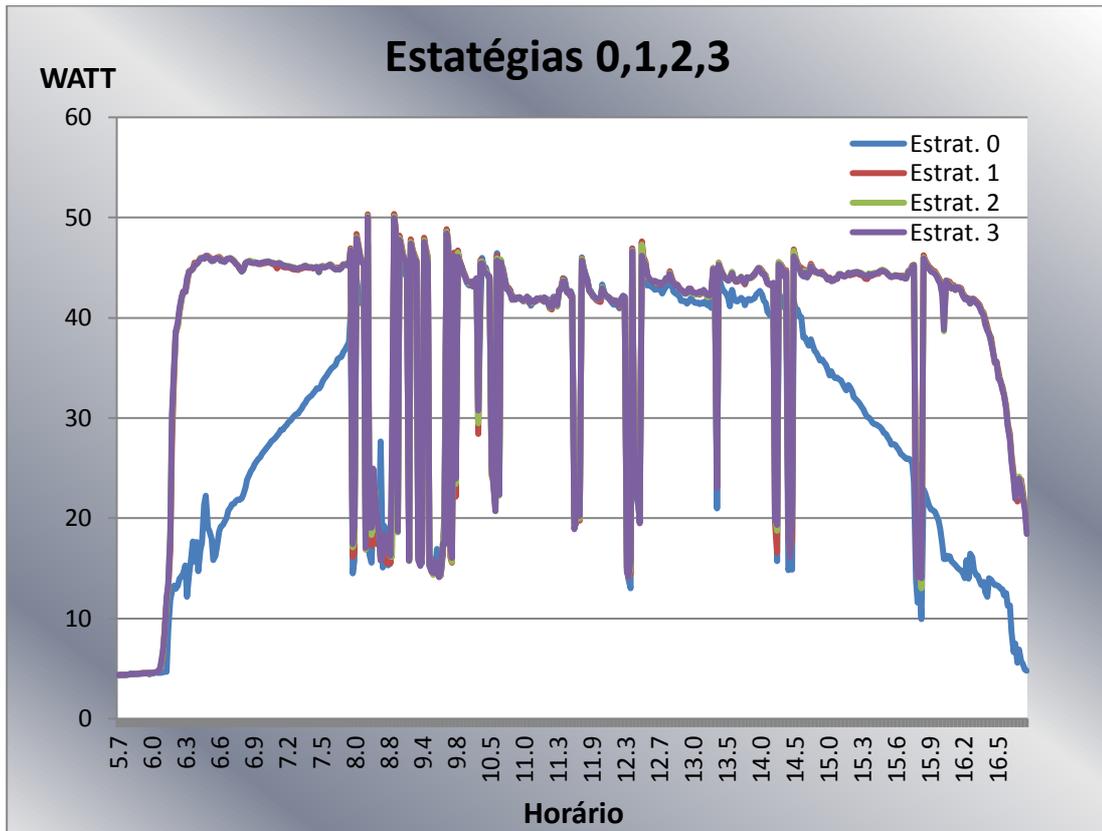


Figura 32 – Comparação entre estratégias para o dia 10/05



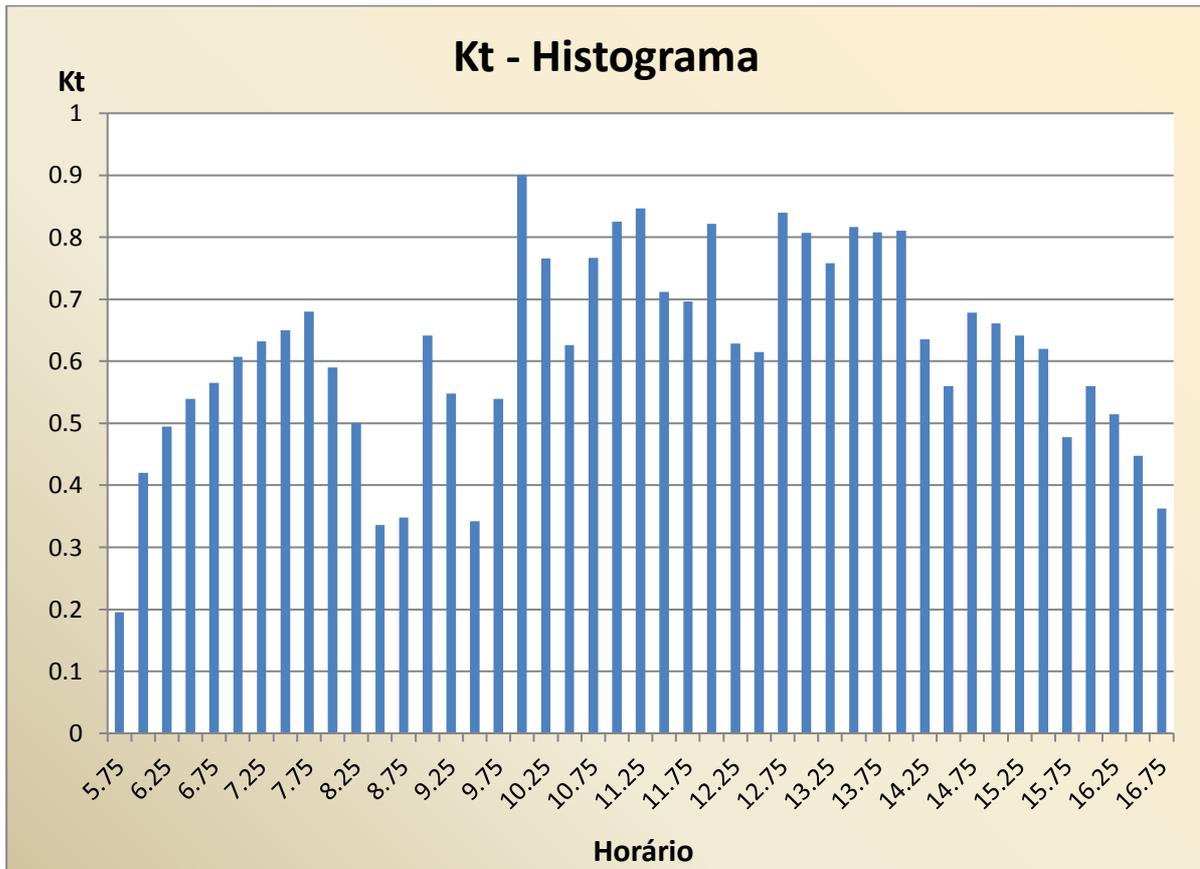
Comparado ao dia 23/04 que obteve apenas 8,82% de ganho da estratégia 2 sobre a 0, o dia 10/05 apresentou um aumento nesse ganho, que se elevou para 21,97%. E teria sido ainda maior sem esses diversos pontos de queda de irradiância. Quando foram filtrados apenas os intervalos com K_t superior a 0,3 e inferior a 0,6, isso resultou, de acordo com a distribuição vista na Figura 33, na seleção das faixas horárias laterais que representam o início e o fim do dia. Nesses intervalos laterais o ganho da estratégia 2 sobre a 0 foi, aproximadamente, de 76,8 %.

Retornando ao histograma de K_t para o dia 23/04 para comparação, aquele gráfico mostra valores menores para os intervalos laterais dos horários, justificando o aumento apresentado pelo dia 10/05.

Retornando a atenção à comparação entre as estratégias de acompanhamento solar, tema do trabalho, é ainda mais perceptível a coincidência entre os gráficos relativos às estratégias 1, 2 e 3, quase não se diferenciando.

Na Figura 33, conforme esperado, a distribuição do índice de claridade também demonstra correspondência com as quedas de irradiância global.

