

Bruno André Marques Nascimento

Algoritmo de posicionamento e backtracking para seguidor solar



Bruno André Marques Nascimento

Algoritmo de posicionamento e backtracking para seguidor solar

Dissertação de Mestrado

Engenharia Eletrotécnica - Energia e Automação Industrial

Professor Doutor Daniel Filipe Albuquerque

Professor Doutor Miguel Francisco Martins de Lima



"O Universo é o Sonho de um Sonhador Infinito."

Fernando Pessoa

RESUMO

Nesta dissertação foi implementado um algoritmo de posicionamento solar e desenvolvido um algoritmo de *backtracking* num autômato programável (PLC) para o controle de seguidores solares de um eixo da empresa Martifer Solar. Optou-se por implementar o algoritmo de posicionamento solar SPA devido à elevada precisão nos resultados apresentados. Para além disso foi desenvolvido um algoritmo de *backtracking* com o objetivo de evitar as sombras resultantes da posição dos painéis vizinhos. Este fenómeno acontece devido à evolução diária do Sol, sendo que o ângulo de incidência solar é baixo para o nascer e pôr do Sol. O algoritmo de *backtracking* permite maximizar o ângulo de incidência solar sem produzir sombra nos painéis vizinhos, bem como a funcionalidade de adaptar os seguidores solares a terrenos inclinados. Em relação aos resultados obtidos, o algoritmo SPA foi comparado com um outro algoritmo de posicionamento solar com o objetivo de analisar as diferenças entre ambos os algoritmos e realçar que o algoritmo SPA é mais preciso. No entanto para o ângulo de inclinação dos painéis obteve-se um erro absoluto máximo de 1° e no algoritmo de *backtracking* obteve-se um erro absoluto máximo de 4°. De notar que o erro é elevado na transição do algoritmo SPA para o algoritmo de *backtracking*, devido à inversão do sentido de rotação dos motores dos seguidores solares nessa transição.

ABSTRACT

In this thesis was implemented a solar positioning algorithm and developed a backtracking algorithm in a programmable logic controller (PLC) to control several single-axis solar trackers for the Martifer Solar company. The SPA algorithm has been chosen to be implemented due to high precision in those results. In addition to the SPA algorithm has been developed a backtracking algorithm in order to avoid shadows resulting from the position of the neighboring panels. This phenomenon happens due to the daily evolution of the Sun and the solar incidence angle is down to the rising and setting of the sun. The backtracking algorithm maximizes the solar incidence angle without producing shadow in neighboring panels as well as the functionality of adapt the solar trackers to a sloping field. Regarding the results obtained, the SPA algorithm was compared with another solar positioning algorithm in order to analyze the differences between both algorithms and give emphasis that the SPA algorithm is more accurate. However for the panels tilt angle gave a maximum absolute error of 1° and backtracking algorithm gave a maximum absolute error of 4° . Therefore, the error is high in the transition from SPA algorithm to backtracking algorithm, due to the reversal of the solar trackers engines rotation in this transition.

PALAVRAS-CHAVE

Energias Renováveis
Painéis Fotovoltaicos
Seguidor Solar
Algoritmos de Posicionamento Solar
Autômato Programável
Algoritmo de *Backtracking*

KEYWORDS

Renewable energies
Photovoltaic Panels
Solar Tracker
Solar Positioning Algorithms
Programmable Logic Controller
Backtracking Algorithm

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus pais por todo o apoio e compreensão, pois sem eles não era possível completar este curso de mestrado.

Queria também agradecer aos meus orientadores, Professor Daniel Albuquerque e Professor Miguel Lima, por toda a ajuda e dedicação durante o desenvolvimento da dissertação.

Não posso deixar de agradecer aos meus monitores, Eng. José Pascoal e Eng. Pedro Sousa, pessoas que representaram a empresa Martifer Solar, mostrando estar à disposição para qualquer assunto relacionado com o tema da dissertação. Agradeço também à empresa Martifer Solar por disponibilizar todo o material necessário.

Queria agradecer a todo o corpo docente que constitui este Mestrado em Engenharia Eletrotécnica - Energia e Automação Industrial (MEE-EAI) da ESTGV, pois todos os professores têm a mesma importância para a conclusão deste grau académico.

Um muito obrigado ao Professor Paulo Moisés Costa, diretor do Mestrado MEE-EAI da ESTGV, por todo o apoio dado e por ter disponibilizado um laboratório para o desenvolvimento da dissertação (Laboratório de Investigação Aplicada em Energias Renováveis e Sustentabilidade Energética).

Deixo a minha gratidão à Escola de Tecnologia e Gestão de Viseu por ter aberto este curso de mestrado, uma mais-valia a nível de aprendizagem e a nível de preparação para o mercado de trabalho.

Queria também agradecer a todos os que me acompanharam ao longo do meu percurso académico, por toda a ajuda e incentivo que me levaram a concluir o mestrado.

Por fim queria agradecer a todos os meus amigos que acreditaram em mim e que sempre me apoiaram.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE TABELAS	xvii
ABREVIATURAS E SIGLAS	xix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento	5
1.2 Objetivos	5
1.3 Estrutura e Organização da Dissertação	6
2 POSICIONAMENTO SOLAR	7
2.1 Sistema Solar	7
2.2 Painéis Fotovoltaicos	10
2.3 Seguidores Solares	11
2.3.1 Seguidores Passivos	12
2.3.2 Seguidores Ativos	12
2.3.3 Sistemas de Controlo para Seguidores Solares	16
2.4 Sistemas de Seguimento	17
2.4.1 Seguimento com Foto-sensores	17
2.4.2 Seguimento com Visão Artificial	18
2.4.3 Seguimento sem sensores	19
2.5 Algoritmo de Posicionamento Solar (SPA)	19
2.5.1 Escala de Tempo	20
2.5.2 Cálculo do dia Juliano	21
2.5.3 Cálculo do Ângulo de Zénite	28
2.5.4 Cálculo do Ângulo de Azimute	28
2.5.5 Cálculo do Nascer e Pôr do Sol	29
3 ALGORITMO DE BACKTRACKING PROPOSTO	33
3.1 Backtracking	33
3.1.1 Algoritmo de Dan Weinstock e Joseph Appelbaum	35
3.1.2 Algoritmo de Backtracking Desenvolvido	37
4 SISTEMA DE POSICIONAMENTO DESENVOLVIDO	41
4.1 Hardware	41

4.1.1	Autômato Programável	42
4.1.2	Anemómetro	43
4.1.3	Inclinómetro	45
4.2	Software	46
4.2.1	PCWORX	46
4.2.2	WebVisit	51
4.2.3	Página Web	52
5	RESULTADOS	57
5.1	Azimute e Elevação do Sol	57
5.2	Algoritmos de Backtracking	59
5.3	Inclinação dos painéis	62
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	65
6.1	Conclusões Gerais	65
6.2	Trabalhos Futuros	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Consumo anual de petróleo a nível mundial.	2
1.2	Crescimento da população mundial ao longo da história.	2
1.3	Efeito de Estufa.	3
1.4	Previsão mundial do consumo de energia.	4
1.5	Previsão das energias renováveis nos próximos anos.	4
2.1	Movimentação de rotação e translação da Terra.	8
2.2	Hemisfério Norte e Sul.	8
2.3	Inclinação da Terra em relação ao Sol.	8
2.4	Projeções do Sol na Terra.	9
2.5	Célula de silício monocristalina e policristalina.	10
2.6	Paineis FV monocristalino e policristalino.	10
2.7	Rendimentos de produção de um painel fixo e de um seguidor solar de dois eixos.	11
2.8	Seguidor solar passivo.	12
2.9	Seguidor Polar de Eixo Único.	13
2.10	Seguidor de Eixo Horizontal.	14
2.11	Seguidor de Eixo Vertical.	14
2.12	Seguidor de dois Eixos.	15
2.13	Seguidor de Plataforma Rotativa de dois Eixos.	15
2.14	Controlo em malha aberta.	16
2.15	Controlo em malha fechada.	16
2.16	Foto-sensor com uso de um colimador.	17
2.17	Foto-sensor com base inclinada.	18
2.18	Foto-sensor com placa de sombreamento.	18
2.19	Ângulo solar de zénite e azimute.	20
2.20	Código em ST de limitação de intervalos entre 0° e 360°.	23
2.21	Código em ST de limitação de intervalos entre -180° e 180°.	31
3.1	Seguidores solares sem algoritmo de <i>backtracking</i>	34
3.2	Seguidores solares com algoritmo de <i>backtracking</i>	34
3.3	Projeção solar sobre os painéis FV.	35
3.4	Coeficiente de <i>backtracking</i>	36
3.5	Projeções solares sobre os painéis FV.	38
3.6	Implementação do algoritmo <i>backtracking</i> no MATLAB.	39
3.7	Seguidores solares com algoritmo <i>backtracking</i> (MATLAB).	40
3.8	Evolução diária dos seguidores solares.	40

4.1	Diagrama do sistema de posicionamento.	42
4.2	Autômato Phoenix Contact ILC 150 ETH.	42
4.3	Anemómetro Anemo 4403 v2.	43
4.4	Características do Anemómetro Anemo 4403 v2 (Frequência/Velocidade).	43
4.5	Ligação a 2 fios.	44
4.6	Ligação a 3 fios.	44
4.7	Efeito de <i>bouncing</i>	44
4.8	Inclinómetro.	45
4.9	Referência de um inclinómetro.	45
4.10	Ângulos de operação do seguidor solar.	46
4.11	Software PCWORX.	47
4.12	Estrutura do projeto desenvolvido (PCWORX).	47
4.13	Algoritmo SPA implementado no software PCWORX.	48
4.14	Bloco de funções de temporizadores (LADDER).	48
4.15	Cálculo da inclinação dos painéis.	49
4.16	Algoritmo de <i>backtracking</i> (PCWORX).	49
4.17	Estrutura dos sensores e dos alarmes (PCWORX).	50
4.18	Estrutura do software para processamento de dados (PCWORX).	50
4.19	Tipos de configurações das coordenadas geográficas.	51
4.20	Estrutura do sistema de produção no software PCWORX.	51
4.21	Página inicial do PLC.	52
4.22	Configuração da data e hora.	53
4.23	Configuração das coordenadas.	53
4.24	Configuração das propriedades do painel.	54
4.25	Configuração do <i>backtracking</i> e inclinómetro.	54
4.26	Página de configuração do modo de funcionamento.	54
4.27	Página inicial com janela de apresentação de alarmes.	55
5.1	Evolução da elevação do Sol na Primavera (20-04-2014).	58
5.2	Evolução do azimute do Sol na Primavera (20-04-2014).	58
5.3	Margens de erro instantâneo na Primavera (20-04-2014).	59
5.4	Ângulo de inclinação do painel solar (espaçamento entre painéis: 1.2 metros).	60
5.5	Coeficiente de <i>backtracking</i> (espaçamento entre painéis: 1.2 metros).	60
5.6	Ângulo de inclinação do painel solar (espaçamento entre painéis: 1.75 metros).	61
5.7	Coeficiente de <i>backtracking</i> (espaçamento entre painéis: 1.75 metros).	62
5.8	Ângulos de inclinação dos painéis solares.	63
5.9	Erro do ângulo de inclinação dos painéis solares (4 estações).	63

ÍNDICE DE TABELAS

2.1	Eficiência típica dos painéis FV.	11
5.1	Margens de erro nas respectivas estações do ano (MATLAB).	59

ABREVIATURAS E SIGLAS

AU	Unidades astronómicas (<i>Astronomical Units</i>).
FV	Fotovoltaico.
HTML	Linguagem de marcação para páginas Web. (<i>HyperText Markup Language</i>).
IP	Protocolo de Internet (<i>Internet Protocol</i>).
LADDER	Linguagem de programação com diagrama de contactos.
MATLAB	Software de cálculo numérico (<i>MATrix LABoratory</i>).
PC	Computador Pessoal (<i>Personal Computer</i>).
PLC	Autómato programável (<i>Programmable Logic Controller</i>).
PSA	Algoritmo de Posicionamento Solar (<i>Position Solar Algorithm</i>).
SPA	Algoritmo de Posicionamento Solar (<i>Solar Position Algorithm</i>).
ST	Linguagem de Programação Estruturada (<i>Strutured Text</i>).
UE	União Europeia.
JC	Século de Juliano (<i>Julian Century</i>).
JCE	Século de Juliano Efemérides (<i>Julian Ephemeris Century</i>).
JD	Dia de Juliano (<i>Julian Day</i>).
JME	Milénio de Juliano Efemérides (<i>Julian Ephemeris Millennium</i>).
kW	Unidade de potência, kilo Watt.
R	Horário de Nascer do Sol (<i>Sunrise Time</i>).
S	Horário de Pôr-do-Sol (<i>Sunset Time</i>).
T	Horário de Transição do Sol (<i>Transit Time</i>).
TAI	Tempo Atómico Internacional (<i>International Atomic Time</i>).
TT	Tempo Terrestre (<i>Terrestrial Time</i>).
UT	Tempo Universal (<i>Universal Time</i>).
UTC	Tempo Universal Coordenado (<i>Coordinated Universal Time</i>).

1. INTRODUÇÃO

O tema desta dissertação engloba as energias renováveis e diversos aspectos que são importantes na geração de energia elétrica através da energia solar. Este capítulo servirá para introduzir alguns conceitos relativos à relação consumo/produção de energia elétrica.

Inicialmente será apresentada uma breve introdução sobre o consumo e produção de energia através de combustíveis fósseis, tratando-se de um recurso que é cada vez mais escasso e por isso é necessário encontrar alternativas para combater essa escassez. Uma das alternativas é a aposta nas energias renováveis, mais precisamente em sistemas solares, uma vez que o Sol é uma fonte de energia considerada inesgotável e não provoca poluição [1].

Posteriormente será apresentado o enquadramento, bem como os objetivos e a estrutura desta dissertação.

Desde a pré-história que o homem tem procurado desenvolver as suas capacidades com base na sua inteligência para melhorar o seu conforto [2]. Isto levou a que, de dia para dia ocorressem evoluções, tornando o homem cada vez mais seguro e auto confiante. A partir daí, as ideias surgiram naturalmente com o objetivo de melhorar a sua qualidade de vida. O principal objetivo do ser humano é procurar soluções viáveis para que a vida no quotidiano seja mais acessível.

O impacto que a produção de energia tem sobre a atmosfera e a escassez dos recursos energéticos que asseguram a maioria das necessidades energéticas (petróleo, carvão e gás), torna inevitável a crescente utilização de energias renováveis. A Figura 1.1 mostra o crescimento do consumo de petróleo dos últimos anos, consumo esse que se começou a acentuar a partir da década de 50.

Essa escassez de recursos energéticos advém do crescimento populacional no último milénio

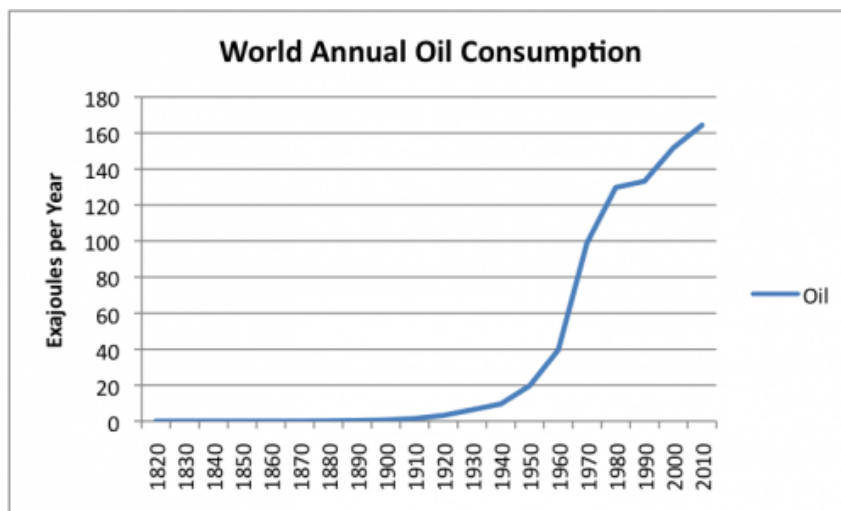


Figura 1.1: Consumo anual de petróleo a nível mundial (fonte: [3]).

(Figura 1.2), conduzindo a uma dependência da energia de outros países. Portanto a aposta nas energias renováveis é uma mais-valia, tanto a nível económico como a nível ambiental [4].

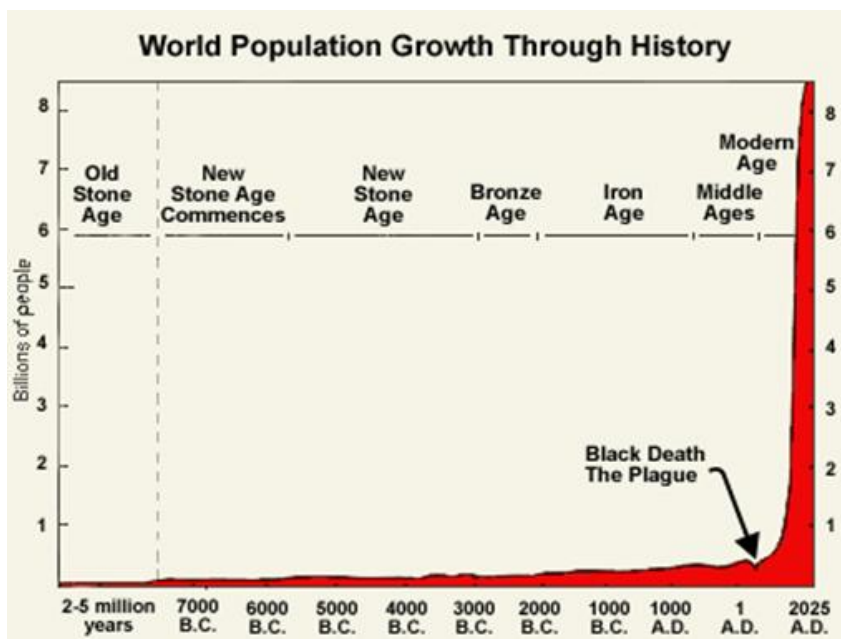


Figura 1.2: Crescimento da população mundial ao longo da história (fonte: [5]).

Assim, a principal prioridade é reduzir os consumos de combustíveis fósseis e manter os níveis de produção, investindo em sistemas de produção de energia provenientes de fontes renováveis. As energias renováveis representam várias formas de produzir energia através de energia existente na natureza, de entre os quais se destacam a energia solar, hídrica, eólica, geotérmica, maremotriz e biomassa [1].

Uma das vantagens das fontes de energia renovável é o simples facto de permitir a implementação de um sistema de produção local, o que trará benefícios a nível económico e de eficiência, uma vez que as perdas de energia em transporte são minimizadas [6]. Para além disso, as fontes

de produção solar são uma boa solução para diminuir o efeito de estufa existente na atmosfera. O efeito de estufa é um processo que ocorre com base na projeção de radiação solar pela superfície terrestre, em que parte dessa radiação é absorvida por determinados gases presentes na atmosfera. Como se pode observar na Figura 1.3, o calor que fica retido na atmosfera, resulta daquilo que é chamado de aquecimento global. Esse efeito pode ser produzido pelo dióxido de carbono (CO_2), mas existem outros gases que também produzem o mesmo efeito, tais como metano (CH_4), azoto (N_2), ozono (O_3), clorofluorcarbonos (CFCs), entre outros [7]. A aposta



Figura 1.3: Efeito de Estufa (fonte: [8]).

nas fontes de energia solar poderá minimizar o efeito de estufa, pois com o passar dos anos, haverá uma tendência para diminuir a produção de energia com recurso a fontes poluentes, como é o caso dos combustíveis fósseis. Nesse sentido, o efeito de estufa diminuirá e haverá menor presença na atmosfera dos gases mencionados anteriormente.

Como se pode observar pelo gráfico da Figura 1.4, nos próximos anos prevê-se uma mudança em relação aos sistemas de produção de energia elétrica. As energias renováveis serão cada vez mais uma alternativa para a produção de energia. Prevê-se um aumento dos sistemas de produção de energia renovável inversamente proporcional à produção de energia com recurso a combustíveis fósseis. Através disso, trocam-se sistemas poluentes por sistemas não-poluentes, o que na atualidade é um aspeto muito importante. Os líderes da União Europeia (UE) abordaram este tema e tiveram a iniciativa de projetar medidas para transformar a Europa numa sociedade de alta eficiência. O objetivo primordial será cumprir uma série de exigências até 2020, conhecidas como "20-20-20": redução de 20% nas emissões de gás com efeito de estufa; redução de 20% no consumo de energia primária que será traduzido num aumento da mesma percentagem em eficiência energética; 20% de consumo energético proveniente de fontes renováveis. O objetivo deste plano de ação é controlar e reduzir a procura de energia, fazendo com que a população não esteja dependente de recursos energéticos finitos [6]. Deste modo,

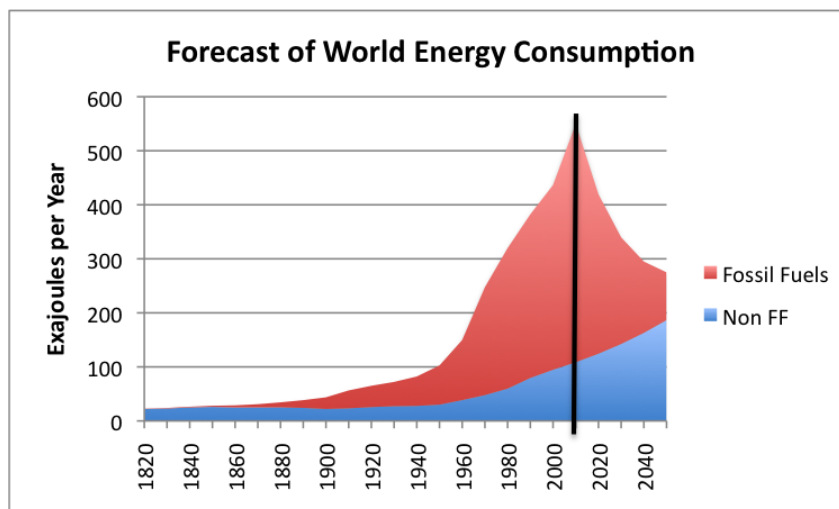


Figura 1.4: Previsão mundial do consumo de energia (fonte: [9]).

poder-se-á ter, no limite, um sistema totalmente auto-sustentável e rentável, comercializando para tal o excesso de produção de energia.