Figura 33 – Histograma de Kt para o dia 10/05

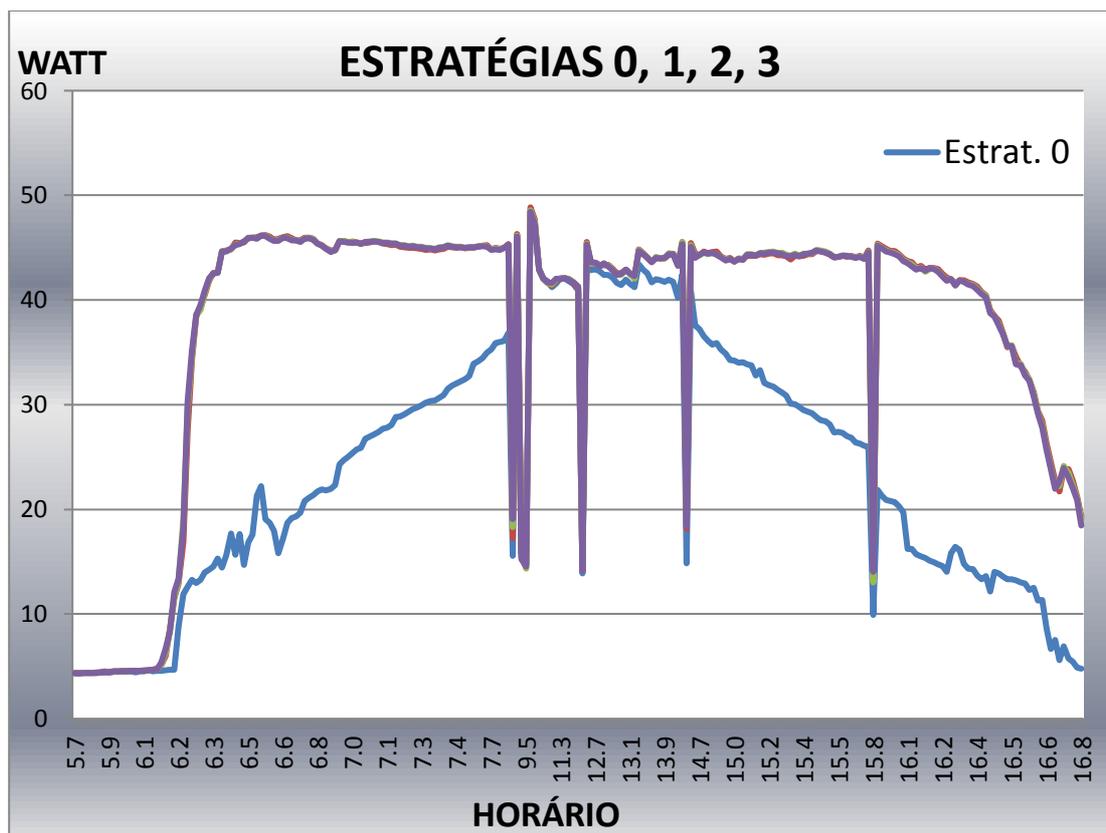


A essa altura estavam sendo analisadas diversas situações associadas ao Kt para os intervalos de um minuto estudados. A ideia seria a de encontrar em que condições haveria um ponto de maior diferenciação entre as estratégias 1 e 2, uma vez que a proximidade entre as estratégias 2 e 3 já estava compreendida. Ocorre que a estratégia 1 ocupa o centro de sete arcos de circunferência percorridos pela estratégia 2, cuja soma pode superar ligeiramente os 170° em função do dia. Esse valor dividido por 7 e depois por 2 fica pouco acima dos 12° e representa, em módulo, o desvio máximo de posicionamento da estratégia 1 em relação à estratégia 2, para cada arco. Além disso, é bom observar que esses 170° equivalem a 680 intervalos de rastreamento percorridos pela estratégia 2 comparados aos 7 intervalos da estratégia 1. Apenas 1,03% dos intervalos percorridos pela estratégia 2. Nessa geometria tridimensional, de que forma esse desvio angular de rastreamento iria diferenciar a captação de energia pelas estratégias 1 e 2? Seria necessário uma investigação a respeito.

De início, foi feita uma avaliação sobre os Kt's. Para um Kt baixo, é sabido que a irradiância difusa é predominante e isso então não traria as informações desejadas. A expectativa estava no estudo de Kt's médios e, especialmente, aqueles altos onde uma forte irradiância se faria sentir melhor pela posição de rastreamento mais bem colocada.

A investigação por faixas de valores de K_t continuou sem revelar um distanciamento razoável entre as estratégias 1 e 2. Talvez aumentando a restrição sobre a variabilidade da irradiância, a maior estabilidade atmosférica pudesse ressaltar os ganhos da estratégia 2 sobre a 1 durante os períodos onde os valores de K_t fossem mais elevados. Para isso, o desvio padrão máximo aceitável para a irradiância dos intervalos de rastreamento foi reduzido para 1 W/m^2 . Ainda assim a situação permaneceu a mesma, pois não houve diferença maior. Os valores de ganho da estratégia 2 sobre a 1 sempre estavam abaixo de 1%, mesmo para K_t 's elevados. A Figura 34 mostra o gráfico de desempenho entre as estratégias para esse novo caso de filtragem da irradiância. Comparando-o com a Figura 32, é fácil notar que diversos pontos de instabilidade foram suprimidos em virtude do aumento da restrição associada à variação da irradiância.

Figura 34 – Comparação entre as estratégias para $\sigma_{\text{Irrad}} \leq 1$



Em seguida, optou-se por uma abordagem geométrica. Como ponto de partida, escolheu-se o livro de Rabl (RABL, 1985) e as equações relativas ao rastreamento polar em um eixo. Observando a Figura 3, é possível escrever o vetor n_s , que representa o raio solar, da seguinte forma :

$$n_s = (\cos\delta \cos\omega, -\cos\delta \sin\omega, \sin\delta) \quad (4.3)$$

Pela mesma figura, considerando o eixo do plano de rastreamento sobre o plano xz e elevado de um ângulo β em relação à horizontal no ponto de latitude λ , será útil realizar uma mudança de coordenadas de modo que o eixo de rastreamento fique em paralelo a um novo eixo z' e a normal ao plano do rastreador fique paralela a um novo plano $x'y'$. Essa mudança de coordenadas será obtida através da rotação do plano xz em torno do eixo y por um ângulo $-\beta_0 = \beta - \lambda$, seguindo as mesmas definições de variáveis do tópico 2.2. Então, dessa rotação $-\beta_0$ em torno do eixo y associado às coordenadas (x,y,z) , surgem novas coordenadas (x',y',z') cuja relação é estabelecida por:

$$\begin{aligned} x' &= x \cos(-\beta_0) + z \sin(-\beta_0) \\ y' &= y \\ z' &= -x \sin(-\beta_0) + z \cos(-\beta_0) \end{aligned} \quad (4.4)$$

O versor do raio solar nas novas coordenadas será agora n'_s :

$$n'_s = (\cos\delta \cos\omega \cos\beta_0 - \sin\delta \sin\beta_0, -\cos\delta \sin\omega, \cos\delta \cos\omega \sin\beta_0 + \sin\delta \cos\beta_0) \quad (4.5)$$

Supondo o caso do painel não perfeitamente focado no acompanhamento solar, será inserido um erro de rastreamento através do ângulo ε . Assim, o ângulo original, de valor ω , passará a ser $\omega - \varepsilon$. Portanto, o versor da normal ao painel FV com esse erro de rastreamento pode ser escrito da seguinte forma:

$$n'_c = (\cos\gamma, -\sin\gamma, 0), \text{ em que } \gamma = \omega - \varepsilon \quad (4.6)$$

É importante observar que esse versor encontra-se em um plano paralelo ao plano $x'y'$ normal ao eixo de rastreamento e, portanto, expresso nas coordenadas (x',y',z') com o valor de $z'=0$.