As projeções apresentadas no gráfico da Figura 1.5 mostram que nos próximos anos, as energias renováveis serão cada vez mais utilizadas, prevendo-se um aumento linear da produção de energia, mostrando que, num futuro próximo, os recursos de origem fóssil vão passar a ser uma energia cada vez menos usada (Figura 1.4).

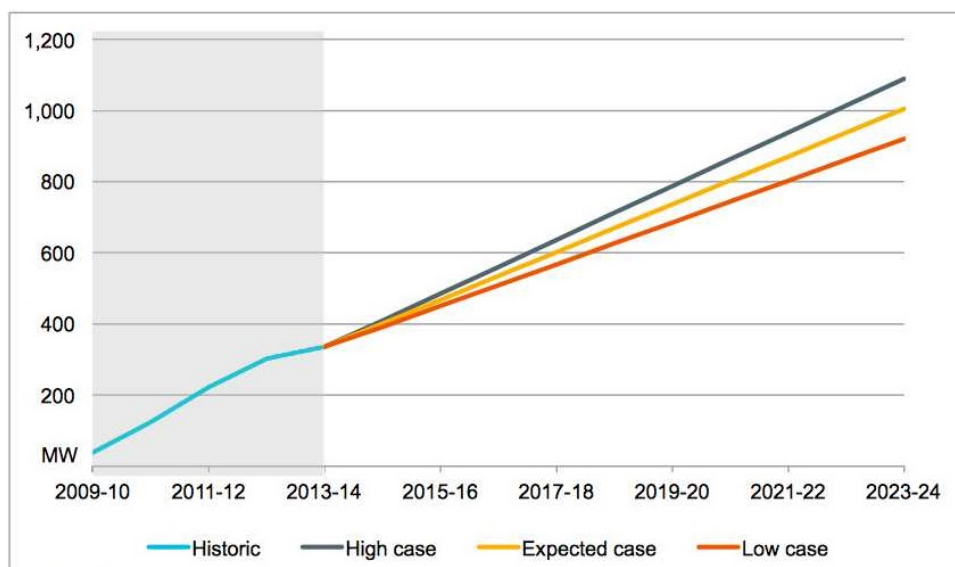


Figura 1.5: Previsão das energias renováveis nos próximos anos [10].

1.1 Enquadramento

O facto das energias renováveis estarem cada vez mais presentes no mercado, leva a que a tecnologia neste setor se torne cada vez mais eficiente. Na última década houve uma enorme aposta na energia solar, algo que veio inovar o sistema de produção energética e aproveitando dessa forma os recursos que a natureza nos faculta [10]. Os painéis solares são cada vez mais potentes ao mesmo tempo que o seu custo tem vindo a diminuir, logo isso torna a energia solar uma solução economicamente viável [11]. A esses fatores acresce o facto da energia solar se adequar a locais de difícil acesso, pois a sua instalação em pequena escala não obriga a um enorme investimento em linhas de transporte.

Por forma a otimizar a captação de energia incidente nos painéis fotovoltaicos, recorre-se, usualmente, a sistemas de posicionamento solar. Estes sistemas permitem obter informação relativamente à direção da radiação solar incidente num dado painel. Usando esta informação, os painéis solares podem ser orientados de forma a maximizar a captação da energia solar e consequentemente melhorar o rendimento do sistema. Este tipo de sistemas requerem, tipicamente, um elevado grau de precisão e imunidade a possíveis interferências. As interferências podem surgir através do próprio sistema implementado, no qual é necessário tomar medidas para que tal não aconteça. Uma das interferências é a presença de sombra nos painéis provocados por painéis adjacentes, de tal forma que a produção de energia poderá baixar drasticamente. Existem formas de solucionar esses problemas com a implementação de algoritmos de *backtracking* cujo objetivo é posicionar os painéis de forma a evitar que seja incidida sombra sobre os painéis adjacentes. Existem vários algoritmos de *backtracking* já desenvolvidos por Jae-Sub Ko e Dong-Hwa Chung [12], L. Navarte e E. Lourenço [13], Dorian Schneider [14] e Dorian Weinstock e Joseph Appelbaum [15].

1.2 Objetivos

Esta dissertação de mestrado tem como principal objetivo o desenvolvimento de um sistema capaz de direcionar o painel solar, de forma a maximizar a captação de energia solar. A este sistema é adicionado um algoritmo capaz de minimizar a sombra produzida por painéis vizinhos. Para além disso, o sistema deverá ser capaz de operar em terrenos com diferentes níveis de inclinação. Para tal o projeto apresenta os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolvimento e integração de uma unidade de controlo, usando um autómato programável (PLC) para o controlo de um seguidor solar;
- Desenvolvimento e implementação de um algoritmo que maximize a quantidade de energia solar recebida nos painéis solares;
- Desenvolvimento e implementação de um algoritmo de *backtracking*;

- Adaptação deste sistema a terrenos com diferentes níveis de inclinação.

O projeto foi desenvolvido no seio do Laboratório de Investigação Aplicada em Energias Renováveis e Sustentabilidade Energética (LIAERSE), na Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu (ESTGV).

De referir que, o grupo Martifer Solar contribuiu para o desenvolvimento desta dissertação, visto que facultou o equipamento necessário e disponibilizou-se para apoiar em qualquer situação proveniente do tema da dissertação.

1.3 Estrutura e Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. No capítulo 1 é apresentado uma breve introdução sobre o consumo e produção de energia, seguindo o enquadramento e os objetivos desta dissertação. No capítulo 2 são introduzidos alguns conceitos referentes ao posicionamento solar no qual são apresentados os seguidores solares, sistemas de seguimento e o algoritmo de posicionamento solar implementado. No capítulo 3 são apresentados os algoritmos de *backtracking* bem como o algoritmo desenvolvido. No capítulo 4 será apresentado o material utilizado para a implementação de todo o sistema fotovoltaico, desde o hardware até ao software. Serão apresentados os resultados obtidos no capítulo 5. Por último no capítulo 6 apresentam-se as conclusões e trabalhos futuros.

2. POSICIONAMENTO SOLAR

Neste capítulo será apresentado o Algoritmo de Posicionamento Solar (SPA) cujo objetivo é maximizar a potência de uma unidade de produção de energia.

Inicialmente será apresentada uma breve introdução sobre o sistema solar e os painéis fotovoltaicos (FV), pois será importante introduzir alguns conceitos para ajudar na apresentação do algoritmo SPA. Posteriormente serão apresentados vários tipos de seguidores solares e sistemas de seguimento já existentes. Por fim será descrito o algoritmo SPA, o qual permitirá obter todos os parâmetros que definem a posição do Sol.

2.1 Sistema Solar

No sistema solar, o Sol desempenha um papel muito importante no planeta Terra, porque sem o Sol não existiria vida no planeta Terra. A sua energia natural garante a existência e manutenção de todos os seres vivos, com base na fotossíntese realizada pelas plantas que salvaguarda a sua existência e a dos animais.

Na Figura 2.1 está presente uma imagem que ilustra os tipos de movimento realizados pelo planeta Terra, movimento de rotação e translação. O movimento de rotação ocorre quando o planeta executa um movimento em torno do seu próprio eixo, demorando cerca de 24 horas a dar uma volta completa, dando origem ao ciclo diurno e noturno. No movimento de translação, a movimentação do planeta é exercida em torno do eixo do Sol, desta vez demorando aproximadamente 8766 horas, que equivale a cerca de 1 ano completo.

O planeta Terra é composto por dois hemisférios, Norte e Sul, que estão separados por uma

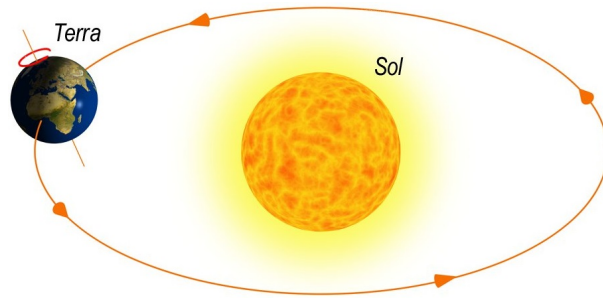


Figura 2.1: Movimentação de rotação e translação da Terra (fonte: [16]).

linha central imaginária, o Equador, dividindo igualmente o planeta em duas partes iguais, como ilustra a Figura 2.2. A particularidade de cada um dos hemisférios está relacionado com a quantidade de luz solar recebida por ambas as partes. Nas estações de maior e menor calor (Verão e Inverno), os hemisférios não recebem a mesma quantidade de luz solar, devido à inclinação da Terra em relação ao Sol. Essa inclinação está relacionada com o movimento de translação da Terra, sendo que esse movimento tem inclinações diferentes relativamente ao Sol. A Figura 2.3 auxilia na interpretação do movimento de translação, sendo que existem dois períodos em que a Terra se encontra com inclinações opostas ao Sol, 21 de Junho e 22 de Dezembro. A inclinação nestes dois períodos é de aproximadamente $\pm 23^\circ$ [17], parâmetro que irá definir a duração dos dias e das noites.

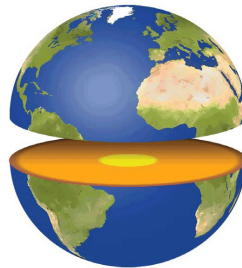


Figura 2.2: Hemisfério Norte e Sul (fonte: [18]).

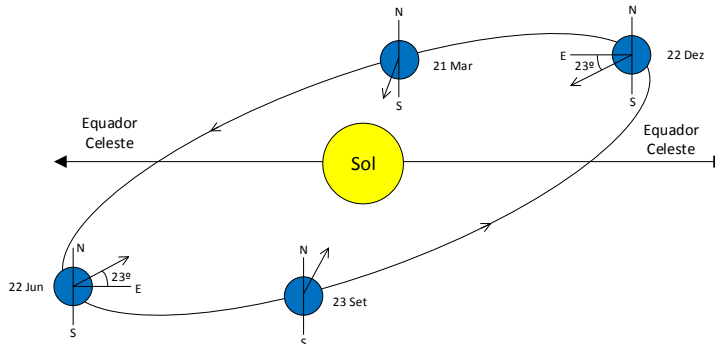


Figura 2.3: Inclinação da Terra em relação ao Sol (adaptado de [17]).

As datas presentes na Figura 2.3 referem-se à transição das estações do ano, dependendo do hemisfério em que se encontram, ou seja, as estações do ano no hemisfério do Norte não ocorrem

ao mesmo tempo no hemisfério do Sul. Os dias 21 de Março e 23 de Setembro são definidos como dias de Equinócio e os dias 22 de Junho e 22 de Dezembro são definidos como dias de Solstício [17]. Nos dias de Equinócio, a incidência da luz solar distribui-se uniformemente pelo hemisfério Norte e hemisfério Sul, obtendo assim uma distribuição horária equivalente pelo planeta, 12 horas diurnas e 12 horas noturnas. Nos dias de Solstício, a distribuição da luz solar não é igual nos dois hemisférios, o que significa que num dos hemisférios o dia irá ser maior do que a noite, consoante o dia de Solstício que esteja a ocorrer (Junho ou Dezembro).

Na Figura 2.4 estão representadas as projeções do Sol na Terra em cada estação do ano. A temperatura está relacionada com o volume ocupado entre a atmosfera e a superfície terrestre, sendo que quanto maior for essa área, menor será a temperatura naquela região.

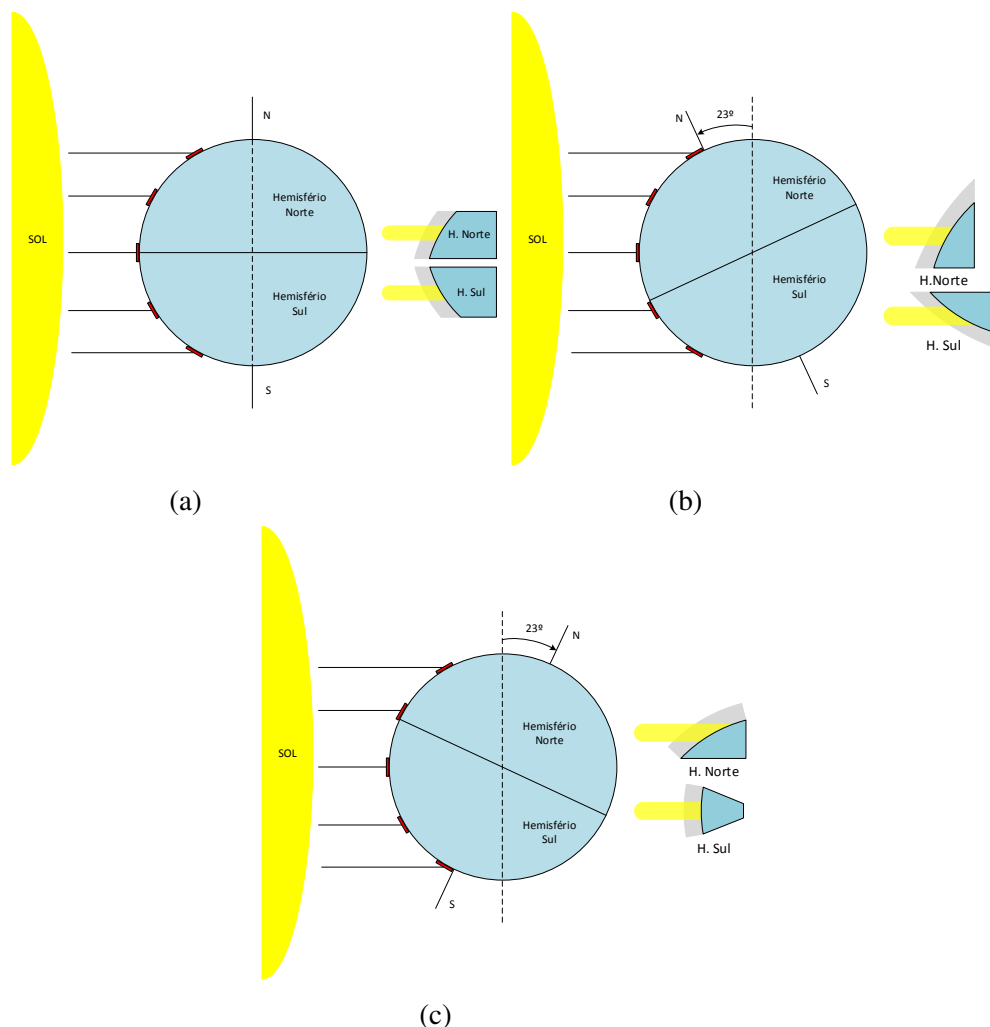


Figura 2.4: Projeções do Sol na Terra: (a) Equinócios de Março e Setembro, (b) Solstício de Junho e (c) Solstício de Dezembro (c).

2.2 Painéis Fotovoltaicos

Os painéis FV são constituídos por células fotovoltaicas capazes de absorver radiação solar e convertê-la em energia elétrica. As células que são utilizadas para a construção dos painéis FV são designadas por células de silício cristalino, porque apresentam uma maior escala de produção industrial [19]. Existem dois tipos de células de silício cristalino, o monocristalino e o policristalino, representadas na Figura 2.5. As células de silício monocristalino têm um rendimento superior às células de silício policristalino, porém a nível económico o papel inverte-se, sendo as de composição policristalino as menos dispendiosas. Isso deve-se ao facto da exigência na construção do painel ser diferente para ambos os elementos, realçando que ambos são construídos com o mesmo material.

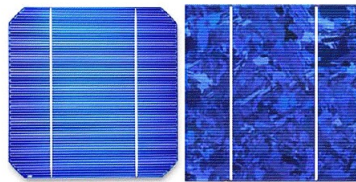


Figura 2.5: Célula de silício monocristalina e policristalina (adaptado de [20]).

Atualmente as células fotovoltaicas mais utilizadas têm uma eficiência de conversão na ordem dos 16%, contudo existem células com rendimentos na ordem dos 26%, feitas de arseneto de gálio, resultando num custo económico muito mais elevado e daí limitar a sua utilização [21, 22]. As células de arseneto de gálio foram desenvolvidas pelo Instituto Fraunhofer na Alemanha, sendo atualmente implementadas somente em ambiente espacial, dado o seu elevado custo económico.

Na Figura 2.6 mostram-se os dois painéis com dois tipos de células, monocristalina e policristalina. À esquerda está a configuração monocristalina e à direita a configuração policristalina. De notar que há diferença entre ambos, pois a apresentação de um painel monocristalino tem uma imagem mais regular, uma característica importante que poderá ser importante a quando da aquisição.



Figura 2.6: Painéis FV monocristalino e policristalino (adaptado de [23, 24]).

Na Tabela 2.1 estão presentes as margens de eficiência comparativamente às células de silício monocristalino e policristalino. A área por kW de potência de um painel FV é um parâmetro

muito importante, porque através dessa informação poder-se-á estimar a energia que poderá ser produzida numa dada área.

Tabela 2.1: Eficiência típica dos painéis FV (fonte: [25]).

Painel Fotovoltaico			
		Monocristalino	Policristalino
Eficiência da célula		16 - 19 %	14 - 15 %
Eficiência do módulo		13 - 15 %	12 - 14 %
Área necessária para gerar um 1 kW		7 m ²	8 m ²
Preço / m ²		200 € a 250 € ¹	150 € a 200 € ¹
Garantias ¹	Defeitos de fabrico	6 anos	
	Eficiência a 90 %	10 anos	
	Eficiência a 80 %	25 anos	

¹ Informação adquirida através do site <http://www.hcfportugal.com/eshop/>

2.3 Seguidores Solares

O seguidor solar é um mecanismo implementado nos painéis FV, que tem como objetivo garantir que os painéis fiquem na posição mais favorável para captar a máxima radiação possível. Desta forma, a eficiência de produção dos seguidores solares será superior à eficiência de produção de um painel estático. A Figura 2.7 mostra essa comparação, sendo que a maior diferença situa-se nos períodos da manhã e tarde, porque o seguidor solar acompanha a evolução diária da posição do Sol e aproveita a máxima radiação que é possível absorver em cada momento. Uma das vantagens deste sistema é o baixo custo de manutenção, que acrescentando aos painéis FV torna-se numa fonte de produção de energia viável. É importante referir que os 100%, representados na Figura 2.7, correspondem ao máximo de energia produzido num sistema de produção com seguidor solar no sentido de comparar com um outro sistema de produção com painéis fixos.

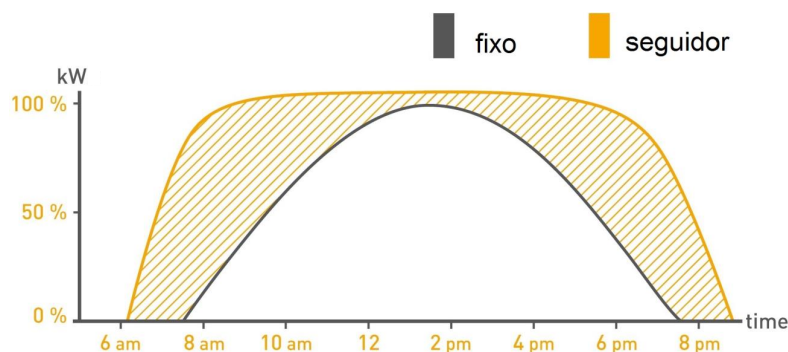


Figura 2.7: Rendimentos de produção de um painel fixo e de um seguidor solar de dois eixos (adaptado de [26]).

Os seguidores solares são caracterizados pela forma como estão estruturados e pelo número de eixos de operação. Existem dois tipos de seguidores, os seguidores passivos e os seguidores ativos.

2.3.1 Seguidores Passivos

Os seguidores solares passivos não usam qualquer tipo de fonte de energia elétrica para fazer movimentar o painel. Esta técnica é desenvolvida através de um estudo das propriedades físicas de um gás, denominado por Freon [25]. O funcionamento do sistema passa por variar o seu volume consoante a variação da temperatura, ou seja, se houver um aumento de temperatura, o volume do gás também irá aumentar. O aumento do volume será traduzido numa força aplicada ao painel, projetando o painel para uma posição próxima da ótima. A desvantagem deste tipo de seguidor é o facto de não ser muito preciso e essa precisão será tanto menor quanto menor for o ângulo de incidência solar durante o período diurno. Na Figura 2.8 está apresentado um exemplo de um seguidor solar passivo.

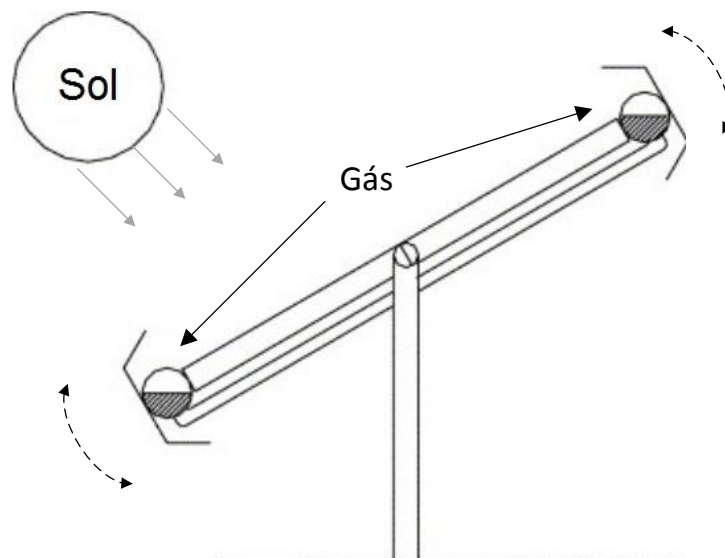


Figura 2.8: Seguidor solar passivo (adaptado de [25]).