É agora possível calcular o novo ângulo θ_{NS} (chamado aqui de θ'_{NS}) que a normal ao plano FV faz com o raio solar por meio do produto interno ($n'_c \cdot n'_s$). Resulta que:

$$n'_c \cdot n'_s = \cos \theta'_{NS} = \cos \gamma (\cos \delta \cos \omega \cos \beta_0 - \sin \delta \sin \beta_0) + \sin \gamma \cos \delta \sin \omega \quad (4.7)$$

Para uma elevação do plano igual à latitude local, $\beta_0 = 0$;

Assim, a expressão anterior se reduz para:

$$\cos \theta'_{NS} = \cos \delta (\cos \gamma \cos \omega + \sin \gamma \sin \omega), \text{ ou seja,} \quad (4.8)$$

$\cos \theta'_{NS} = \cos \delta (\cos (\omega - \varepsilon) \cos \omega + \sin (\omega - \varepsilon) \sin \omega)$, que, por identidade trigonométrica, pode ser simplificada, resultando em:

$$\cos \theta'_{NS} = \cos \delta \cos \varepsilon \quad (4.9)$$

Então, percebe-se que o cosseno do ângulo que representa a captação de energia é função do produto entre o fator de perdas associado à declinação solar ($\cos \delta$) (quando comparado a um sistema de rastreamento em dois eixos) e o fator de perdas associado ao erro angular de rastreamento ε , que é refletido no fator ($\cos \varepsilon$). Em uma montagem polar sem esse erro ε , o resultado volta a ser a expressão 2.9. Considerando que é desprezível a variação da declinação durante os intervalos de variação do $\cos \varepsilon$, é possível calcular a contribuição anual do erro de rastreamento quando $\cos \varepsilon$ assume diariamente um valor constante ou médio.

É importante enfatizar que essas perdas não levam em consideração as perdas de energia causadas pela atmosfera. Além disso, a radiação difusa pode, eventualmente, favorecer uma ou outra das estratégias avaliadas.

No caso particular de 7 intervalos da estratégia 1, o erro médio de rastreamento através do $\cos \varepsilon$ para $0 \leq \varepsilon \leq 12^\circ$, é, aproximadamente, 0,9927, equivalente a um erro fixo de $6,92^\circ$. Isso implica uma perda de energia em relação a um sistema polar bem rastreado de apenas 0,73%. Então essa é a explicação da razão pela qual não estava sendo observada uma diferença apreciável entre as estratégias 1 e 2. Se houvesse um erro fixo de 10° , a perda seria

de cerca de 1,52%, ao passo que se esse erro variasse como na estratégia 1, resultaria em 0,5% de perda. Seria uma redução significativa de 66% dessa perda.

Curiosamente, enquanto os valores de K_t e do desvio padrão da irradiância eram filtrados, buscando situações de máximo afastamento, se obteve o percentual de 0,63% de aumento da estratégia 2 sobre a 1 para um desvio padrão (de irradiância) inferior a 0,85 (W/m^2) e um K_t superior a 0,75.

Finalmente, a expressão matemática anterior pode ser reescrita para esse caso específico da estratégia 1, onde o erro ε de rastreamento assume um valor médio. Isso resulta em:

$$\overline{\cos \theta'_{NS}} = \cos \delta (\sin \varepsilon_m) / \varepsilon_m \quad (4.10)$$

Em que ε_m , valor máximo do erro de rastreamento, é dado em radianos.

O fator $(\sin \varepsilon_m) / \varepsilon_m$ é o resultado da integração de $\cos \varepsilon$ (no intervalo de 0 a ε_m) dividida pelo comprimento desse intervalo ($\varepsilon_m - 0$).