2.3.2 Seguidores Ativos

Os seguidores solares ativos utilizam mecanismos com recurso à energia elétrica. O circuito de controlo poderá ser feito através de sensores de luminosidade ou algoritmos que indicam a posição do Sol, ativando o circuito de potência que comanda os motores elétricos que direcionam os painéis. Esta metodologia torna os seguidores ativos mais flexíveis para a implementação deste conceito em vários tipos de estrutura, entre as quais: seguidor polar de eixo único; seguidor de eixo horizontal; seguidor de eixo vertical ou de azimute; seguidor de dois eixos e seguidor de plataforma rotativa de dois eixos.

2.3.2.1 Seguidor Polar de Eixo Único

O Seguidor Polar de Eixo Único tem dois sentidos de rotação, baseados num único eixo existente (Figura 2.9). Esse eixo estará posicionado perpendicularmente à movimentação do Sol, ou seja, orientados para Norte e Sul com o objetivo de fazer o seguimento do Sol de nascente para poente com a variação do seu ângulo de rotação [25].

Este seguidor é bastante eficiente quando aplicado para zonas afastadas do equador (valores elevados de altitude), pois têm a particularidade de ajustar a inclinação dos painéis consoante a variação da latitude. O Seguidor Polar de Eixo Único é simples de implementar e é um seguidor com grande eficiência, pois nos Equinócios da Primavera e Outono a incidência solar estará perpendicular aos painéis. Em qualquer outro dia existirá um pequeno erro que não será a melhor eficiência de radiação solar.

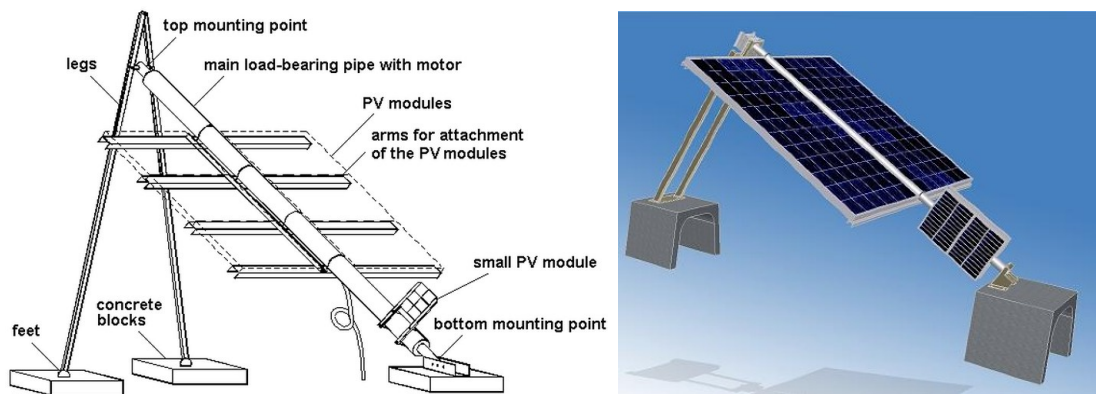


Figura 2.9: Seguidor Polar de Eixo Único (adaptado de [25]).

2.3.2.2 Seguidor de Eixo Horizontal

O Seguidor de Eixo Horizontal (Figura 2.10) tem um eixo de rotação exposto paralelamente à superfície terrestre. Deste modo, o seguimento solar será feito de uma forma linear, de Este para Oeste, admitindo que a posição do Sol não sofre alterações no parâmetro da latitude. Essa evolução verifica-se com menor variação nas proximidades das zonas equatoriais, tornando o sistema mais eficiente para estas zonas. Estes seguidores são conhecidos por seguidores de Zénite pelo simples facto da rotação do painel ser semelhante à descrição do ângulo de zénite. A sua grande vantagem é a possibilidade de colocar vários painéis FV sobre o eixo de rotação, aproveitando toda a área de radiação exposta.

2.3.2.3 Seguidor de Eixo Vertical

No Seguidor de Eixo Vertical (Figura 2.11), o eixo de rotação fica localizado no topo de uma base vertical fixa. É vulgarmente conhecido por seguidor azimutal e tem uma inclinação fixa que é definida pela latitude da localização. Quanto maior for a latitude, maior será a inclinação



Figura 2.10: Seguidor de Eixo Horizontal (fonte: [27]).

do painel em relação à superfície terrestre. Deste modo, os seguidores de eixo vertical apresentam um maior rendimento em localizações com latitudes elevadas, porque esse parâmetro será controlado pela inclinação do painel em relação à superfície terrestre. A aplicação destes seguidores verticais são semelhantes aos seguidores polares, porém com estruturas diferentes. Nos seguidores polares também é possível alterar a inclinação dos painéis, alterando a dimensão dos suportes traseiros do painel.



Figura 2.11: Seguidor de Eixo Vertical (fonte: [28]).

2.3.2.4 Seguidor de dois Eixos

O Seguidor de dois Eixos (Figura 2.12) dispõe de dois eixos de rotação, um no sentido Norte-Sul e outro no sentido Este-Oeste. Neste caso, o painel FV irá efetuar o seguimento com grande rigor, uma vez que se consegue deslocar para cada ponto da localização do Sol de forma que a radiação fique perpendicular ao painel. Em parques solares de grande dimensão, este é o seguidor mais utilizado dada a sua flexibilidade no seguimento solar.

Uma das desvantagens deste sistema deve-se ao facto de ser necessário uma estrutura bastante

robusta para suportar todo o equipamento. Para além disso, em situações de velocidades elevadas do vento é necessário o bloqueio dos motores, estando sujeito a esforços mecânicos bastante elevados. O facto de envolver dois eixos de rotação torna o sistema mais complexo, tornando-o mais dispendioso em termos de aquisição e manutenção, com o qual pode ser substituído por um seguidor solar mais simples e com rendimentos próximos [25]. Um seguidor de eixo vertical (Figura 2.11) tem um rendimento inferior a 7% comparativamente a um seguidor de dois eixos. Assim, apesar desta diferença pode-se justificar a opção por um seguidor mais simples.



Figura 2.12: Seguidor de dois Eixos (fonte: [29]).

2.3.2.5 Seguidor de Plataforma Rotativa de dois Eixos

O Seguidor de Plataforma Rotativa de dois Eixos (Figura 2.13) tem uma plataforma que irá executar um movimento rotativo de forma a efetuar o seguimento do Sol no sentido Este-Oeste. O seguimento Norte-Sul será feito com base num eixo hidráulico, cujo objetivo é variar a inclinação do painel. É um seguidor robusto pois pode coordenar um número elevado de painéis em simultâneo. A grande desvantagem desta estrutura é o facto de necessitar de manutenção periódica, devido às zonas móveis do sistema sofrerem um desgaste acentuado e também a necessidade de remover obstáculos que possam surgir na área do seguidor. Este tipo de seguidores necessitam de muito espaço para exercer o seguimento, tornando o sistema desvantajoso, porque hoje em dia o que se pretende são seguidores que ocupem pouco espaço, aproveitando toda a sua área ocupada.

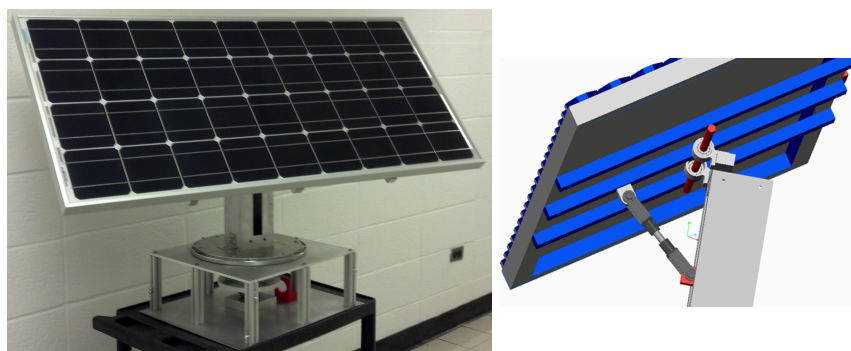


Figura 2.13: Seguidor de Plataforma Rotativa de dois Eixos (adaptado de [30]).

O tipo de seguidor utilizado para a implementação do algoritmo de posicionamento solar na região de interesse da empresa promotora é o seguidor polar de eixo único ou o seguidor de eixo vertical, porque a empresa trabalha com seguidores de um eixo para latitudes elevadas.

2.3.3 Sistemas de Controlo para Seguidores Solares

Os sistemas de controlo têm como principal objetivo garantir o funcionamento de toda a estrutura dentro dos parâmetros definidos. Existem várias formas de efetuar o seguimento solar, nomeadamente através das configurações de controlo em malha aberta ou controlo em malha fechada.

2.3.3.1 Controlo em malha aberta

O controlo em malha aberta é um sistema que não possui realimentação, porque a entrada não depende da saída. Este sistema consiste em aplicar um sinal à entrada do sistema, esperando-se que na saída o sinal consiga atingir um comportamento desejado. Assim, os dados que forem inseridos na entrada serão projetados para a saída. O controlo em malha aberta deverá ser aplicado a um sistema determinístico, em que se conhece o seu modo de operação, caso contrário pode-se obter um resultado diferente do esperado. Na Figura 2.14 apresenta-se um diagrama simples para a configuração em malha aberta.

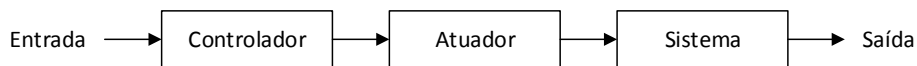


Figura 2.14: Controlo em malha aberta.

2.3.3.2 Controlo em malha fechada

O controlo em malha fechada é baseado num comando cíclico, onde as variáveis do sistema estão sempre a ser atualizadas periodicamente. A atualização é feita através de sensores de luminosidade que medem a posição do Sol ao longo do dia. Estes sensores podem ser LDR (Light Dependent Resistor), foto-díodos e foto-transístores. Na Figura 2.15 apresenta-se um diagrama de um sistema de controlo de malha fechada, onde basicamente existirá um controlador associado a um atuador que será atualizado com recurso aos sensores colocados no painel FV. Neste caso específico, o atuador será composto pelos motores que farão movimentar o painel FV e os sensores estão associados a foto-sensores.

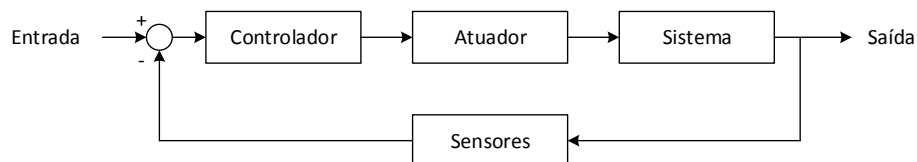


Figura 2.15: Controlo em malha fechada.

2.4 Sistemas de Seguimento

2.4.1 Seguimento com Foto-sensores

Os foto-sensores são dispositivos que variam as suas características elétricas consoante a quantidade de radiação solar. Estes dispositivos são aplicados em circuitos de malha fechada, uma vez que estão em constante leitura, sendo feita a atualização dos dados de uma forma cíclica. Geralmente são usados dois foto-sensores aplicados em cada extremo do painel, de forma a verificarem-se variações do valor obtido pelos sensores consoante a variação de incidência solar. Se o valor em ambos os sensores for diferente, significa que o ângulo de incidência do Sol não é perpendicular ao painel e será enviada uma informação para ativar os atuadores. Nas Figuras 2.16, 2.17 e 2.18 estão apresentadas três técnicas de aplicação para este tipo de tecnologia. Na Figura 2.16 estão dispostos três foto-sensores dentro de um colimador¹ para analisar qual o ângulo de incidência do Sol. A existência de radiação solar num só dos foto-sensores indica que o painel não está perpendicular à incidência solar. A verificação de diferentes valores de corrente nos foto-sensores irá acionar os atuadores para o seguidor solar efetuar a rotação para a posição correta. Esta situação pode ocorrer no período da manhã, quando começam a aparecer os primeiros raios solares e os painéis se encontram na posição de repouso (paralelo ao solo).

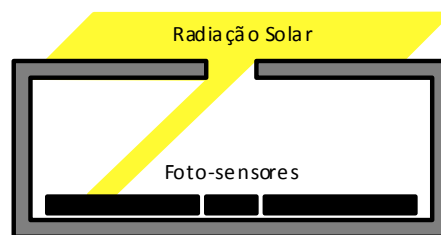


Figura 2.16: Foto-sensor com uso de um colimador.

A aplicação de uma base inclinada na estrutura do painel também poderá resolver os problema de posicionamento (Figura 2.17). O princípio de funcionamento desta estrutura é a mesma do caso anterior, sendo que neste caso os foto-sensores estão dispostos de forma diferente.

A solução mais simples para a análise do ângulo de incidência solar consegue-se com a colocação de um obstáculo entre os dois foto-sensores, representada na Figura 2.18. Desta forma, a análise faz-se da mesma forma dos casos anteriores, com a vantagem da simplicidade de implementação e regulação dos foto-sensores.

¹colimador: dispositivo construído a partir de um material que absorve radiação, usado para direcionar e suavizar feixes de radiação [25].

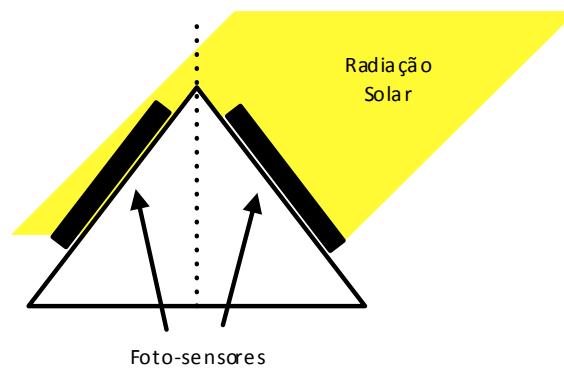


Figura 2.17: Foto-sensor com base inclinada.

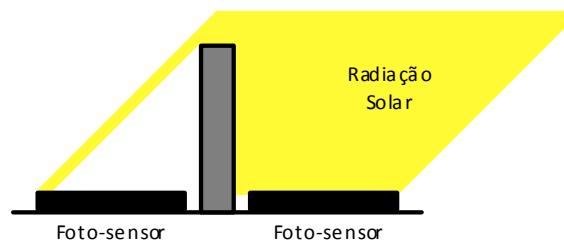


Figura 2.18: Foto-sensor com placa de sombreamento.

2.4.2 Seguimento com Visão Artificial

A visão artificial é uma tecnologia que pode ser usada num seguidor solar em que se usa um sistema de aquisição de imagem para determinar a posição do Sol. Este método de seguimento solar usa algoritmos com maior complexidade em relação aos seguidores com foto-sensores. O princípio de funcionamento deste seguidor passa por definir um ponto central no campo de visão da câmara com o objetivo de controlar a posição do Sol, recorrendo a essa referência. Desse modo, o painel terá uma grande precisão no seguimento, sendo que o algoritmo de controlo terá a funcionalidade de manter o Sol nessa posição referencial em cada instante. O que torna o sistema desvantajoso é o facto de ser necessária uma manutenção periódica e a sua instalação ser complexa. A câmara terá que ter filtros de proteção para evitar que o equipamento perca precisão ou se danifique. Para além disso, as poeiras e a humidade na lente ótica da câmara podem influenciar a leitura dos dados do algoritmo e comprometer a resposta do seguidor solar. Por outro lado, a grande vantagem de um seguidor com visão artificial é o facto de ter uma grande resolução e precisão na deteção de imagens conhecidas. Tem a capacidade de visualizar a aproximação de nuvens que, em seguidores solares com foto-sensores poderá ser um grande problema. As câmaras têm uma grande visão periférica, o que ajuda imenso na implementação dos algoritmos, porque têm uma grande margem de utilização.

2.4.3 Seguimento sem sensores

Este tipo de seguimento é feito em malha aberta através do cálculo das coordenadas solares. Os algoritmos de controlo podem ser classificados em três grupos distintos, dependendo da complexidade da implementação [31]. O primeiro grupo passa pela utilização de expressões simples, onde o único dado necessário é a data. O controlo é feito com base em incrementos periódicos do ângulo de seguimento. Os autores que contribuíram na elaboração do algoritmo foram Copper (1969), Spencer (1971), Swift (1976) e Lamm (1981) [31]. O segundo grupo é um algoritmo mais complexo, onde são utilizados vários dados, como a latitude, longitude e horário da localização do painel, sendo traduzidas em coordenadas solares (azimute e elevação) [31]. As margens de precisão de erro para estes algoritmos andam a rondar os 0.28° , como é o caso do algoritmo PSA [32]. O terceiro grupo é uma versão mais recente e mais utilizada, porque é um algoritmo muito mais preciso no que se refere a sistemas de posicionamento solar. A complexidade deste algoritmo advém da quantidade de cálculos efetuados, nos quais são necessários os seguintes parâmetros: data; hora; temperatura; pressão, coordenadas de localização (latitude e longitude); ângulo de inclinação e elevação do painel. O resultado de algoritmos desta complexidade são traduzidos numa precisão extraordinária da posição do Sol com margens de erro a rondar os 0.0003° , como é o caso do algoritmo SPA [33], algoritmo que foi usado como base para o desenvolvimento desta dissertação. Este algoritmo foi descrito por Jean Meus (1991) [34], estando sujeito a novas edições ao longo dos anos, sendo a última versão editada por Ibrahim Reda e Afshin Andreas em 2008 [33].

2.5 Algoritmo de Posicionamento Solar (SPA)

O Algoritmo de Posicionamento Solar (SPA) é um algoritmo que tem como objetivo determinar a posição do Sol, utilizando um ou mais painéis FV. Utiliza fórmulas matemáticas, baseando-se na ciência astronómica que tem como objetivo fazer o seguimento da posição do Sol numa dada localização no mapa. É importante que os painéis, sempre que possível, estejam perpendicular à radiação solar, pois desse modo irá ser extraída a sua máxima potência. Uma vantagem deste algoritmo é o facto de não ser influenciado pelas condições climáticas, ou seja, a inexistência do Sol num dado dia não irá interferir no posicionamento solar do painel.

O algoritmo que se segue foi desenvolvido por Jean Meeus em 1991, tendo sido sujeito a atualizações depois disso, sendo que a última atualização, "Solar position algorithm for solar radiation applications", foi editada por Ibrahim Reda e Afshin Andreas em 2008, no laboratório da NREL (National Renewable Energy Laboratory) [33]. Nas secções seguintes será feita uma transcrição do algoritmo SPA. Os parâmetros que vão controlar o painel FV são o ângulo solar de zénite e o ângulo solar de azimute. O ângulo solar de zénite é definido pela altura em que o Sol se encontra em relação ao horizonte, podendo variar entre os 0° e 90° . O ângulo solar de azimute é definido pela direção em que o Sol se encontra, podendo variar entre 0° e 360° . O exemplo

da Figura 2.19 demonstra a utilidade destes dois parâmetros (zénite e azimute), sendo que para calcular a localização do ângulo de zénite em relação ao Sol tem-se:

$$\theta_{zenite} = 90 - \theta_{altitude} \quad (2.1)$$

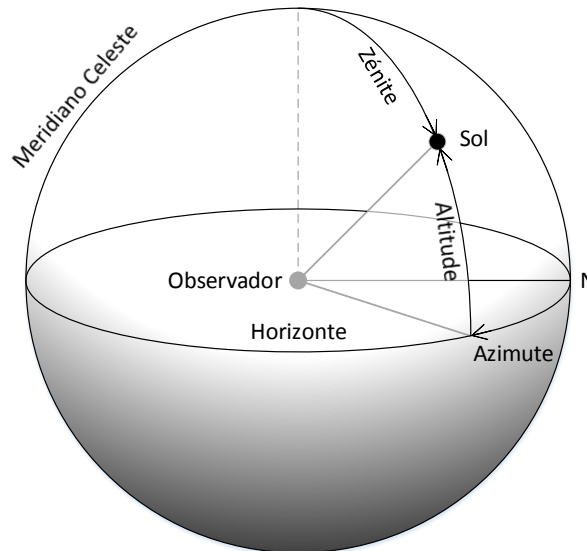


Figura 2.19: Ângulo solar de zénite e azimute.

2.5.1 Escala de Tempo

Antes de se começar a análise detalhada do procedimento de cálculo do algoritmo é importante referir os vários tipos de escala de tempo:

- O Tempo Universal (UT) ou tempo de Greenwich é baseado no movimento de rotação da Terra, contado a partir da meia-noite (0 horas). UT é o parâmetro usado para calcular a posição do Sol no algoritmo;
- O Tempo Atómico Internacional (TAI) é uma escala de tempo que utiliza a informação combinada de cerca de 200 relógios atómicos de alta precisão;
- O Tempo Universal Coordenado (UTC) é o padrão de tempo primário pelo qual o mundo regula os relógios e o tempo. É mantido com uma margem de erro máxima de 0.9 segundos de UT, fazendo sincronismos periódicos;
- O Tempo Terrestre (TT) é a escala de tempo de efemérides para observações da superfície da Terra.

As seguintes equações descrevem a relação entre as escalas de tempo acima representadas (em segundos):

$$TT = TAI + 32.184 \quad (2.2)$$

$$UT = TT - \Delta T \quad (2.3)$$

onde ΔT é a diferença entre o tempo de rotação da Terra e o Tempo Terrestre.

Por outro lado,

$$UT = UTC + \Delta UT \quad (2.4)$$

onde ΔUT é a fração de segundo, positivo ou negativo, adicionada ao UTC para ajustar a irregular rotação da Terra.

2.5.2 Cálculo do dia Juliano

Nesta secção inicialmente será introduzido o cálculo do dia Juliano. Depois será apresentado todo o procedimento de cálculo do algoritmo de posicionamento com o objetivo de obter os valores do ângulo de azimute e zénite do Sol. Através desses dados conhece-se a posição instantânea do Sol em todos os períodos horários.