Considerando agora o valor médio anual de δ , o resultado anterior pode ser colocado como:

$$\overline{\overline{\cos \theta'_{NS}}} = 0,972 (\sin \varepsilon_m) / \varepsilon_m \text{ e a perda em } (1 - 0,972 (\sin \varepsilon_m) / \varepsilon_m) \quad (4.11)$$

Mas, se a montagem escolhida para avaliar as estratégias de rastreamento fosse não-polar (com o eixo ainda sobre o plano xz), seria a perda por erro de rastreamento função exclusiva desse erro de rastreamento ε de forma similar ao que se vê na expressão 4.9? Nesse caso, estratégias de rastreamento discreto por intervalos, tal como a estratégia 1, teriam a mesma utilidade e os intervalos contribuiriam de modo semelhante nas perdas totais relacionadas ao $\cos \theta'_{NS}$?

Para responder às questões anteriores, seja agora ψ'_{NS} o novo ângulo de rastreamento em uma montagem não-polar, com $\psi'_{NS} = \psi_{NS} - \varepsilon$. Assim, ψ'_{NS} representa um rastreamento com um erro ε em relação ao valor calculado para aquele instante. E o versor da normal ao painel FV com esse erro de rastreamento pode ser escrito da seguinte forma:

$$n'_c = (\cos \psi'_{NS}, -\sin \psi'_{NS}, 0)$$

(4.12)

Como consequência,

$$n'_c \cdot n'_s = \cos \theta'_{NS} = \cos \psi'_{NS} (\cos \delta \sin \omega / \tan \psi_{NS}) + \sin \psi'_{NS} \cos \delta \sin \omega \quad (4.13)$$

A expressão anterior pode ser simplificada, resultando em:

$$\cos \theta'_{NS} = \cos \delta \cos \varepsilon \left(\frac{\sin \omega}{\sin \psi_{NS}} \right) \quad (4.14)$$

Para manter o foco nos raios solares, a projeção desses raios (n'_s) sobre o plano perpendicular ao eixo de rastreamento deve apresentar o mesmo ângulo (relativo às componentes y' e x') que a normal (n'_c) que também se encontra nesse mesmo plano. Desse modo, há igualdade entre as tangentes desses ângulos representadas pelos respectivos quocientes (y'/x') das componentes desses versores. Assim, o ângulo ψ_{NS} da expressão anterior pode ser obtido pelo cálculo da tangente (ou y'/x') em relação às expressões 4.5 e 4.12. Então, conforme já foi apresentado na expressão 2.6, mas sem demonstração, ψ_{NS} é tal que:

$$\tan \psi_{NS} = \sin \omega / (\cos \omega \cos \beta_0 - \tan \delta \sin \beta_0) \quad (4.15)$$

Pela igualdade em 4.14, pode-se observar que, no caso polar, quando $\psi_{NS} = \omega$, essa expressão é reduzida ao caso particular dado em 4.9. Já o erro de rastreamento ε , surge dentro do fator $\cos \varepsilon$ (de modo semelhante ao caso polar) que depende apenas do aparato eletromecânico escolhido para o rastreador e de sua estratégia de rastreamento. Em termos da estratégia 1, o cálculo do valor médio de $\cos \varepsilon$ não poderá ser realizado facilmente uma vez que ε não varia linearmente com ω , mas depende de ψ_{NS} segundo 4.15. Esse valor médio não poderá substituir o $\cos \varepsilon$ na expressão 4.14 em virtude da presença do fator $\left(\frac{\sin \omega}{\sin \psi_{NS}} \right)$.

Esse último fator representa um ganho ou perda instantânea. E é o quociente quando se compara ao $\cos \theta'_{NS}$ do caso polar, ou seja, é o aumento ou diminuição relativa da radiação

incidente quando a inclinação da montagem polar é modificada para privilegiar a captação de energia durante o verão ou inverno.