O dia Juliano (JD) começa em 1 de Janeiro do ano 4712 a.C. às 12:00:00 UT e é calculado usando UT. De notar que existe um desfasamento de 10 dias entre o calendário Juliano e o Gregoriano, onde o calendário Juliano acaba em 4 de Outubro de 1582 (JD = 2299160) e 10 dias depois começa o calendário Gregoriano a 15 de Outubro de 1582.

$$JD = INT [365.25 \times (Y + 4716)] + INT [30.60001 \times (M + 1)] + D + B - 1524.5 \quad (2.5)$$

onde:

- INT é a parte inteira do termo calculado (ex.: $8.7 = 8$, $8.2 = 8$, $-8.7 = -8$, etc);
- Y é o ano (ex.: 2014, 2015, etc);
- M é o mês do ano (ex.: 1 para Janeiro, 2 para Fevereiro, etc);
- D é o dia do mês no formato decimal (ex.: para o segundo dia do mês às 12:30:30 UT, $D = 2.5211820556$);
- B é igual a zero para o calendário Juliano, isto é, usando $B = 0$ em (2.5), $JD < 2299160$.
 $B = 2 - A + INT (A/4)$ para o calendário Gregoriano, onde $A = INT (Y/100)$.

É possível mudar para o horário local, basta mudar o fuso horário para uma fração diária (dividindo por 24) e subtraindo o resultado de JD.

De seguida será calculado o dia Juliano Efemérides.

$$JDE = JD + \frac{\Delta T}{86400} \quad (2.6)$$

onde $\Delta T = TT - UT$, expresso em segundos. De notar que 86400 corresponde a 24 horas em segundos.

Para o século juliano (JC) e para o século juliano efemérides (JCE) utilizam-se as seguintes expressões:

$$JC = \frac{JD - 2451545}{36525} \quad (2.7)$$

$$JCE = \frac{JDE - 2451545}{36525} \quad (2.8)$$

Numa primeira análise existe alguma semelhança no cálculo de (2.7) e (2.8), pois são usadas as mesmas constantes. A constante 2451545 corresponde ao dia juliano da data 1 de Janeiro de 2000, época padrão utilizada, e 36525 corresponde à multiplicação dos dias médios anuais (365.25) com a constante correspondente a um século.

O cálculo do milênio juliano efemérides (JME) utiliza a seguinte expressão:

$$JME = \frac{JCE}{10} \quad (2.9)$$

O próximo passo será calcular a longitude, latitude e o vetor raio heliocêntrico da Terra (L, B, R). O termo heliocêntrico significa que a posição da Terra é calculada em relação ao centro do Sol.

Para cada linha da Tabela ?? (ver Anexo ??), calcula-se o termo $L0_i$ (em radianos)

$$L0_i = A_i \times \cos(B_i + C_i \times JME) \quad (2.10)$$

onde A_i , B_i e C_i são valores das colunas A, B e C da i -ésima linha da Tabela ??.

Após todas estas operações será calculado o somatório de todos os valores de $L0$ correspondente a cada linha.

$$L0 = \sum_{i=0}^n L0_i \quad (2.11)$$

onde n é o número de linhas para o termo $L0$ na Tabela ??.

Este processo é repetido para os termos $L1$, $L2$, $L3$, $L4$ e $L5$ usando (2.10) e (2.11), sendo que 0 é alterado para 1, 2, 3, 4, 5 e os valores das colunas A, B e C são os correspondentes aos termos da Tabela ??.

Finalizando todo este processo, já se tem toda a informação necessária para o cálculo da longitude heliocêntrica da Terra:

$$L = \frac{L0 + L1 \times JME + L2 \times JME^2 + L3 \times JME^3 + L4 \times JME^4 + L5 \times JME^5}{10^8} \quad (2.12)$$

O resultado de L é expresso em radianos, porém para obter o resultado em graus terá que se

aplicar a seguinte expressão:

$$L(\text{graus}) = \frac{L(\text{radianos}) \times 180}{\pi} \quad (2.13)$$

O resultado L terá que se encontrar entre 0° e 360°, obtendo-se com recurso ao seguinte código:

```

while L < 0 do
| L=L+360;
end
while L > 360 do
| L=L-360;
end
    
```

Figura 2.20: Código em ST de limitação de intervalos entre 0° e 360°.

Para o cálculo da latitude (B) e do vetor raio heliocêntrica da Terra (R) irão repetir-se os cálculos efetuados anteriormente por (2.12), sendo:

$$B = \frac{B0 + B1 \times JME}{10^8} \quad (2.14)$$

$$R = \frac{R0 + R1 \times JME + R2 \times JME^2 + R3 \times JME^3 + R4 \times JME^4}{10^8} \quad (2.15)$$

O cálculo de R é um caso particular dos cálculos de L e B, porque a unidade de leitura de R é em Unidades Astronómicas (AU), logo a conversão para graus não faz qualquer sentido.

O próximo passo será efetuar o cálculo da Longitude e Latitude Geocêntrica (Θ e β). O termo geocêntrico significa que a posição do Sol é calculada em relação ao centro da Terra. Para o cálculo da longitude geocêntrica é utilizada a seguinte expressão:

$$\Theta = L + 180 \quad (2.16)$$

onde Θ tem que ser limitado entre 0° e 360°, usando, por exemplo, o Algoritmo 2.20.

Para o cálculo da latitude geocêntrica é utilizada a seguinte expressão:

$$\beta = -B \quad (2.17)$$

onde β tem que ser limitado entre 0° e 360°, usando, por exemplo, o Algoritmo 2.20.

O próximo passo será efetuar o cálculo da Nutação na Longitude e Obliquidade ($\Delta\psi$ e $\Delta\varepsilon$),

utilizando as seguintes expressões:

$$\Delta\psi = \frac{\sum_{i=0}^N \Delta\psi_i}{36\,000\,000} \quad (2.18)$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{\sum_{i=0}^N \Delta\varepsilon_i}{36\,000\,000} \quad (2.19)$$

onde N é o número de linhas da Tabela ?? (ver Anexo ??, N é igual a 63 linhas nesta tabela). O resultado de $\Delta\psi$ e $\Delta\varepsilon$ é obtido em graus. O somatório de $\Delta\psi$ e de $\Delta\varepsilon$ é efetuado através dos valores obtidos em (2.20) e (2.21).

$$\Delta\psi_i = (a_i + b_i \times JCE) \times \sin\left(\sum_{j=0}^4 X_j \times Y_{i,j}\right) \quad (2.20)$$

$$\Delta\varepsilon_i = (c_i + d_i \times JCE) \times \cos\left(\sum_{j=0}^4 X_j \times Y_{i,j}\right) \quad (2.21)$$

onde:

- $\Delta\psi_i$ e $\Delta\varepsilon_i$ representam a Nutação na Longitude e Latitude respectivamente, em 0.001 arcos por segundo;
- a_i, b_i, c_i e d_i são os valores tabelados na i -ésima linha e coluna a, b, c e d na Tabela ??;
- $Y_{i,j}$ é o valor tabelado na i -ésima linha e j -ésima coluna da Tabela ??, com j a variar entre 0 e 4.

Os valores de X são calculados utilizando as seguintes expressões:

$$X_0 = 297.85036 + 445267.111480 \times JCE - 0.0019142 \times JCE^2 + \frac{JCE^3}{189474} \quad (2.22)$$

$$X_1 = 357.52772 + 35999.050340 \times JCE - 0.0001603 \times JCE^2 - \frac{JCE^3}{300000} \quad (2.23)$$

$$X_2 = 134.96298 + 477198.867398 \times JCE + 0.0086972 \times JCE^2 + \frac{JCE^3}{56250} \quad (2.24)$$

$$X_3 = 93.27191 + 483202.017538 \times JCE - 0.0036825 \times JCE^2 + \frac{JCE^3}{327270} \quad (2.25)$$

$$X_4 = 125.04452 - 1934.136261 \times JCE + 0.0020708 \times JCE^2 + \frac{JCE^3}{450000}, \quad (2.26)$$

onde:

- X_0 corresponde ao cálculo da média de alongamento da Lua a partir do Sol;
- X_1 corresponde ao cálculo da irregularidade média do Sol;
- X_2 corresponde ao cálculo da irregularidade média da Lua;
- X_3 corresponde ao cálculo do argumento da latitude da Lua;
- X_4 corresponde ao cálculo da longitude do nó ascendente da órbita média da Lua. Todos estes parâmetros obtêm um resultado em graus.

De seguida efetua-se o cálculo exato da Obliquidade da Eclíptica ε (em graus). Inicialmente calcula-se a média da obliquidade da eclíptica que é dada pela seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 = & 84381.448 - 4680.93 \times U - 1.55 \times U^2 + 1999.25 \times U^3 - \\ & 51.38 \times U^4 - 249.67 \times U^5 - 39.05 \times U^6 + 7.12 \times U^7 + \\ & 27.87 \times U^8 + 5.79 \times U^9 + 2.45 \times U^{10} \end{aligned} \quad (2.27)$$

onde $U = JME/10$. De notar que ε_0 é obtido em graus.

Neste momento já se obtêm toda a informação para calcular ε :

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{3600} + \Delta\varepsilon \quad (2.28)$$

Seguidamente calcula-se a correção de Aberração $\Delta\tau$ (em graus), através da seguinte expressão:

$$\Delta\tau = -\frac{20.4898}{3600 \times R} \quad (2.29)$$

O próximo passo será calcular a Longitude Aparente do Sol λ (em graus) com a seguinte expressão:

$$\lambda = \Theta + \Delta\psi + \Delta\tau \quad (2.30)$$

Para o cálculo do Tempo Aparente Sideral de Greenwich v (em graus), recorre-se à seguinte expressão:

$$v = v_0 + \Delta\psi \times \cos(\varepsilon) \quad (2.31)$$

onde (v_0) se obtêm através da seguinte expressão:

$$\begin{aligned} v_0 = & 280.46061837 + 360.98564736629 \times (JD - 2451545) + \\ & 0.000387933 \times JC^2 - \frac{JC^3}{38710000} \end{aligned} \quad (2.32)$$

onde v_0 será limitado entre 0° e 360° , recorrendo ao Algoritmo 2.20. De notar que v_0 é obtido em graus.

Para o cálculo da Ascensão Geocêntrica do Sol α (em graus), utiliza-se a seguinte expressão:

$$\alpha = \arctan 2 \left(\frac{\sin \lambda \times \cos \varepsilon - \tan \beta \times \sin \varepsilon}{\cos \lambda} \right) \quad (2.33)$$

onde $\arctan 2$ é a função \arctan aplicada ao numerador e ao denominador de forma a manter α entre $-\pi$ e π , ou seja:

$$\arctan 2(y, x) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y}{x}\right) & x > 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \pi & y \geq 0, x < 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \pi & y < 0, x < 0 \\ +\frac{\pi}{2} & y > 0, x = 0 \\ -\frac{\pi}{2} & y < 0, x = 0 \\ \textit{indefinido} & y = 0, x = 0 \end{cases} \quad (2.34)$$

Adaptando o sistema a este caso, as fórmulas utilizadas são $\left[\arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \pi \right]$ e $\left[\arctan\left(\frac{y}{x}\right) - \pi \right]$. Usando (2.13) irá converter-se o valor para graus, aplicando o Algoritmo 2.20 de forma que $\alpha \in [0^\circ, 360^\circ]$.

O cálculo da Inclinação Geocêntrica do Sol δ (em graus), é feito da seguinte forma:

$$\delta = \arcsin(\sin \beta \times \cos \varepsilon + \cos \beta \times \sin \varepsilon \times \sin \lambda) \quad (2.35)$$

onde δ é positivo ou negativo se o Sol estiver a norte ou a sul do Equador, respetivamente. Uma vez que o resultado é extraído em radianos, usando (2.13) converte-se o valor para graus.

Para o cálculo do Ângulo do Horário Local, H (em graus), é utilizada a seguinte expressão:

$$H = v + \sigma - \alpha \quad (2.36)$$

onde σ é a longitude, positiva ou negativa para Este ou Oeste do meridiano de Greenwich respetivamente. Limita-se H entre 0° e 360° usando o Algoritmo 2.20.

Posteriormente será necessário calcular a Ascensão Topocêntrica do Sol α' (em graus) e a Inclinação Topocêntrica do Sol δ' (em graus). O termo topocêntrico significa que a posição do Sol é calculada através da posição local da superfície da Terra. α' e δ' são obtidas com as seguintes expressões:

$$\alpha' = \alpha + \Delta\alpha \quad (2.37)$$

$$\delta' = \arctan 2 \left(\frac{(\sin \delta - y \times \sin \xi) \times \cos \Delta \alpha}{\cos \delta - x \times \sin \xi \times \cos H} \right) \quad (2.38)$$

onde o resultado de α' e δ' são obtidos em graus. Os termos u , x e y são obtidos com as seguintes expressões:

$$u = \arctan(0.99664719 \times \tan \varphi) \quad (2.39)$$

onde:

- φ é a latitude (em graus), positiva ou negativa, se estiver a Norte ou a Sul do Equador respetivamente;
- u é expresso em radianos.

$$x = \cos u + \frac{E}{6378140} \times \cos \varphi \quad (2.40)$$

onde E é a elevação em relação ao nível do mar (em metros).

$$y = 0.99664719 \times \sin u + \frac{E}{6378140} \times \sin \varphi \quad (2.41)$$

Para o cálculo de α' e δ' ainda é necessário calcular alguns parâmetros, nomeadamente as paralaxes do Sol. A paralaxe horizontal equatorial do Sol é dada pela seguinte expressão:

$$\xi = \frac{8.794}{3600 \times R} \quad (2.42)$$

onde:

- R é calculado em (2.15);
- ξ é expresso em radianos.

A paralaxe da ascensão do Sol é dada pela seguinte expressão:

$$\Delta \alpha = \arctan 2 \left(\frac{-x \times \sin \xi \times \sin H}{\cos \delta - x \times \sin \xi \times \cos H} \right) \quad (2.43)$$

O resultado de $\Delta \alpha$ é expresso em radianos, assim a conversão para graus será efetuada usando (2.13).

Neste momento já estão feitos todos os cálculos para α' e δ' . Segue-se o cálculo do ângulo Topocêntrico do horário local H' (em graus), através da seguinte expressão:

$$H' = H - \Delta \alpha \quad (2.44)$$

2.5.3 Cálculo do Ângulo de Zénite

De seguida calcula-se o Ângulo Topocêntrico de Zénite Θ (em graus). Antes do cálculo de Θ é necessário efetuar o cálculo do ângulo Topocêntrico de Elevação sem Refração Atmosférica e_0 :

$$e_0 = \arcsin(\sin \varphi \times \sin \delta' + \cos \varphi \times \cos \delta' \times \cos H') \quad (2.45)$$

O resultado de e_0 é expresso em radianos, pelo que para fazer a conversão para graus será aplicada (2.13).

Segue-se o cálculo da refração atmosférica:

$$\Delta e = \frac{P}{1010} \times \frac{283}{273 + T} \times \frac{1.02}{60 \times \tan\left(e_0 + \frac{10.3}{e_0 + 5.11}\right)} \quad (2.46)$$

onde:

- P é a pressão média local anual (em milibares);
- T é a temperatura média local anual (em °C);
- Δe é expresso em graus.

Segue-se o cálculo do ângulo topocêntrico de elevação:

$$e = e_0 + \Delta e \quad (2.47)$$

onde e é expresso em graus.

Já foram calculados todos os parâmetros necessários para o cálculo de Θ :

$$\theta = 90 - e \quad (2.48)$$

onde Θ é expresso em graus.

2.5.4 Cálculo do Ângulo de Azimute

O Ângulo Topocêntrico de Azimute é definido pela letra grega Φ , representado em graus. Antes do cálculo de Φ é necessário efetuar o cálculo do ângulo Topocêntrico astronómico de Azimute:

$$\Gamma = \arctan\left(\frac{\sin H'}{\cos H' \times \sin \varphi - \tan \delta' \times \cos \varphi}\right) \quad (2.49)$$

O resultado de Γ é expresso em radianos, pelo que para fazer a conversão para graus será aplicada (2.13). Para garantir que Γ se encontra entre 0° e 360° , aplica-se a instrução do Algoritmo 2.20.

Finalmente obtém-se o Ângulo Topocêntrico de Azimute através da seguinte expressão:

$$\Phi = \Gamma + 180 \quad (2.50)$$

O resultado de Φ é expresso em radianos, pelo que para fazer a conversão para graus será aplicada (2.13).

Neste momento estão determinados todos os parâmetros necessários para colocar em funcionamento o sistema de posicionamento dos painéis fotovoltaicos. Os parâmetros que foram enunciados anteriormente já foram demonstrados através de aplicações matemáticas, nomeadamente o ângulo de zénite (Θ) e o ângulo de azimute (Φ), obtendo-se assim a posição exata do Sol. Esta informação será usada para direcionar os painéis FV.

2.5.5 Cálculo do Nascer e Pôr do Sol

Recorrendo aos valores obtidos nas etapas anteriores do algoritmo será possível efetuar os cálculos para o horário do nascer do Sol, transição do Sol² e pôr do Sol. Através destes dados é possível prever a que horas o Sol irá nascer, pôr-se e também prever qual o horário em que o Sol estará na sua posição mais elevada (meio dia solar).

Inicialmente foi calculado o tempo sideral em Greenwich em 0 UT ν (em graus), usando (2.31). A expressão “0 UT” significa que as variáveis correspondentes ao horário (hora, minuto, segundo e fuso horário) serão colocadas a zero. De seguida será calculada a ascensão e declive geocêntrico do Sol em 0 TT, usando (2.33) e (2.35) para o dia anterior, atual e seguinte de juliano. Resumidamente é calculado α_{-1} , α_0 , α_{+1} , δ_{-1} , δ_0 e δ_{+1} colocando ΔT a zero.

O cálculo da versão aproximada do horário de transição do Sol utiliza a seguinte expressão (em fração diária):

$$m_0 = \frac{\alpha_0 - \sigma - \nu}{360} \quad (2.51)$$

onde σ é a longitude, em graus, positivo a Este de Greenwich.

O cálculo do ângulo do horário local, correspondente à elevação solar igual a -0.8333° obtém-se por:

$$H_0 = \arccos\left(\frac{\sin h'_0 - \sin \varphi \cdot \sin \delta_0}{\cos \varphi \cdot \cos \delta_0}\right) \quad (2.52)$$

onde:

- $h'_0 = -0.8333$;
- φ é a latitude, em graus, positivo a norte do equador.

De notar que, se o argumento do $\arccos()$ não estiver no intervalo de -1 e 1, significa que o Sol está sempre acima ou abaixo do horizonte desse dia. Como o valor de H_0 é obtido em radianos,

²transição do Sol: região do dia em que o Sol se encontra na sua posição mais elevada.

é necessário converter para graus, usando (2.13). À posteriori é feita a limitação entre 0° e 180° usando o Algoritmo 2.20, tendo em conta a substituição do valor 360 por 180. O cálculo da versão aproximada do horário do nascer do Sol (em fração diária) é feita com base na seguinte expressão:

$$m_1 = m_0 - \frac{H_0}{360} \quad (2.53)$$

O cálculo da versão aproximada do horário do Pôr do Sol (em fração diária) é feita com base na seguinte expressão:

$$m_2 = m_0 + \frac{H_0}{360} \quad (2.54)$$

Para limitar os valores de m_0 , m_1 e m_2 numa fração diária (entre 0 e 1) é usado o Algoritmo 2.20, tendo em conta a substituição do valor 360 por 1.

O cálculo do tempo sideral de Greenwich, em graus, para a transição, nascer e pôr do Sol é traduzida na seguinte expressão:

$$v_i = v + 360.985647 \cdot m_i \quad (2.55)$$

onde i corresponde a 0, 1 e 2 para a transição, nascer e Pôr-do-Sol, respetivamente.

O cálculo dos termos n_i são traduzidos na seguinte expressão:

$$n_i = m_i + \frac{\Delta T}{86400} \quad (2.56)$$

onde $\Delta T = TT - UT$.

O cálculo dos valores α'_i e δ'_i , em graus, é traduzido nas seguintes expressões:

$$\alpha'_i = \alpha_0 + \frac{n_i(a + b + c \cdot n_i)}{2} \quad (2.57)$$

$$\delta'_i = \delta_0 + \frac{n_i(a + b + c \cdot n_i)}{2} \quad (2.58)$$

onde:

- i corresponde a 0, 1 e 2 para a transição, nascer e pôr do Sol, respetivamente;
- a e a' correspondem a $(\alpha_0 - \alpha_{-1})$ e $(\delta_0 - \delta_{-1})$, respetivamente;
- b e b' correspondem a $(\alpha_{+1} - \alpha_0)$ e $(\delta_{+1} - \delta_0)$, respetivamente;
- c e c' correspondem a $(b - a)$ e $(b' - a')$, respetivamente.

Se o valor absoluto de a , a' , b ou b' for maior que 2, é necessário limitar esse valor entre 0 e 1 utilizando o Algoritmo 2.20, tendo em conta a substituição do valor 360 por 1.

O cálculo do ângulo do horário local para a transição, nascer e pôr do Sol é traduzido na seguinte expressão:

$$H'_i = v_i + \sigma - \alpha'_i \quad (2.59)$$

H'_i neste caso é calculado como positivo para Oeste do meridiano e negativo para Este do meridiano. É necessário limitar o valor entre -180° e 180° , usando o seguinte código:

```
while  $H'_i < -180$  do
|    $H'_i = H'_i + 360$ ;
end
while  $H'_i > 180$  do
|    $H'_i = H'_i - 360$ ;
end
```

Figura 2.21: Código em ST de limitação de intervalos entre -180° e 180° .

O cálculo da altitude do Sol para a transição, nascer e Pôr-do-Sol é traduzido com a seguinte expressão (em graus):

$$h_i = \arcsin(\sin \varphi * \sin \delta'_i + \cos \varphi * \cos \delta'_i * \cos H'_i) \quad (2.60)$$

O cálculo do horário de transição do Sol obtém-se pela seguinte expressão (em fração diária):

$$T = m_0 - \frac{H'_0}{360} \quad (2.61)$$

O cálculo do horário de nascer do Sol obtém-se pela seguinte expressão (em fração diária):

$$R = m_1 + \frac{h_1 - h'_0}{360 \cdot \cos \delta'_1 \cdot \cos \varphi \cdot \sin H'_1} \quad (2.62)$$

O cálculo do horário de pôr do Sol obtém-se pela seguinte expressão (em fração diária):

$$S = m_2 + \frac{h_2 - h'_0}{360 \cdot \cos \delta'_2 \cdot \cos \varphi \cdot \sin H'_2} \quad (2.63)$$

T, R e S podem ser facilmente convertidos para UT multiplicando o valor de fração diária por 24.

3. ALGORITMO DE BACKTRACKING PROPOSTO

Neste capítulo será introduzido um algoritmo muito importante no ambiente dos sistemas FV. O algoritmo de *backtracking* veio melhorar ainda mais o rendimento desses sistemas FV. O seu principal objetivo é evitar que seja incidida sombra sobre os painéis FV provocada por painéis FV vizinhos.

Inicialmente será apresentado um algoritmo já existente com o intuito de fazer uma comparação relativamente ao algoritmo desenvolvido. O algoritmo de *backtracking* desenvolvido usa um parâmetro adicional relacionado com a inclinação do terreno (não considerado nos algoritmos existentes), permitindo usar o seguidor solar em terrenos inclinados, sem ser necessário uma base para anular essa inclinação.

3.1 Backtracking

Um algoritmo de *backtracking* tem como função coordenar um sistema FV de forma a garantir que não incida sombra sobre os painéis FV. Existem vários algoritmos de *backtracking* já desenvolvidos por Jae-Sub Ko e Dong-Hwa Chung [12], L. Navarte e E. Lourenço [13], Dorian Schneider [14], Dorian Weinstock e Joseph Appelbaum [15], destacando-se o algoritmo desenvolvido pelos senhores D. Weinstock e J. Appelbaum para a comparação com o algoritmo de *backtracking* proposto. A implementação deste algoritmo só faz sentido se o sistema de produção de energia dispuser de, pelo menos, dois seguidores solares. Durante um dia este efeito acontece apenas duas vezes, no período do início da manhã e no período do fim da tarde, que é quando o ângulo de incidência solar é muito acentuado em relação aos seguidores solares.

Nesses dois períodos caso não fosse implementado um algoritmo de *backtracking*, o sistema de produção não teria a eficiência desejada, uma vez que iria existir sempre sombra nos painéis posteriores ao primeiro. Para além disso, o fenómeno de sombreamento nos painéis FV pode danificar os módulos, porque as células passam a estar inversamente polarizadas, atuando como uma resistência elétrica. Dessa forma, o módulo poderá alcançar temperaturas de tal forma elevadas que poderá levar à destruição desse módulo (pontos quentes) [35].

Em grandes parques FV, a implementação do algoritmo de *backtracking* é uma mais-valia, porque assim pode-se diminuir a distância entre painéis FV sem se preocupar com o efeito de sombreamento. Isso significa que com a mesma área pode produzir-se mais energia elétrica.

Na Figura 3.1 está presente um exemplo de um sistema FV sem algoritmo de *backtracking*, onde o painel da frente interfere no rendimento de produção de energia do painel de trás.

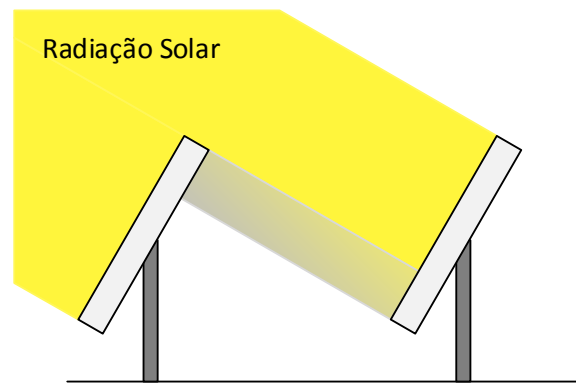


Figura 3.1: Seguidores solares sem algoritmo de *backtracking*.

Os seguidores solares começam a fazer *backtracking* quando o ângulo de incidência solar está no limiar de começar a fazer sombra nos painéis (Figura 3.2). Nesse instante, o seguidor solar começa a fazer a compensação, deslocando-se no sentido oposto que tem vindo a fazer até desde então. Numa situação em que o ângulo de incidência solar é perpendicular aos painéis, os seguidores solares efetuam o seu seguimento normal. De seguida será apresentado um algoritmo já desenvolvido.

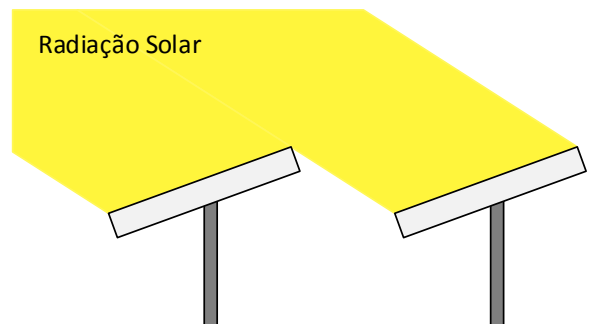


Figura 3.2: Seguidores solares com algoritmo de *backtracking*.

3.1.1 Algoritmo de Dan Weinstock e Joseph Appelbaum

Dan Weinstock e Joseph Appelbaum desenvolveram um algoritmo de *backtracking* dando-lhe o nome de Algoritmo de Sombreamento Difuso [15]. Na Figura 3.3 está representado um esboço da projeção solar sobre os painéis FV.

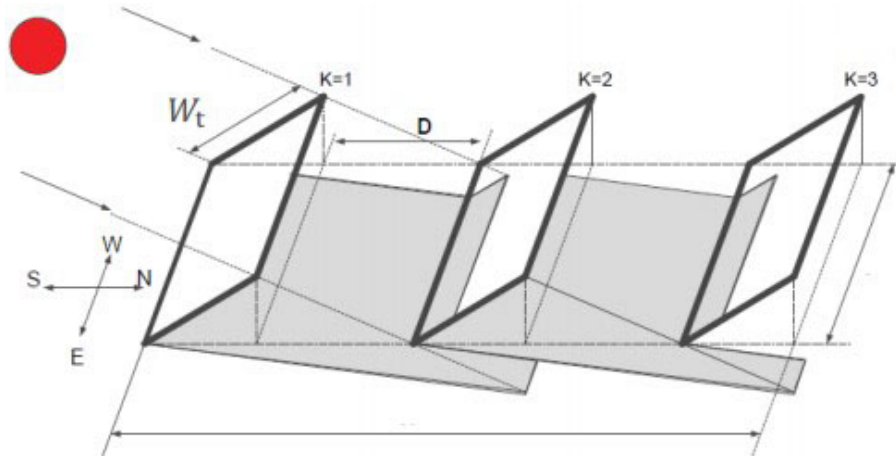


Figura 3.3: Projeção solar sobre os painéis FV (fonte: [15]).

O coeficiente de *backtracking* será obtido através do cálculo de (3.1), cujo o objetivo será o dimensionamento da melhor inclinação a dar ao painel solar.

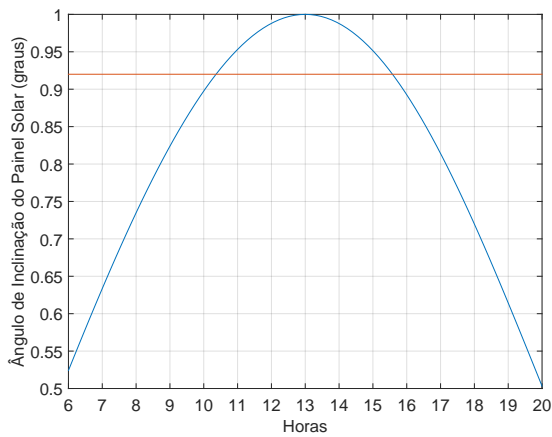
$$\mu_{sh,D} = \cos \left[\frac{\beta}{2} - \frac{1}{2} \times \left(\sqrt{d^2 + 1} - d \right) \times \sin \beta \right]^2 \quad (3.1)$$

onde:

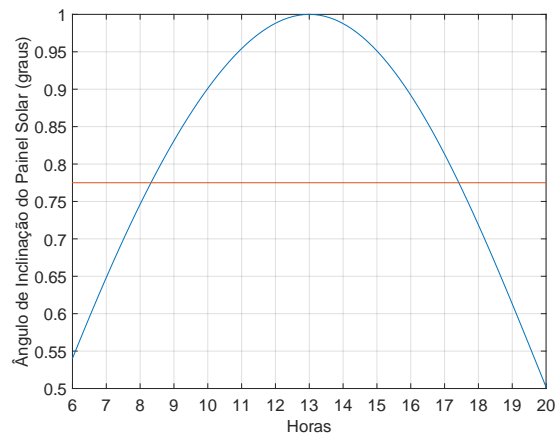
- β é o ângulo de incidência solar;
- $d = \frac{D}{W_t \times \sin \beta}$;
- D é a distância entre painéis;
- W_t é o comprimento do painel.

Na Figura 3.4 estão representados 2 casos de aplicação da variação do coeficiente de *backtracking*, sendo que para cada caso é alterado o espaçamento entre painéis e mantém-se o comprimento de cada painel. Na Figura 3.4a os painéis estão com um espaçamento de 1.2 metros e na Figura 3.4b os painéis estão com um espaçamento de 2.2 metros, mantendo o comprimento de cada painel de 1 metro. Existe uma diferença entre ambos os gráficos relacionado com a margem de *backtracking*. Na Figura 3.4a o seguidor encontra-se a fazer *backtracking* para valores inferiores a 0.92 e na Figura 3.4b o seguidor solar encontra-se a fazer *backtracking* para valores inferiores a aproximadamente 0.75. Estes valores foram extraídos de uma simulação

feita no software MATLAB em que foram dimensionados os pontos fronteiros *backtracking/no-backtracking* para os dois casos. Isto significa que quanto maior for o espaçamento entre painéis, menor será a necessidade de fazer *backtracking* para evitar o sombreamentos nos painéis adjacentes. A desvantagem deste algoritmo é o facto de ser necessário dimensionar o coeficiente de *backtracking* para cada caso de aplicação. Na Figura 3.4 verifica-se que as fronteiras *backtracking/no-backtracking* são distintas.



(a) Espaçamento entre painéis de 1.2 metros.



(b) Espaçamento entre painéis de 2.2 metros.

Figura 3.4: Coeficiente de *backtracking*.

3.1.2 Algoritmo de Backtracking Desenvolvido

Um algoritmo de *backtracking* destina-se a ser usado num sistema capaz de evitar o sombreamento incidente nos painéis. Existem parâmetros que são importantes na sua implementação, como por exemplo o cálculo do ângulo de inclinação dos painéis. O ângulo de inclinação dos painéis (λ) é adquirido através da conversão dos valores que representam a incidência solar. De uma forma resumida, os seguidores solares exercem o seguimento através de algoritmos de posicionamento, baseados no ângulo de incidência solar, traduzidos num dado ângulo de azimute e num dado ângulo de elevação. A inclinação dos painéis tem como objetivo posicionar os seguidores solares numa certa posição para obter a máxima radiação possível naquele instante, através da conversão dos valores adquiridos do algoritmo SPA. Para obter essa informação é utilizada a seguinte expressão [36]:

$$\lambda = \arctan 2 \left(\frac{\sin \omega \times \sin (\Phi - 180)}{\sin \omega \times \cos (\Phi - 180) \times \sin \theta + \cos \omega \times \cos \theta} \right) \quad (3.2)$$

onde:

- ω é a elevação dos painéis, na horizontal, a variar entre 0° e 90° ;
- Φ é o ângulo de azimute referenciado a Norte, a variar entre 0° e 360° ;
- Θ é o ângulo de zénite, a variar entre 0° e 90° .

É importante referir que o ângulo de azimute (Φ) é subtraído por 180° para alterar a referência dos painéis solares para Sul ($\Phi - 180$). A elevação dos painéis (ω) será um parâmetro fixo, porque o sistema será desenvolvido exclusivamente para seguidores solares de um único eixo. Na Figura 3.5 está representado um esboço em duas dimensões com o objetivo de analisar todo o processo de *backtracking* dos seguidores solares. Esta perspectiva torna o sistema mais simples, porque é relativamente mais fácil interpretar a resposta dos seguidores às projeções solares. O processo de criação do algoritmo de *backtracking* tem como referência o ângulo de incidência solar (β), adaptando o ângulo de inclinação dos painéis, obtido em (3.2), a um novo ângulo de inclinação para evitar a incidência de sombra nos painéis adjacentes. Para além disso, este algoritmo tem a capacidade de adaptar a inclinação dos painéis a superfícies inclinadas. Desse modo, o algoritmo efetua a correção da inclinação dos painéis através do algoritmo de *backtracking*, complementando essa correção com o nível da inclinação do terreno, caso se verifique. A forma como os painéis estão representados torna a imagem mais perceptível, de modo que os ângulos de leitura facilitam a criação das equações pretendidas. De outra forma seria difícil a criação destas equações, porque os ângulos são um parâmetro primordial na resposta dos seguidores solares à incidência do Sol.

A equação 3.3 é utilizada para a determinação do coeficiente de *backtracking*. Para valores inferiores a 1, o painel encontra-se a fazer o seguimento com *backtracking* e para valores superiores

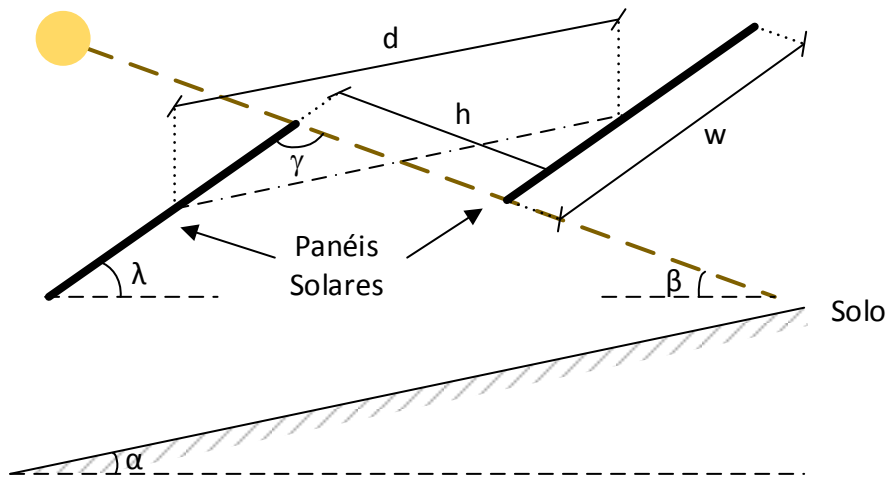


Figura 3.5: Projeções solares sobre os painéis FV.

a 1, o painel encontra-se a fazer o seguimento sem *backtracking*.

$$b = \frac{d \times \sin(\beta - \alpha)}{w} \quad (3.3)$$

onde:

- d é a distância entre painéis;
- β é o ângulo de incidência solar;
- α é o ângulo de inclinação do terreno;
- w é a largura dos painéis.

O ângulo de inclinação dos painéis que evita o efeito de sombreamento será obtido através da seguinte expressão:

$$\lambda = 180 - \gamma - \beta + \alpha \quad (3.4)$$

para $\beta < 0$ (durante o periodo da manhã) e pela seguinte expressão:

$$\lambda = \gamma - \beta + \alpha \quad (3.5)$$

para $\beta > 0$ (durante o periodo da tarde), onde γ é obtido através da lei dos senos num triângulo usando (3.6). O desenvolvimento do cálculo está presente no Anexo ??.

$$\gamma = \arcsin(b) \quad (3.6)$$

O último passo será efetuar a correção do ângulo de inclinação dos painéis para o nível da inclinação do terreno, de forma a compensar possíveis erros a quando da instalação do inclinómetro.

O cálculo é feito através da seguinte expressão:

$$\lambda_{final} = \lambda - \alpha \quad (3.7)$$

onde λ_{final} deverá ser a inclinação a dar ao painel solar através da atuação dos motores do seguidor solar.

3.1.2.1 Simulação em MATLAB

Este algoritmo foi inicialmente desenvolvido em MATLAB, uma ferramenta muito poderosa para a simulação de algoritmos de controlo. Na Figura 3.6 apresenta-se o ambiente de programação do software.

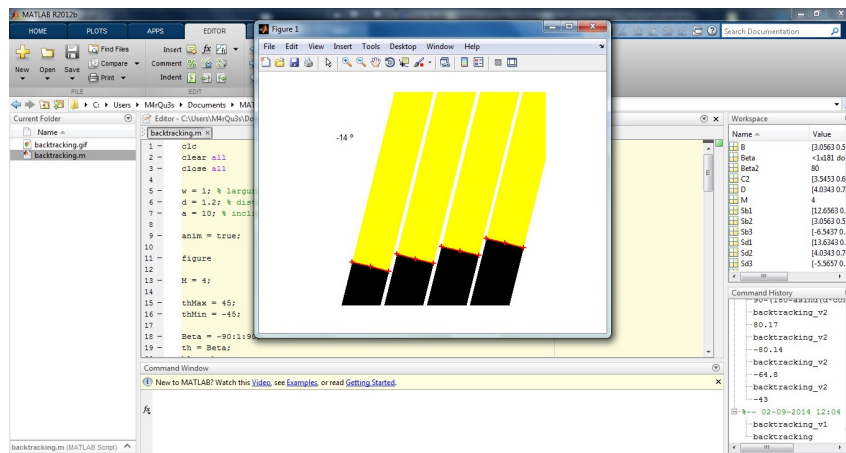


Figura 3.6: Implementação do algoritmo *backtracking* no MATLAB.

Os resultados extraídos do software MATLAB foram representados de duas formas gráficas: uma animação e um gráfico ilustrativo da evolução do ângulo de inclinação do seguidor solar. A animação mostra a movimentação do seguidor solar ao longo do dia, efetuando *backtracking* quando o ângulo de incidência solar é superior à gama do ângulo de inclinação dos seguidores solares. Quando o ângulo de incidência do Sol é perpendicular ao painel, o sistema faz o seguimento normal do Sol. A Figura 3.7 mostra cada uma das situações, quando faz e não faz *backtracking*. Na Figura 3.7b está presente uma configuração onde não é necessário o algoritmo de *backtracking* e nas Figuras 3.7a e 3.7c está presente uma configuração onde o Algoritmo de *backtracking* está a ser utilizado, início da manhã e final da tarde respetivamente.

O gráfico da Figura 3.8 mostra a evolução dos seguidores solares de uma forma mais simples de analisar, evidenciando o seu comportamento ao longo do dia. A configuração linear demonstra que o seguidor está perpendicular ao ângulo de incidência do Sol, logo não há compensação a fazer por parte do algoritmo de *backtracking*. Nos restantes pontos do gráfico mostra-se a compensação feita pelo algoritmo de *backtracking* para evitar a incidência de sombra nos painéis solares.

Após a validação do algoritmo em MATLAB, passou-se à implementação no software do PLC.

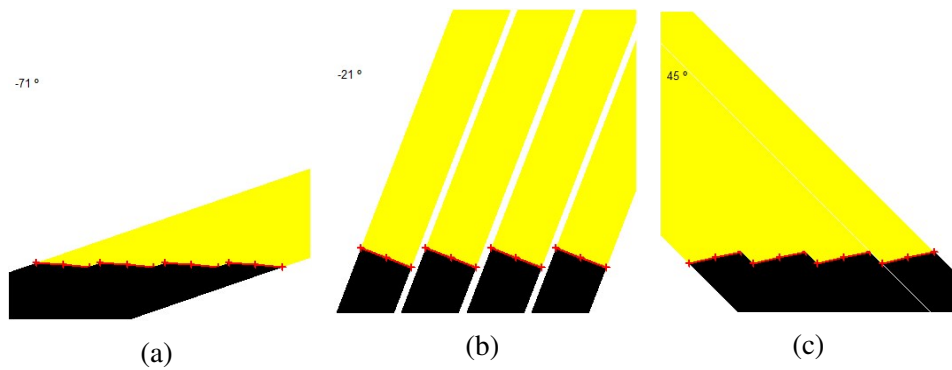


Figura 3.7: Seguidores solares com algoritmo *backtracking* (MATLAB).

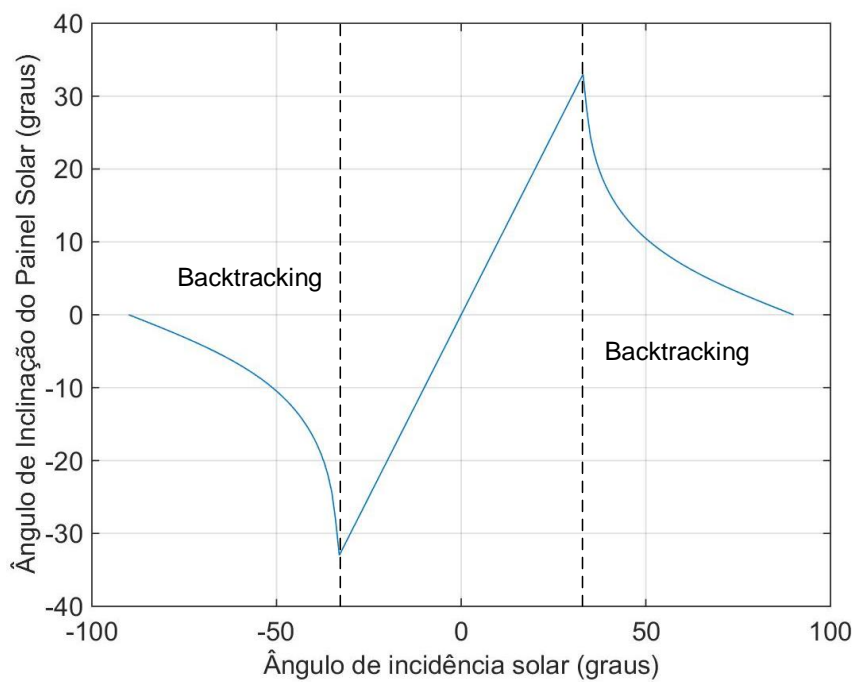


Figura 3.8: Evolução diária dos seguidores solares.

O PCWORX é o software utilizado para programar o PLC que será apresentado no capítulo seguinte.

4. SISTEMA DE POSICIONAMENTO DESENVOLVIDO

O Algoritmo de Posicionamento Solar SPA tem como base conceitos astronômicos traduzidos em equações matemáticas. No entanto, a informação contida no algoritmo SPA torna-se num mecanismo físico necessário para equipamentos que estejam preparados para executar essas tarefas, como por exemplo um PLC.