Dentro da concepção de rastreamento discreto, para avaliar se a estratégia 1 ou similar teria perda aceitável para o caso não polar, seriam escolhidos dois parâmetros: uma inclinação de interesse β_0 e o número de intervalos discretos de rastreamento. A partir do número de intervalos, do período diário de rastreamento, da declinação δ , de ω e ψ_{NS} , o $\cos \varepsilon$ pode ser numericamente calculado a cada instante. Após simular o experimento através da expressão 4.14 para um determinado período do ano, se calcularia a perda média em relação ao mesmo sistema de rastreamento para o caso contínuo ideal (com $\varepsilon = 0$) e a comparação entre os resultados poderia revelar se as escolhas paramétricas iniciais seriam satisfatórias ou não.

5. CONCLUSÃO

Ficou demonstrado experimentalmente que:

- Em média, para dias pesadamente nublados com K_t inferior a 0,1, a estratégia 0 foi superior às demais, captando 6,2% a mais de energia que a 2;
- A estratégia 3, como se supunha, coincidiu em captação de energia com a estratégia 2 e a explicação apoia-se também no fato de que elas apenas se distanciariam no caso de erros substanciais da estratégia 2 que fossem corrigidos pela 3, mas não para um erro máximo de $1,7^\circ$ que corresponde ao limite de correção da estratégia 3. As estratégias 2 e 3 conceitualmente são diferentes, porém com o mesmo grau de acurácia de rastreamento, e por isso em casos práticos excludentes. O que vai determinar a utilização de uma ou outra será o seu custo. As duas corrigem também as imperfeições óticas provocadas por erros construtivos (erros de alinhamento de sistemas longos com centenas de metros);
- A estratégia 1 mostrou sua importância na medida em que a geometria desse rastreamento apresentou um caminho para soluções práticas, econômicas, robustas e de construção/manutenção simplificadas. A economia na energia de consumo do próprio rastreador é outro aspecto positivo e que vale ressaltar. A margem de erro de estratégias de posicionamento intervalado pode ser vista como um parâmetro de escolha para projetos desse tipo. As perdas relativas ao erro de rastreamento para 3, 5 e 7 intervalos e um ângulo total de rastreamento de 170° são, respectivamente, 4,1%, 1,46% e 0,73%. Os valores médios dos cossenos são, respectivamente, 0,959, 0,9854 e 0,9927. O intervalo único significa o caso particular de um sistema polar fixo e a consequente perda por geometria de 32,8% de energia (para um arco de 170°) representa o quanto estaria disponível para o sistema de rastreamento tentar recuperar se não fossem outras perdas relacionadas à atmosfera e às ineficiências envolvidas no processo. Enfim, é possível dizer que a tecnologia das sete posições discretas permite abrir mão de dispositivos de precisão e, por isso, tem um grande diferencial, tendo em vista a possibilidade da sua transformação em produto comercial.

Finalmente, do ponto de vista prático, foram construídos e testados 03 sistemas de rastreamento na medida em que o sistema multi rastreador pode ser desmembrado em equipamentos singulares. Toda a eletrônica, *software* e *firmware* foram concebidos para serem robustos e aptos para uma eventual comercialização.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões, para complementar e acrescentar novas informações, propõe-se:

- Simular e verificar experimentalmente a sensibilidade de erros no ângulo de rastreamento diante de uma variação maior da elevação do plano fora da sua posição polar. Essa nova posição poderia ser mais ainda voltada para o norte geográfico, privilegiando a coleta de energia durante os meses de inverno;
- Simular e verificar experimentalmente o efeito sazonal nas estratégias de rastreamento;
- Estudar detalhadamente o efeito do coeficiente de transmitância (K_t) nos diversos modos de rastreamento: verificar e ratificar o efeito da distribuição bimodal do K_t instantâneo;
- Otimizar em termos energéticos o número de posições da estratégia 1.

REFERÊNCIAS

ALEXANDRU, C.; POZNA, C. **Different tracking strategies for optimizing the energetic efficiency of a photovoltaic system**. Proceedings of the 16th IEEE International Conference AQTR, 3, 2008. 434-439.

CHEN, C. J. **Physics of Solar Energy** Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011

CLIFFORD, M.J.; EASTWOOD, D. **Design of a novel passive solar tracker** Solar Energy 77, 269–280, 2004.