Este capítulo está dividido em dois temas distintos: hardware e software. O hardware está relacionado com os dispositivos e a ligação de toda a estrutura do sistema, enquanto que o software está relacionado com a gestão dos dados. O PLC é o dispositivo responsável por executar ambas as tarefas, baseando-se na informação adquirida dos dispositivos e dando uma resposta adequada para essa aplicação. Inicialmente será introduzido o hardware, apresentando os dispositivos utilizados na implementação do sistema de produção de energia. Da mesma forma será feito para o software, apresentando todas as ferramentas utilizadas neste sistema. Por fim será apresentada a página Web onde é mostrado o resultado de todo o processamento, ou seja, as funcionalidades implementadas serão visualizadas na página Web.

4.1 Hardware

Na implementação do algoritmo SPA foram utilizados alguns dispositivos cuja função é tornar o sistema de produção de energia num sistema eficaz e robusto. Foram utilizados um PLC, um anemómetro e um inclinómetro, dispositivos que têm maior ênfase no funcionamento e controlo do sistema. A função do PLC é reter toda a informação do algoritmo estudado e traduzir essa informação em atividades mecânicas, por exemplo, através de sinais digitais enviar informações

para fazer atuar motores. O anemómetro tem a funcionalidade de medir a velocidade do vento e o inclinómetro a função de medir a inclinação dos painéis FV em relação ao campo gravitacional. Na Figura 4.1 está representado um diagrama ilustrativo das funções de cada periférico, sendo o objetivo fazer funcionar os motores dos seguidores solares para direcionar os painéis para a posição correta.

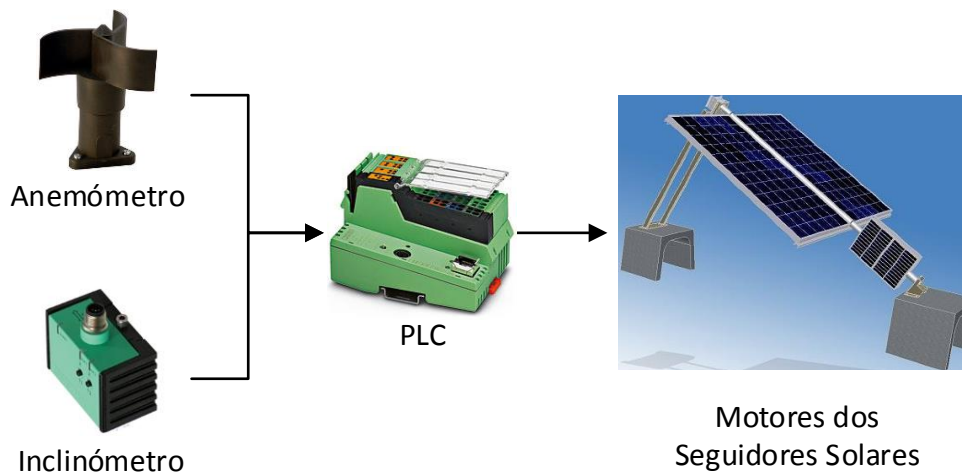


Figura 4.1: Diagrama do sistema de posicionamento.

4.1.1 Autómato Programável

O PLC utilizado para a implementação do algoritmo SPA foi um Phoenix Contact ILC 150 ETH (Figura 4.2). É um PLC simples e prático para aplicações industriais, apresentando dimensões de 119.8mm x 80mm



Figura 4.2: Autómato Phoenix Contact ILC 150 ETH.

Em relação às especificações do dispositivo, dispõe de 8 entradas e 4 saídas digitais, alimentadas a 24V. Os tipos de conexão disponíveis são uma porta RJ45 e uma porta RS-232, utilizadas para aceder ao software específico do PLC. Para além disso, permite o funcionamento até um máximo de 8 tarefas em simultâneo e a sua temperatura ambiente de operação varia entre os -25°C e 60°C. De notar que é importante ter em atenção o local onde o PLC é instalado, pois se eventualmente for instalado na parte traseira do painel, é necessário ter especial cuidado com a temperatura ambiente, podendo alcançar cerca de 75°C [37]. Por outro lado, este PLC permite

a colocação de módulos de expansão que vêm complementar as funcionalidades de utilização. No Anexo ?? apresentam-se as especificações técnicas do PLC.

4.1.2 Anemómetro

O Anemómetro é um dispositivo que mede a velocidade de vento. A sua estrutura aerodinâmica permite que faça o seu movimento de rotação apenas num sentido, independentemente da direção do vento. Caso contrário, o sensor poderia efetuar leituras erradas, pondo em causa a segurança dos sistemas fotovoltaicos. Na Figura 4.3 apresenta-se o sensor que será utilizado neste sistema de produção FV, porém existem outros sensores de velocidade de vento que poderiam ser utilizados [38]. No entanto, a aplicação deste sensor é uma mais-valia, porque é um sensor relativamente simples de aplicar e a sua estrutura de funcionamento é fácil de interpretar, não desprezando o fator económico que é muito importante nos dias de hoje.



Figura 4.3: Anemómetro Anemo 4403 v2.

O Anemómetro da Figura 4.3 transmite sinais em forma de impulsos quando é detetada velocidade do vento, ou seja, existe movimento na ventoinha do sensor. Desta forma os impulsos recebidos têm que ser tratados de forma a identificar qual é a velocidade instantânea do vento. As características presentes na Figura 4.4 mostram as propriedades deste sensor com base na equação $y = 1.05x$, relacionando o número de impulsos por segundo com a velocidade, em km/h. Para uma velocidade do vento de 100 Km/h, tem-se uma frequência de 105 impulsos por segundo, de acordo com o manual do sensor.

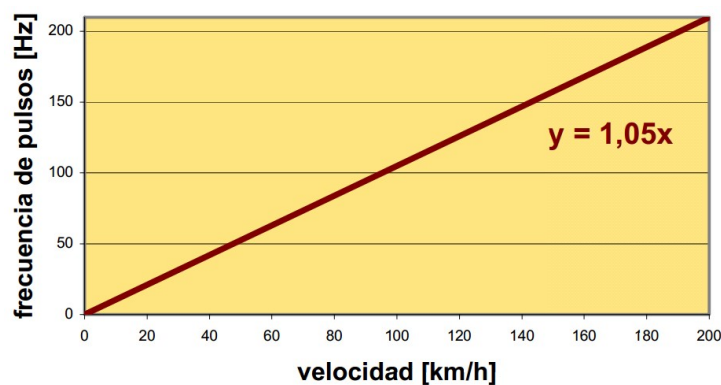


Figura 4.4: Características do Anemómetro Anemo 4403 v2 (Frequência/Velocidade).

O anemómetro pode ser ligado de duas formas distintas, dependendo do caso de aplicação.

Na Figura 4.5 apresenta-se uma ligação a 2 fios e na Figura 4.6 apresenta-se uma ligação a 3 fios. A diferença entre estas duas ligações é a utilização de um filtro, utilizado na ligação a 3 fios, para reduzir o efeito de bouncing (ver Figura 4.7) que neste caso é importante, porque o número de impulsos por segundo irá determinar a velocidade do vento num dado instante. O efeito de bouncing é o resultado de um período de ruído na transição de estados, ascendente ou descendente.

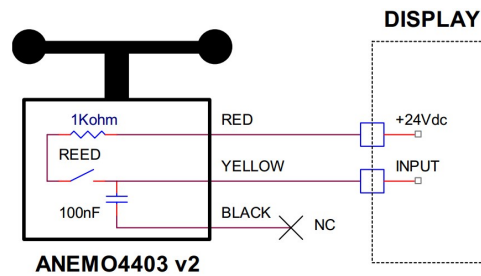


Figura 4.5: Ligação a 2 fios.

Neste caso específico será utilizado a ligação a 3 fios (Figura 4.6), porque é um sistema que necessita de precisão na leitura da velocidade do vento. O limite de segurança deste anemómetro é de 120 Km/h, sendo 120 km/h correspondente a 126 impulsos por segundo no sensor. Isso significa que o sensor ao atingir 126 impulsos por segundo irá disparar um alarme e colocar os seguidores solares numa posição de segurança.

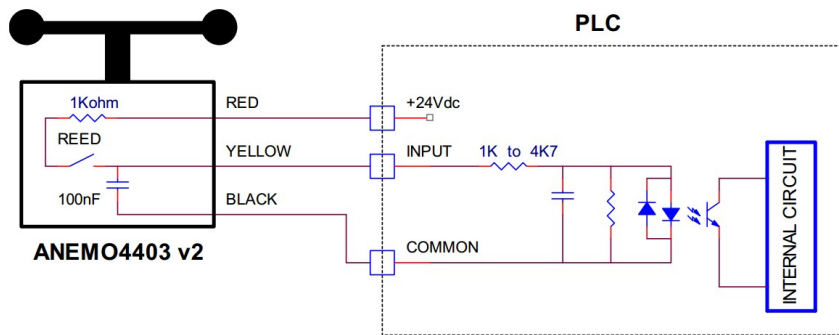


Figura 4.6: Ligação a 3 fios.

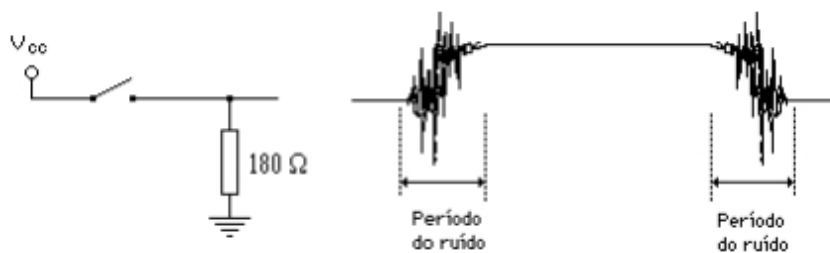


Figura 4.7: Efeito de *bouncing* (fonte: [39]).

4.1.3 Inclinómetro

O inclinómetro é um dispositivo que mede a inclinação das estruturas de rotação, sendo, neste caso, aplicado à estrutura de suporte dos painéis FV. É necessário ter alguns cuidados na aplicação deste dispositivo para que a referência do inclinómetro esteja perpendicular ao solo, a fim de se obter uma correta medição da inclinação dos painéis. Na Figura 4.9 estão representadas duas possíveis implementações dos seguidores solares, plano horizontal (Figura 4.9a) e plano inclinado (Figura 4.9b), onde é necessário adaptar o inclinómetro para cada uma das situações.



Figura 4.8: Inclinómetro.

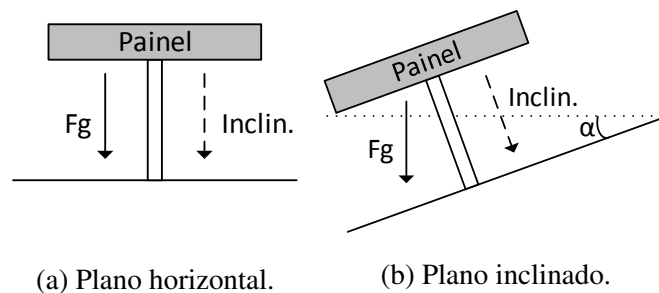


Figura 4.9: Referência de um inclinómetro.

Relativamente aos dados de comunicação, este sensor faz a leitura com base em sinais analógicos, variando sobre uma gama de valores. Os inclinómetros são subdivididos em dois tipos: sensores de corrente e sensores de tensão. A diferença entre estes dois dispositivos é a forma como são lidos os dados, sendo que os sensores de tensão funcionam com base na variação dos valores de tensão e os sensores de corrente funcionam com base na variação dos valores de corrente. Tipicamente, a gama de valores utilizada num sensor de tensão é de 0-5V ou 0-10V [40], desse modo 0V significa que o sensor está com o seu ângulo mínimo e 5V/10V significa que está com o seu ângulo máximo. No sensor de corrente, o modo de funcionamento é exatamente o mesmo com a diferença que a gama de valores é de 4-20mA, ligeiramente diferente ao sensor de tensão. A gama de 4-20mA é um intervalo de valores que serve para analisar dados, mas também serve para identificar anomalias, nomeadamente falhas de energia no sensor. Esta é uma das vantagens que os sensores de corrente têm face aos sensores de tensão. Nos sensores de tensão, 0V pode significar o ângulo mínimo obtido pelo dispositivo, mas também pode significar a falha de energia no sensor, sendo esta característica uma limitação.

A Figura 4.10 exemplifica os limites de operação do seguidor solar. Neste caso específico, o seguidor solar irá operar numa margem de rotação de -45° a 45° , onde os dados extraídos do inclinómetro serão usados para o posicionamento do painel. Como dado adicional, na ausência de Δ ns-de-curso, o inclinómetro poderá também controlar as margens de rotação dos seguidores solares, impedindo-os de ultrapassar os valores máximos de rotação.

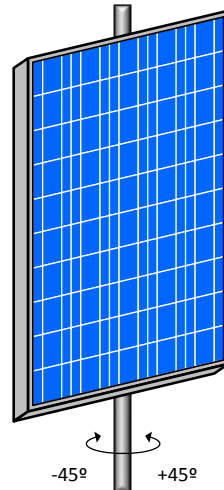


Figura 4.10: Ângulos de operação do seguidor solar.

Na secção seguinte descreve-se ao funcionamento a nível de software de todo o sistema. Todos os elementos são importantes num sistema de produção de energia, tanto o software como o hardware.

4.2 Software

O software tem como principal função executar o algoritmo SPA, que irá otimizar a produção de energia elétrica através de painéis FV, sendo um objetivo primordial desde o início. Para que todo o sistema funcione plenamente é necessário ter precaução relativamente à segurança da estrutura, porque sem o controlo total do sistema de produção não é possível prever possíveis anomalias que possam ocorrer. No entanto, esse problema é contornado através da programação de tarefas de segurança com base nos dispositivos apresentados anteriormente na secção 4.1. A monitorização do anemómetro e do inclinómetro irão permitir o controlo dos efeitos da velocidade do vento e da inclinação do seguidor solar.

4.2.1 PCWORX

O software de desenvolvimento utilizado para o controlo do sistema de produção de energia foi o PCWORX (Figura 4.11). Todas as marcas de PLC têm um software de configuração, sendo o PCWORX a ferramenta desenvolvida pela Phoenix Contact para configurar e monitorizar os PLC da marca.

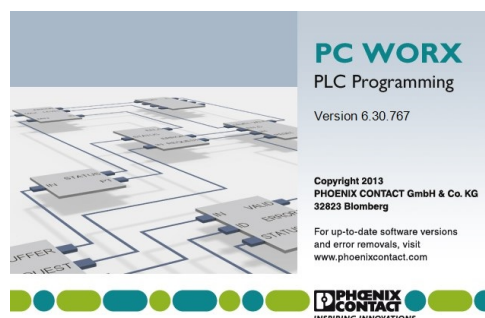


Figura 4.11: Software PCWORX.

A linguagem de programação utilizada foi o *Estructured Text* (ST) e o LADDER. No Anexo ?? apresenta-se um exemplo ilustrativo de cada uma das linguagens. Em relação à comunicação PCWORX/PLC é necessário ter em conta alguns aspetos importantes, nomeadamente a compatibilidade de versões do dispositivo e do software, porque sem esse requisito o PLC e o programa não comunicam. Para além disso, também é necessário estabelecer os parâmetros de comunicação com a atribuição de um IP, de forma a existir comunicação entre dispositivos. Uma das vantagens deste software é ter a capacidade de visualizar os valores instantâneos das variáveis do sistema, através da ferramenta de *debugging*, de forma a possibilitar a alteração de possíveis erros de cálculo ou erros de estado. No Anexo ?? apresenta-se com maior detalhe o ambiente de desenvolvimento.

4.2.1.1 Estrutura do Sistema de Produção de Energia

A Figura 4.12 ilustra a estrutura do sistema FV. A estrutura está organizada por pastas para tornar o processo de pesquisa mais acessível. Inicialmente foi implementado o algoritmo de posicionamento SPA, adicionando mais tarde alguns módulos de programação referentes aos alarmes e ao processamento de dados. O processamento de dados está relacionado com a gestão da informação adquirida no algoritmo SPA, dados que serão necessários para a construção da página Web do PLC. Por fim foi implementado o algoritmo de *backtracking*.

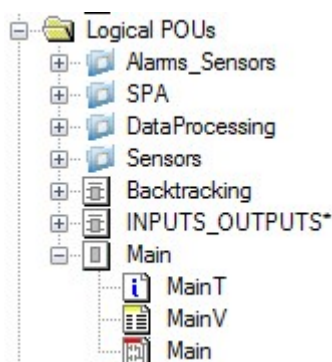


Figura 4.12: Estrutura do projeto desenvolvido (PCWORX).

Na Figura 4.13 está representada um diagrama de blocos do algoritmo SPA. Os cálculos estão

distribuídos por vários blocos para ser mais fácil a consulta de informação referente ao algoritmo. Um dos motivos pelo qual se optou por esta estrutura foi também para resolver um problema de *overloading clock* (tempo excessivo no processamento de dados). Para controlar a execução dos diversos blocos foi criado um bloco de funções em linguagem LADDER (Figura 4.14) com temporizadores. Deste modo foi possível evitar que o *overloading clock* ocorresse, sendo que cada bloco de funções contém o seu temporizador com uma dada sequência de utilização. Essa sequência está relacionada com o procedimento de cálculo efetuado na secção 2.5.

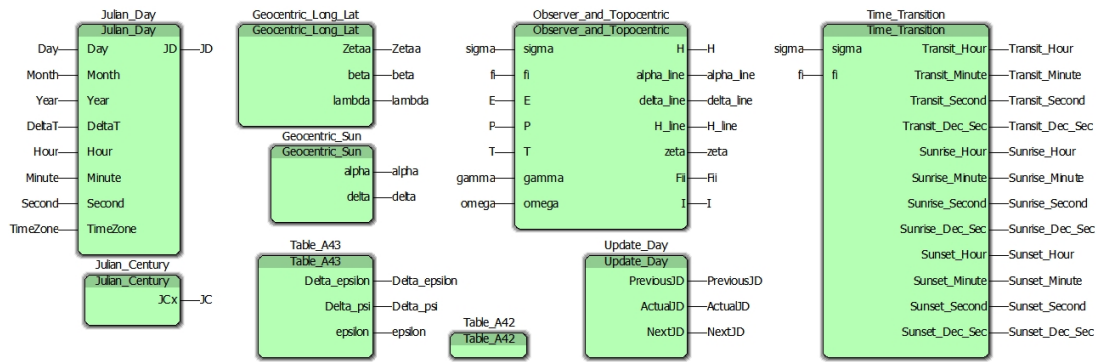
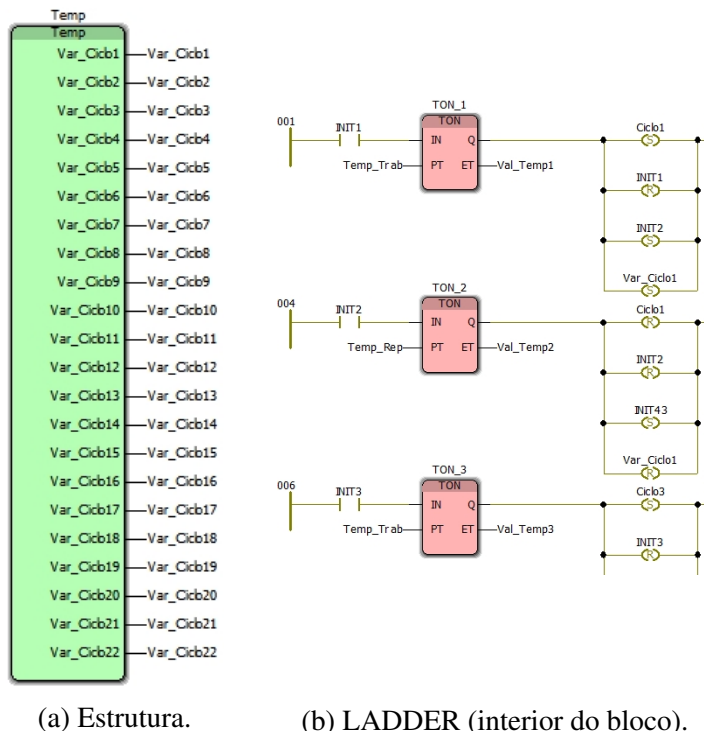


Figura 4.13: Algoritmo SPA implementado no software PCWORX.



(a) Estrutura. (b) LADDER (interior do bloco).

Figura 4.14: Bloco de funções de temporizadores (LADDER).

Na Figura 4.15 apresenta-se a função de cálculo da inclinação dos painéis. Este cálculo foi introduzido numa função em que $zeta_1$ (θ), $Gammaa180$ (Φ) e $SurfaceSlope$ (ω) são as variáveis de entrada e $InclinP$ (λ) é a variável de saída que contém o ângulo de inclinação a dar

aos painéis. A função `arctan2` foi apresentada anteriormente na transcrição do algoritmo SPA (subsecção 2.5.2), através de (2.34).

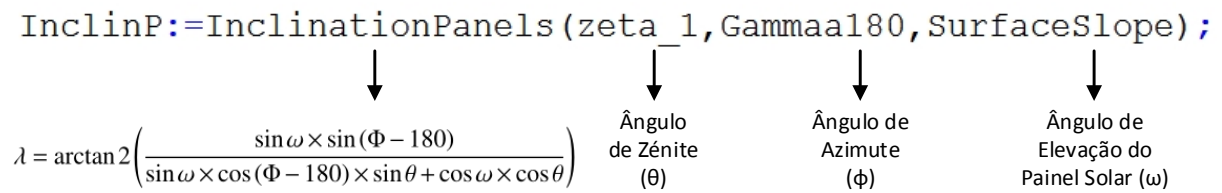


Figura 4.15: Cálculo da inclinação dos painéis.