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 83, pp. 298-305, 2009

DEITEL, P.; DEITEL, H. **Visual C# 2012 How to Program**. 5th. ed. [S.l.]: Deitel & Associates, Inc., 2013.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Process**. 3rd. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2006.

GIL, F.J.G.; MARTIN, M.D.S.; VARA, J.P.; CALVO, J.R. **A review of solar tracker patents in Spain**. TENERIFE: UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA, 2009.

GOSWAMI, D. Y.; KREITH, F.; KREIDER, J. F. **Principles of Solar Energy**. 2nd. ed. Philadelphia: Taylor & Francis, 2000.

GRUPO FAE, C. C. **ATLAS Solarimétrico do Brasil**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000.

KALOUGIROU, S. **Solar Energy Engineering: Processes and Systems**. 1st. ed. Elsevier, Inc, 2009.

LAUREANO, M. **Máquinas Virtuais e Emuladores: Conceitos, Técnicas e Aplicações**. [S.l.]: Novatec, 2006.

LEE, C; CHOU, P.; CHIANG, C.; LIN, C. **Sun Tracking Systems: A Review**. Sensors. 2009, 9, 3875-3890; doi:10.3390/s90503875

LORENZO, E; PÉREZ, M.; EZPELETA, A.; ACEDO, J. **Design of tracking photovoltaic systems with a single vertical axis** Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 10:533—543, 2002

LOVEGROVE, K.; STEIN, W. **Concentrating solar power energy: principles, developments and applications**. 1st.. ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012.

MARKVART, T.; CASTAÑER, L. **Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications** Elsevier Science Ltd, 2003.

MEHRTASH, M.; QUESADA, G.; DUTIL, Y; ROUSSE, D. **Performance Evaluation of Sun Tracking Photovoltaic Systems in Canada**. 20th Annual International Conference on Mechanical Engineering-ISME2012-2329, 16-18 May 2012. 1-4.

MONTEIRO, F. Á. M. **Desenvolvimento de um sistema de controle de baixo custo para rastreador solar**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) - Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife: Editora Universitária - UFPE, 2007.

MOUSAZADEH, H.; KEYHANI, A.; JAVADI, A.; MOBILI, H.; ABRINIA, K.; SHARIFI, A.; **A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output** Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, pp. 1800-1818, Jan. 2009

OGATA, K. **Modern Control Engineering**. 5th.. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2010.

OCHIENG, R. M. **Solar Collectors and Panels, Theory and Applications**, Dr. Reccab Manyala (Ed.), ISBN: 978-953-307-142-8, InTech, 2010.

OLIVEIRA, C. A. A. **Desenvolvimento de um protótipo de rastreador solar de baixo custo e sem baterias**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) -

Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife: Editora Universitária - UFPE, 2007.

RABL, A. **Active solar collectors and their applications**. New York: Oxford University Press, 1985.

REDA, I.; ANDREAS, A. **Solar position algorithm for solar radiation applications**. Solar Energy, p. 577 - 589, 2004.

RUBIO, F.R.; ORTEGA, M.G.; GORDILLO, F; LOPEZ-MARTINEZ, M. **Application of new control strategy for sun tracking**. Energy Conversion and Management, p. 2174–2184, 2007.

SHINGLETON, J.: **One-Axis Trackers – Improved Reliability, Durability, Performance, and Cost Reduction** Final Subcontract Technical Status Report, Shingleton Design LLC, NREL. Subcontract Report, NREL/SR-520-42769, 2008.

VIEIRA, P. H. A.; SANTOS, P. H. S.; SOUSA, C. M.; CORREA, A. C. **Sistema de rastreamento solar de um eixo para módulos fotovoltaicos utilizando a plataforma arduino**. Anais do V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife, 31/03-03/04 Abril 2014. Mídia em CD. Promovido pela ABENS,ISES, UFPE e Grupo FAE.