Na Figura 4.16 apresenta-se o bloco do programa PCWORX referente ao algoritmo de *backtracking*. O ângulo de inclinação dos painéis será uma variável de entrada neste bloco de funções, porque o algoritmo de *backtracking* fará uma correção do ângulo de inclinação dos painéis para evitar o sombreamento nos painéis adjacentes. As restantes variáveis de entrada estão relacionadas com as características físicas dos painéis, sendo elas: a distância entre painéis (*distp*); o comprimento de cada painel (*widthp*); o ângulo de elevação dos painéis (*incl_surf*) e os ângulos mínimo e máximo de operação dos painéis (*th_min* e *th_max*).

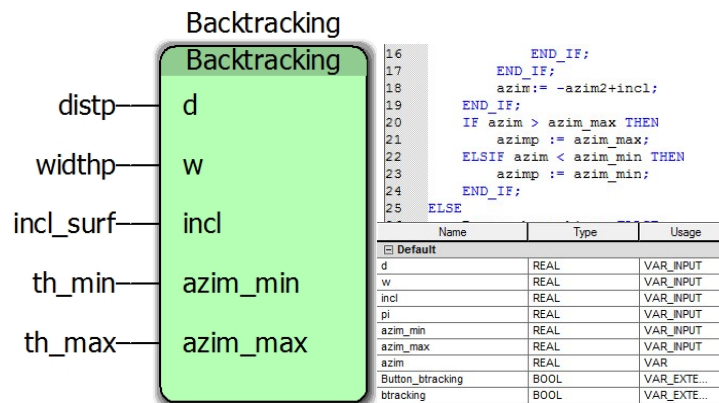


Figura 4.16: Algoritmo de *backtracking* (PCWORX).

Sensores e Alarmes

Como se referiu anteriormente na secção 4.1, os sensores utilizados neste sistema de produção de energia são o inclinómetro e o anemómetro. Na Figura 4.17 estão representados os sensores e os alarmes no software PCWORX. Para o inclinómetro foram implementadas duas estruturas de aplicação, inclinómetro de corrente e inclinómetro de tensão, dando ao utilizador a possibilidade de escolher o tipo de inclinómetro que vai implementar. Relativamente ao anemómetro, o código foi desenvolvido tomando como referência as características do anemómetro abordadas na secção 4.1.2.

Os alarmes têm como principal função objetivo alertar o utilizador das anomalias que possam ocorrer no sistema de produção, impedindo o seu progresso até que estas anomalias sejam

tratadas. Para os alarmes foi desenvolvido um código capaz de preencher esses requisitos, mas existem dispositivos que têm configurações diferentes. No caso do anemômetro não se justifica a ativação do alarme assim que o evento ocorre, porque pode tratar-se de um falso alarme provocado por uma rajada de vento de curta duração. Nesse caso foi implementado um código com advertência à terceira tentativa num curto espaço de tempo (10 segundos). Para os restantes casos é aplicado o alarme assim que ocorre a anomalia.

A estrutura de sensores e alarmes está interligada, uma vez que os alarmes determinam ações de controlo sobre atuadores. Os alarmes desta estrutura irão gerir os motores dos seguidores, fins-de-curso, anemômetros e inclinómetros.

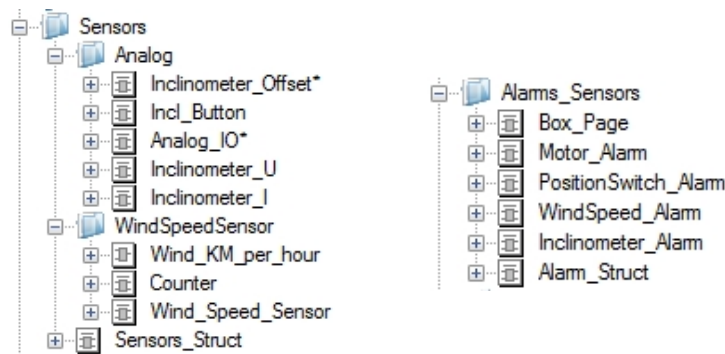


Figura 4.17: Estrutura dos sensores e dos alarmes (PCWORX).

Processamento de dados

No processamento de dados foram implementados blocos de funções que têm como objetivo tratar dos dados que são inseridos no algoritmo. Na Figura 4.18 apresenta-se a estrutura do bloco de processamento de dados. *SetDateTime* é responsável por sincronizar a data e hora que são inseridas no PLC. *Temp* tem como objetivo evitar o *overloading clock*, já referido anteriormente nesta secção. *Function Modes* corresponde aos modos de utilização do seguidor solar, sendo estes: manual; semi-automático e automático. *DataValidation* corresponde à validação de dados. Este bloco foi implementado no PLC, uma vez que o software de programação da página web (WebVisit) não tem essa opção. *Coordinates* está relacionado com as coordenadas geográficas que são inseridas na página, dando a possibilidade de escolher o tipo de coordenadas a inserir. Na Figura 4.19 apresenta-se as coordenadas para este caso específico com uma latitude de 38.701° e uma longitude de -8.61926°.

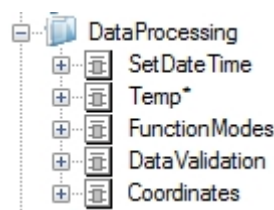


Figura 4.18: Estrutura do software para processamento de dados (PCWORX).

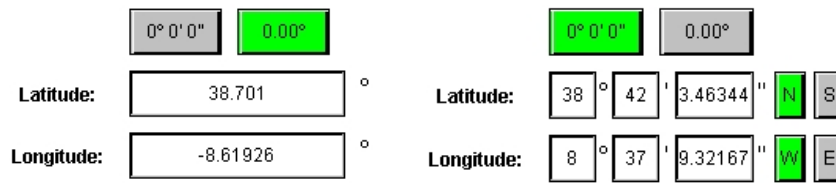


Figura 4.19: Tipos de configurações das coordenadas geográficas.

Rede PCWORX

Na Figura 4.20 apresenta-se um diagrama final do algoritmo de posicionamento e backtracking implementado no software PCWORX.

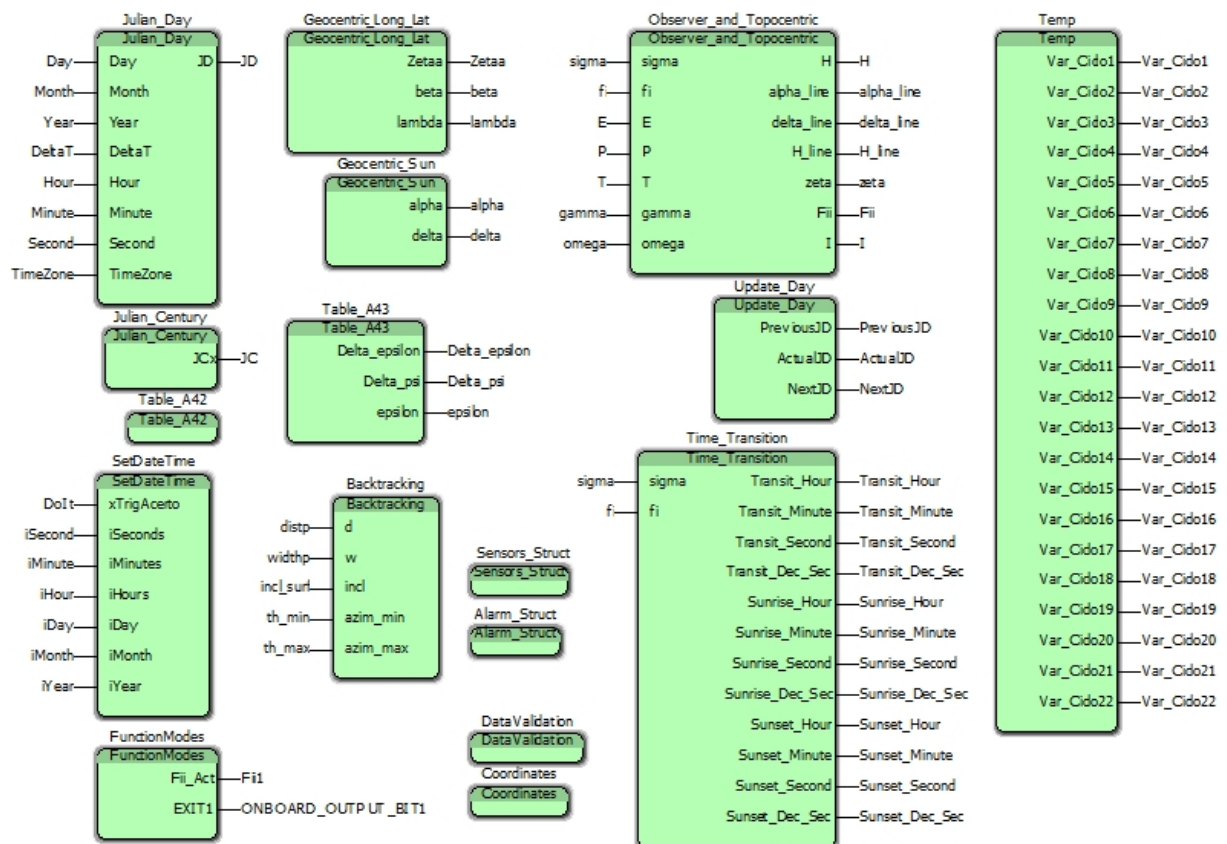


Figura 4.20: Estrutura do sistema de produção no software PCWORX.

4.2.2 WebVisit

O WebVisit foi uma ferramenta utilizada para a construção de páginas do PLC Phoenix Contact ILC 150 ETH. Este software é relativamente fácil de manusear, pois utiliza configurações gráficas para a construção da página. Também tem a opção de usar a programação em HTML, mas a decisão mais acertada é utilizar a configuração gráfica, porque é uma versão mais simples de utilizar e é mais intuitivo. No Anexo ?? apresenta-se com maior detalhe o ambiente de desenvolvimento.

À medida que foi explorado o software WebVisit foram encontradas algumas limitações no âmbito da estruturação das páginas WEB. A quantidade de informação necessária para monitorizar o sistema de produção de energia ocupa mais do que uma página. No entanto a versão WebVisit não permite implementar projetos com mais de uma página. A solução encontrada para este caso foi a criação de um projeto por cada página WEB, ou seja, para 3 páginas WEB foram necessários 3 projetos WebVisit. A outra limitação do software está relacionada com a quantidade de variáveis PDD¹ que podem ser utilizadas, sendo possível a implementação até 20 unidades. Após passar as 20 variáveis PDD utilizadas, o software ignora as restantes variáveis que sejam adicionadas. Esta limitação poderá estar relacionada com a versão do software, pois é uma versão demo. O IP inserido na página WEB será o mesmo IP que foi inserido nas configurações de rede do PLC para que seja possível aceder a toda a informação contida no PLC.

4.2.3 Página Web

Nesta secção serão introduzidas as páginas web que foram desenvolvidas com o software Webvisit. Nesta etapa, o PLC fará a atualização da página Web com a informação contida no PLC. Segue-se a página inicial do PLC (Figura 4.21) onde estão presentes os botões referentes às funcionalidades do PLC. O botão *Function Modes* corresponde à configuração dos modos de funcionamento. O botão *Configuration* corresponde à configuração dos parâmetros utilizados no sistema de seguimento. O botão *Alarms* corresponde à análise e controlo dos alarmes utilizados.

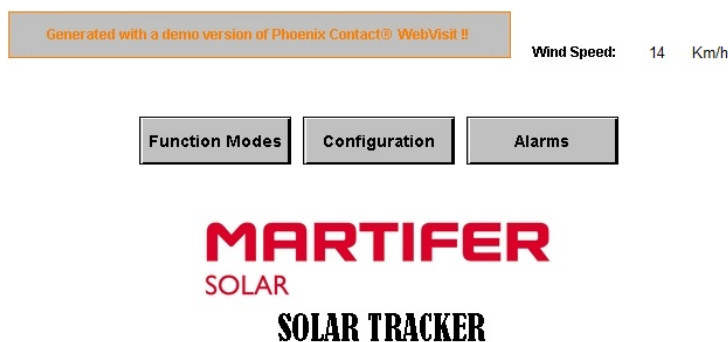


Figura 4.21: Página inicial do PLC.

O primeiro passo a fazer quando esta página é iniciada pela primeira vez é efetuar a configuração dos parâmetros, clicando em *Configuration*. Esse botão irá direcionar para a página da Figura 4.22. Aqui será feita a configuração da data e hora do PLC. Preenchem-se os campos e posteriormente seleciona-se o botão *Set* para proceder à transferência dos dados introduzidos para o PLC, atualizando deste modo a data e hora.

A segunda página está relacionada com as coordenadas geográficas (Figura 4.23). Aqui são inseridas as coordenadas da localização do parque FV. Nesta página é possível escolher o tipo de coordenadas a inserir, em graus decimais ou em graus, minutos e segundos.

¹PDD: parâmetro utilizado para colocar as variáveis do PCWORX visíveis no WebVisit.

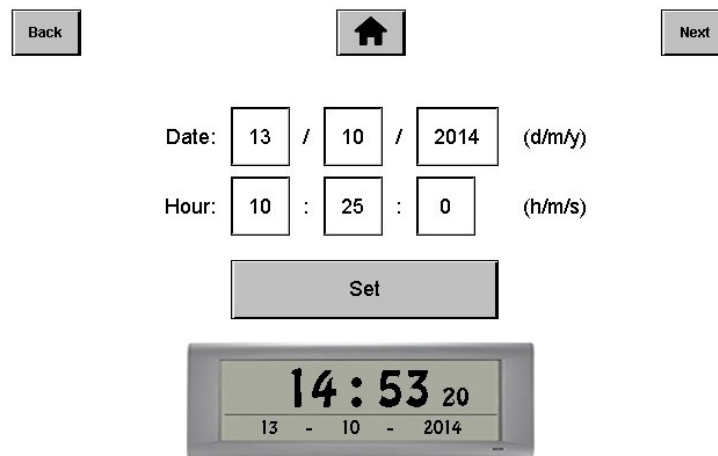


Figura 4.22: Configuração da data e hora.

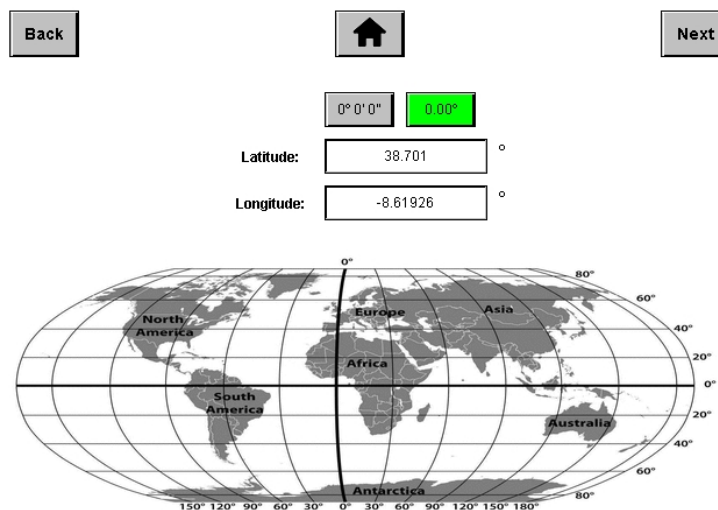


Figura 4.23: Configuração das coordenadas.

De seguida serão configurados todos os parâmetros relacionados com as propriedades do painel (Figura 4.24). O *Update Time* corresponde ao tempo de atualização do ângulo de inclinação dos painéis. O *Time Lock* e *Storm Position* são parâmetros de segurança: tempo de bloqueio do motor e posição dos painéis quando ocorre uma tempestade, respetivamente. Os parâmetros seguintes são utilizados para configurar as propriedades dos painéis para o algoritmo de posicionamento do painel, nomeadamente as margens de inclinação do painel e a sua elevação relativamente ao solo.

Na última página são inseridos os parâmetros para o *backtracking* e para o inclinómetro (Figura 4.25). Relativamente ao *backtracking*, os parâmetros necessários são o largura do painel, distância entre painéis e o ângulo de inclinação do terreno. No inclinómetro tem-se a possibilidade de escolher o tipo de dispositivo de leitura, em tensão ou em corrente.

Neste momento está feita a configuração de todos os parâmetros utilizados no algoritmo. É selecionado *Done* na página (Figura 4.25), sendo direcionado para a página inicial (Figura 4.21). A partir desse ponto são escolhidos os modos de funcionamento, através do botão *Function*

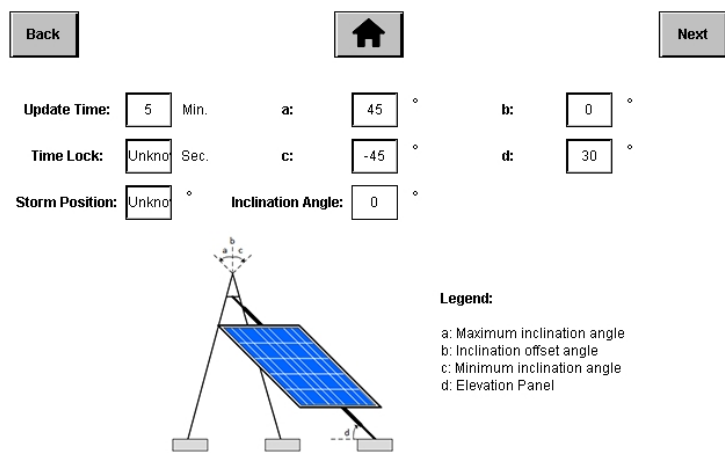


Figura 4.24: Configuração das propriedades do painel.

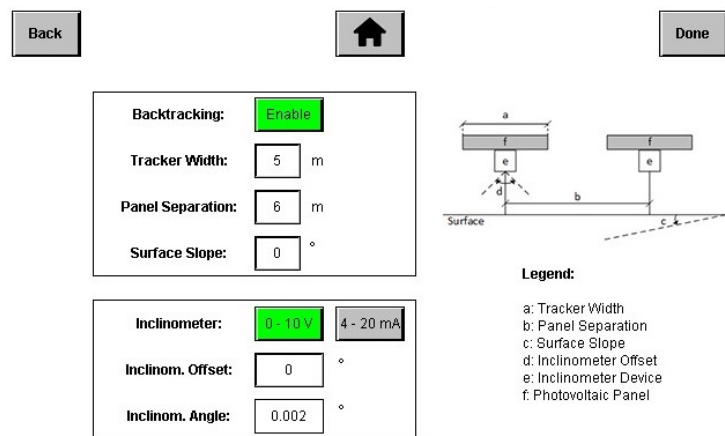


Figura 4.25: Configuração do *backtracking* e inclinómetro.

Modes que será direcionado para a página da Figura 4.26.

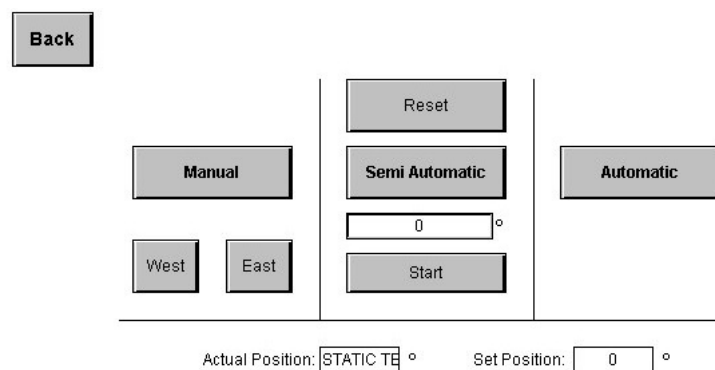


Figura 4.26: Página de configuração do modo de funcionamento.

Os modos de funcionamento estão repartidos em três tipos, nomeadamente: manual; semi-automático e automático. Os dois primeiros modos (manual e semi-automático) servem para testar o funcionamento do seguidor solar, sendo que no modo manual o utilizador pode alterar a inclinação do painel livremente. No modo semi-automático o utilizador preenche o campo com

um dado ângulo de inclinação e premindo *Start*, o seguidor irá direcionar o painel para esse ângulo escolhido. Quando o modo automático é selecionado, o algoritmo de posicionamento solar dá início ao seu ciclo de funcionamento.

O parâmetro *Actual Position* corresponde ao ângulo de inclinação que o seguidor solar se encontra naquele instante e o parâmetro *Set Position* corresponde ao ângulo de inclinação da última atualização do algoritmo, valor esse que será o próximo ângulo de inclinação a dar aos painéis FV. O intervalo de valores do *Set Position* será tanto maior quanto maior for o intervalo de *Update Time* (Figura 4.24). Assim, o *Update Time* tem que ser bem configurado para que tal não aconteça.

A Figura 4.27 mostra a página inicial com uma janela de alarmes. Foi implementada esta janela na página inicial, porque é importante notificar o utilizador dos possíveis alarmes que possam ocorrer. Foram escolhidas os alarmes mais usuais que podem ocorrer num parque FV, nomeadamente a velocidade do vento acima do valor máximo, informação do inclinómetro errada, imposição de fim de curso atingido e ausência de rotação de motor. No caso da Figura 4.27 o alarme que está ativo é o motor. Possivelmente poderá ser algum problema relacionado com o motor que impede o correto funcionamento dos seguidores solares, por exemplo um esforço do motor superior ao normal provocado por um obstáculo, detetado através da informação do inclinómetro e da corrente absorvida pelo motor. Ao fim de resolver o problema do erro, basta clicar sobre o botão *Reset Errors* para limpar o painel dos alarmes e voltar de novo ao ciclo de funcionamento.

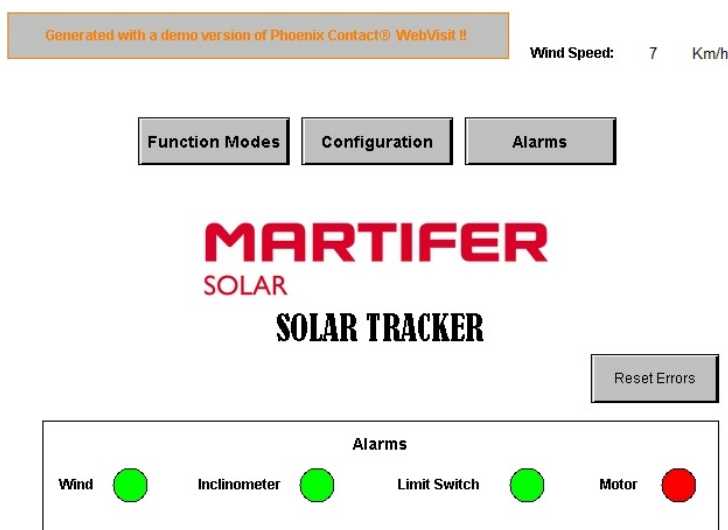


Figura 4.27: Página inicial com janela de apresentação de alarmes.

5. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados relativos ao sistema implementado. Na análise serão destacados os resultados obtidos para o ângulo de incidência solar, bem como os resultados obtidos com o algoritmo de *backtracking*. Todos os resultados serão comparados com os valores esperados, calculados previamente num PC. Para além disso os resultados obtidos serão comparados com outros algoritmos.

5.1 Azimute e Elevação do Sol

Os ângulos de azimute e elevação do Sol foram obtidos através dos resultados do algoritmo SPA ao longo das 24 horas para cada estação do ano. O algoritmo SPA foi comparado com um outro algoritmo já existente, o algoritmo PSA (ver secção 2.4.3) [32]. Esta comparação deve-se ao facto da empresa promotora não poder disponibilizar a sua base de dados devido a políticas internas. A Figura 5.1 apresenta o resultado da elevação do Sol de dois algoritmos, algoritmo SPA da NREL e o algoritmo PSA. Este estudo tem a finalidade de comparar os resultados de ambos os algoritmos. De notar que ambos os gráficos são semelhantes.

A Figura 5.2 apresenta a evolução do ângulo de azimute ao longo das 24 horas, obtendo-se também uma semelhança entre os dois gráficos. De notar que no período entre as 10h e 15h ocorre um aumento na variação do ângulo de azimute do Sol. Isso deve-se ao facto do ângulo de elevação do Sol estar próximo do seu valor máximo (Figura 5.1).

A Figura 5.3 apresenta as margens de erro entre os algoritmos PSA e SPA. Este teste é feito para

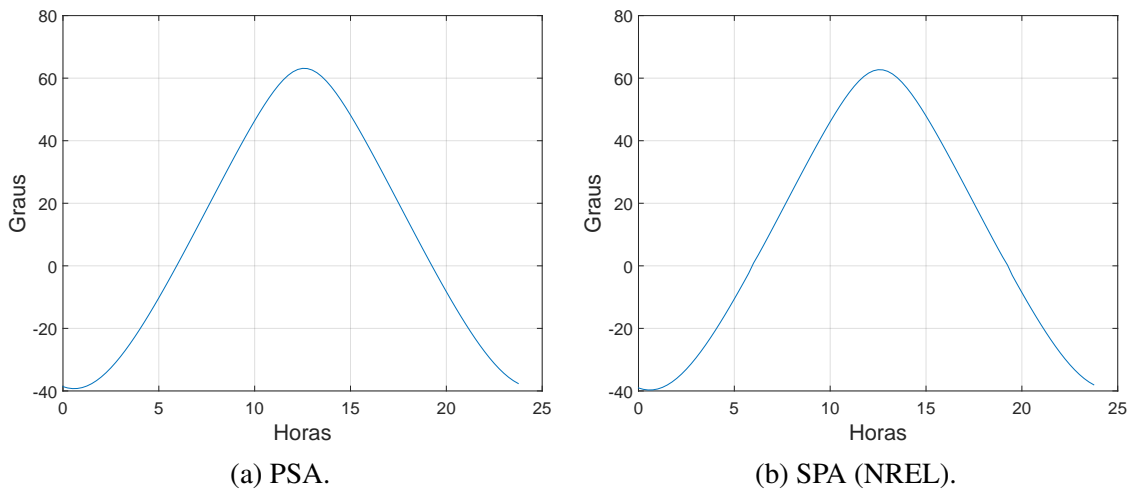


Figura 5.1: Evolução da elevação do Sol na Primavera (20-04-2014).

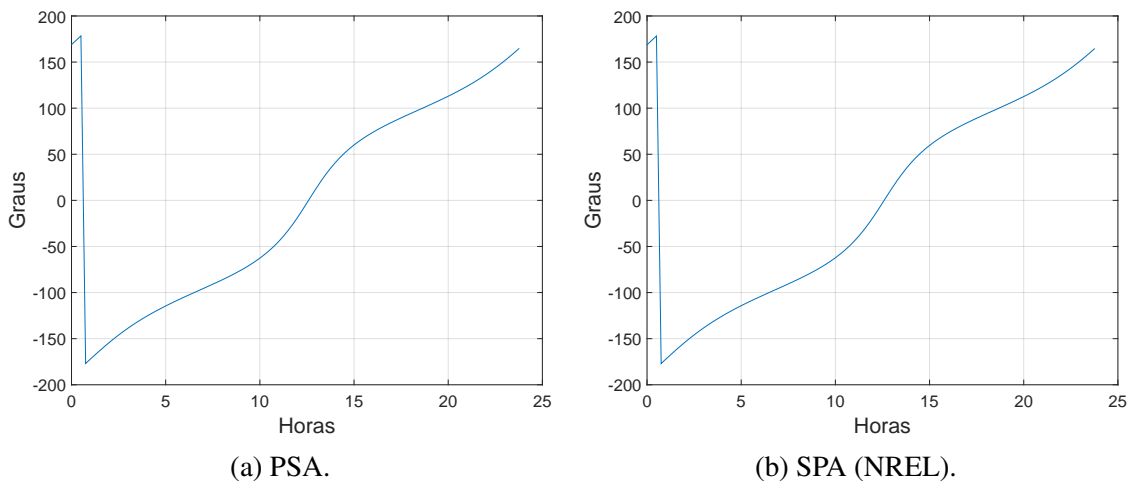


Figura 5.2: Evolução do azimute do Sol na Primavera (20-04-2014).

as 4 estações do ano, escolhendo aleatoriamente uma data. O processo de análise das Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 para as restantes estações do ano encontram-se no Anexo ???. De notar que os gráficos apresentam margens de erro com uma amplitude a variar até cerca de 0.5, demonstrando que o algoritmo SPA tem uma maior precisão nos resultados [33, 32]. Deste modo obteve-se um erro médio de 0.3121° para o ângulo de elevação e 0.3101° para o ângulo de azimute, como se pode observar na Tabela 5.1. O erro médio é calculado através da seguinte expressão:

$$Erro = \frac{\sum_{i=1}^N Erro(i)}{N} \quad (5.1)$$

onde:

- $Erro(i) = |(PSA(i) - SPA(i))|$ para o azimute e a elevação;
- N é o número de amostras correspondente ao erro de azimute e erro de elevação.

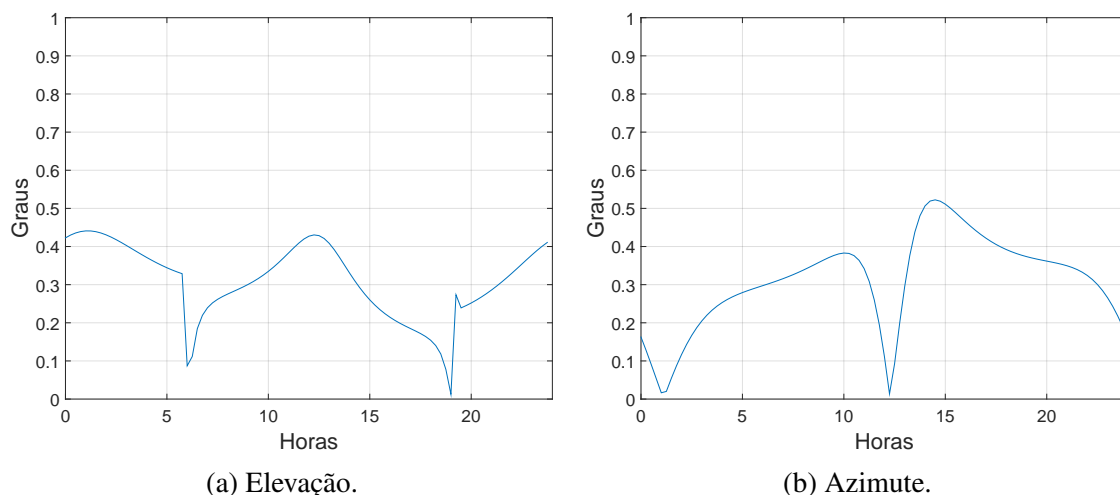


Figura 5.3: Margens de erro instantâneo na Primavera (20-04-2014).

Tabela 5.1: Margens de erro nas respectivas estações do ano (MATLAB).

Estação do ano	Data	Erro	
		Elevação	Azimute
Primavera	20-04-2014	0.3121°	0.3101°
Verão	15-08-2014	0.2772°	0.2353°
Outono	25-10-2014	0.2646°	0.2193°
Inverno	10-01-2015	0.0381°	0.0331°

5.2 Algoritmos de Backtracking

Esta secção tem como objetivo a análise do algoritmo de *backtracking* desenvolvido, juntamente com um algoritmo de *backtracking* implementado por outros autores, com o intuito de fazer algumas comparações e justificar a escolha do algoritmo de *backtracking* desenvolvido. O algoritmo de *backtracking* desenvolvido encontra-se na secção 3.1.2 e o algoritmo comparativo encontra-se na secção 3.1.1, desenvolvido por Dan Weinstock e Joseph Appelbaum. Na Figura 5.4 apresentam-se 2 gráficos referentes ao ângulo de inclinação do painel solar para um dos casos: o gráfico da Figura 5.4a refere-se ao algoritmo de *backtracking* desenvolvido e o gráfico da Figura 5.4b refere-se ao algoritmo implementado pelos dois autores, Dan Weinstock e Joseph Appelbaum. Como se pode observar, os resultados obtidos por ambos os algoritmos são semelhantes. A distância entre painéis escolhida foi de 1.2 metros ($d = 1.2$) para uma dimensão de cada painel de 1 metro ($w = 1$). O resultado final destes algoritmos irão ser muito semelhantes uns dos outros, porém são alcançados de formas distintas.

Na Figura 5.5 apresentam-se 2 gráficos referentes ao coeficiente de *backtracking*. O mecanismo de funcionamento dos algoritmos de *backtracking* passam por analisar o período de *backtracking* e o período de *no-backtracking*, ou seja, haverá períodos em que os painéis farão o seguimento normal, sem *backtracking*, e períodos em que os painéis farão *backtracking*. Em relação ao algoritmo desenvolvido (gráfico da Figura 5.5a), quando o coeficiente de *backtracking* é in-

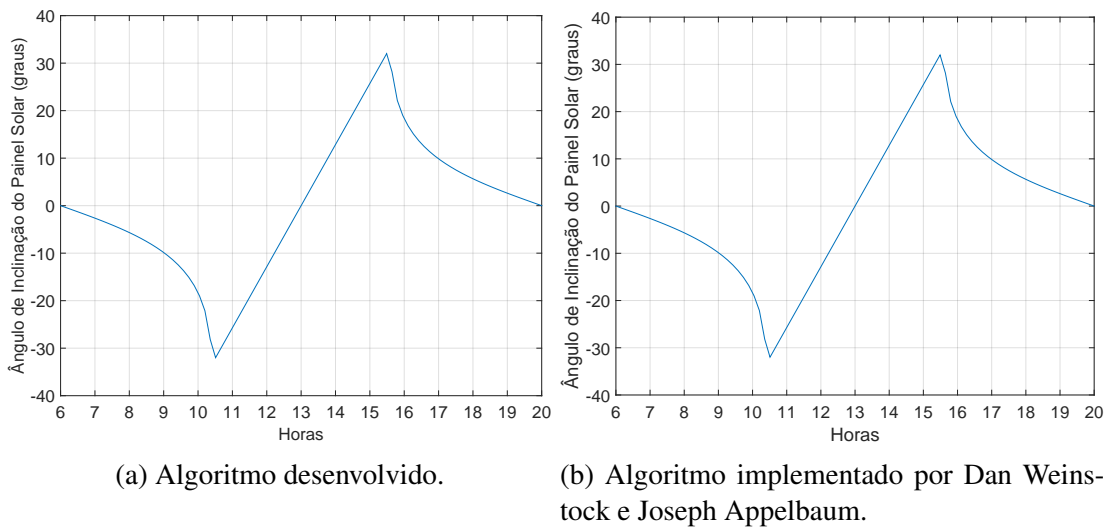


Figura 5.4: Ângulo de inclinação do painel solar (espaçamento entre painéis: 1.2 metros).

ferior ou igual a 1, significa que o painel se encontra a fazer *backtracking*. Quando o coeficiente de *backtracking* é superior a 1, significa que o painel se encontra a fazer o seguimento solar normal. Neste algoritmo é aplicada a condição que separa o *backtracking* do *no-backtracking*, ou seja, coeficiente de *backtracking* ≤ 1 ou > 1 . A fronteira de *backtracking/no-backtracking* está relacionada com a distância entre painéis e a dimensão dos painéis. Em relação ao algoritmo implementado por Dan Weinstock e Joseph Appelbaum (gráfico da Figura 5.5b), o coeficiente de *backtracking* varia entre 0 e 1, sendo necessário efetuar a procura do ponto de fronteira que neste caso é de 0.92 (como explicado na secção 3.1.1). Se o coeficiente de *backtracking* estiver abaixo deste valor, o seguidor encontra-se a fazer *backtracking*, caso contrário o seguidor efetua o seu seguimento normal.

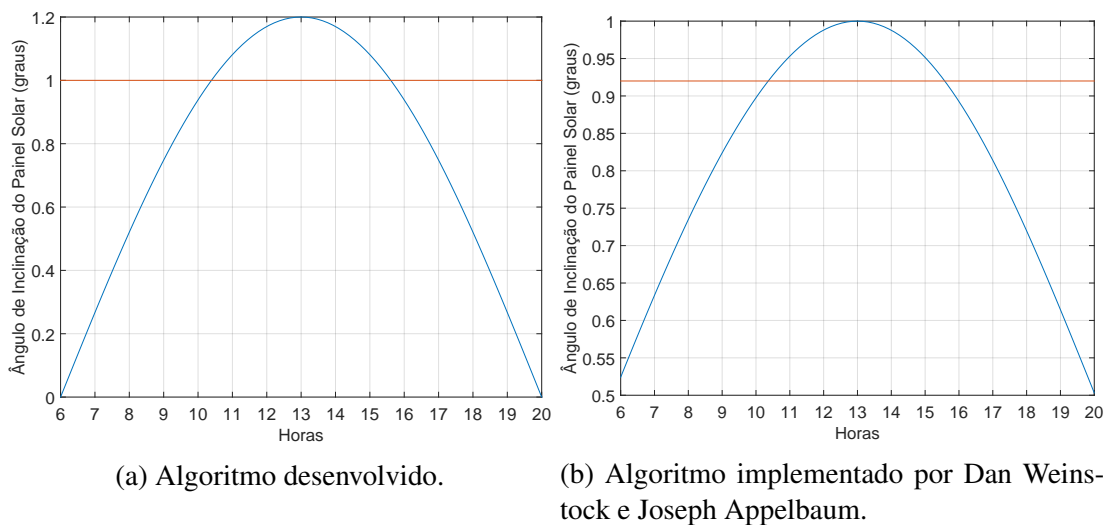


Figura 5.5: Coeficiente de *backtracking* (espaçamento entre painéis: 1.2 metros).

De seguida é alterado o valor de distanciamento entre painéis para 1.75 metros. A distância entre painéis é um parâmetro que tem que ser adaptada à estrutura de um parque FV, logo é um

parâmetro que varia de parque para parque. A Figura 5.6 apresenta um gráfico comparativo do ângulo de inclinação dos painéis solares. Neste caso nota-se uma ligeira diferença em relação ao caso anterior da Figura 5.4. A razão de existir um corte aos 45° no ângulo de inclinação é devido à limitação física do painel. Essa limitação está implementada no algoritmo como uma medida de segurança, controlada pelos fins-de-curso.

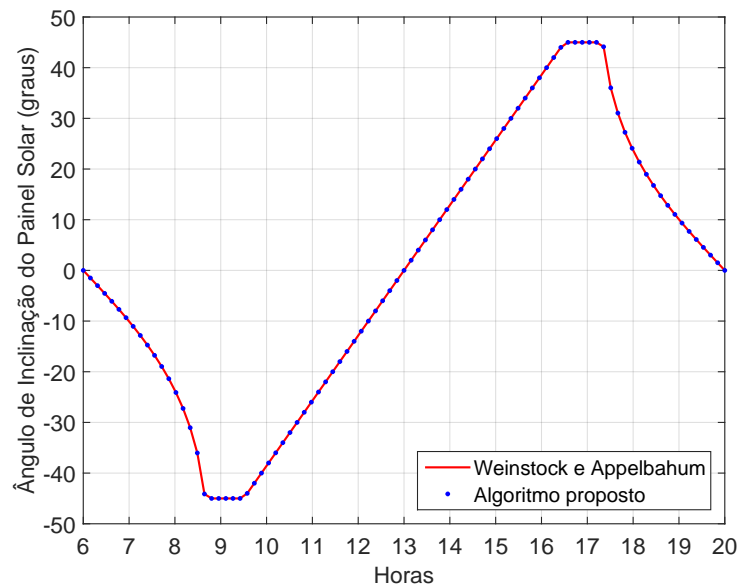


Figura 5.6: Ângulo de inclinação do painel solar (espaçamento entre painéis: 1.75 metros).

Na Figura 5.7 está presente o coeficiente de *backtracking* para uma distanciamento entre painéis de 1.75 metros. De notar que na Figura 5.7a ocorre uma alteração na gama de valores, sendo que a variação altera de valor um máximo de 1.2 (Figura 5.5a) para aproximadamente 1.8. O facto de haver uma alteração na distância entre painéis, vai alterar a gama de valores do coeficiente de *backtracking*, porque a fronteira *backtracking/no-backtracking* ocorre quando o valor é 1. No caso da Figura 5.7b, a gama de valores mantém-se entre 0 e 1 e o ponto de fronteira para este caso é aproximadamente 0.8. Deste modo a implementação do algoritmo de *backtracking* desenvolvido é mais simples, uma vez que o coeficiente de *backtracking* é um parâmetro fixo. O algoritmo desenvolvido por Dan Weinstock e Joseph Appelbaum tem a variação do coeficiente de *backtracking* entre 0 e 1, independentemente da distância entre painéis e dimensão dos painéis. Assim, a variação está no valor que determina a fronteira de *backtracking/no-backtracking*, obrigando o utilizador a proceder à configuração do algoritmo para cada caso de aplicação. Para além disso, o algoritmo desenvolvido por Weinstock e Appelbaum não permite ser aplicado a superfícies com inclinação, tornando-o bastante limitado em termos reais de aplicação.

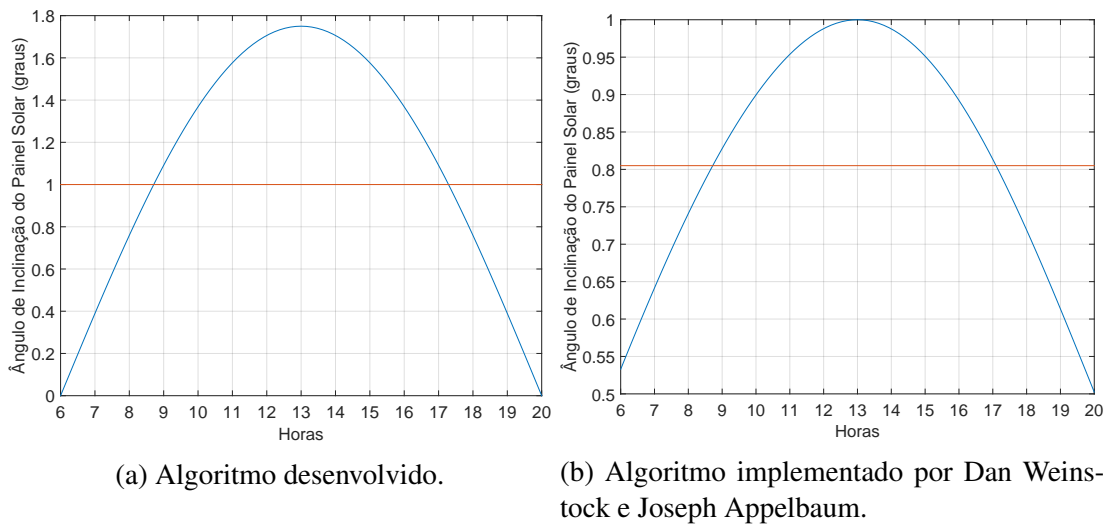


Figura 5.7: Coeficiente de *backtracking* (espaçamento entre painéis: 1.75 metros).

5.3 Inclinação dos painéis

A inclinação dos painéis FV é um dos parâmetros necessários para o correto funcionamento dos seguidores solares, sendo calculado através de (3.7). Na Figura 5.8 estão representados vários gráficos comparativos da evolução do ângulo de inclinação dos painéis FV. A comparação é feita com os resultados do PLC e os resultados de uma simulação feita no software MATLAB, onde se verifica uma semelhança nos resultados obtidos. Assim, isto significa que o PLC está a responder bem ao algoritmo que foi implementado.

Na Figura 5.9 apresenta-se um gráfico correspondente ao erro dos ângulos de inclinação dos painéis solares. De notar que existe alguma discrepância nos resultados correspondentes ao erro. Contudo, os gráficos das Figura 5.8 ajudam a interpretar melhor a evolução dos seguidores solares e concluir que o erro não deverá influenciar o resultado final, uma vez que se trata do instante no qual está a ser feita a transição do *backtracking* para o seguimento normal (algoritmo SPA) ou vice-versa. Neste período, uma pequena variação no instante de tempo implicará uma grande variação do ângulo de inclinação dos painéis. Para além disso, o erro maior ocorre numa fase em que o programa do PLC transita do algoritmo de posicionamento solar SPA para o algoritmo de *backtracking*. Nesse momento o sentido de rotação dos motores dos seguidores solares inverte, dando origem a um erro acentuado. No entanto, o erro baixa drasticamente e tende a diminuir à medida que a inclinação dos painéis tende para zero.

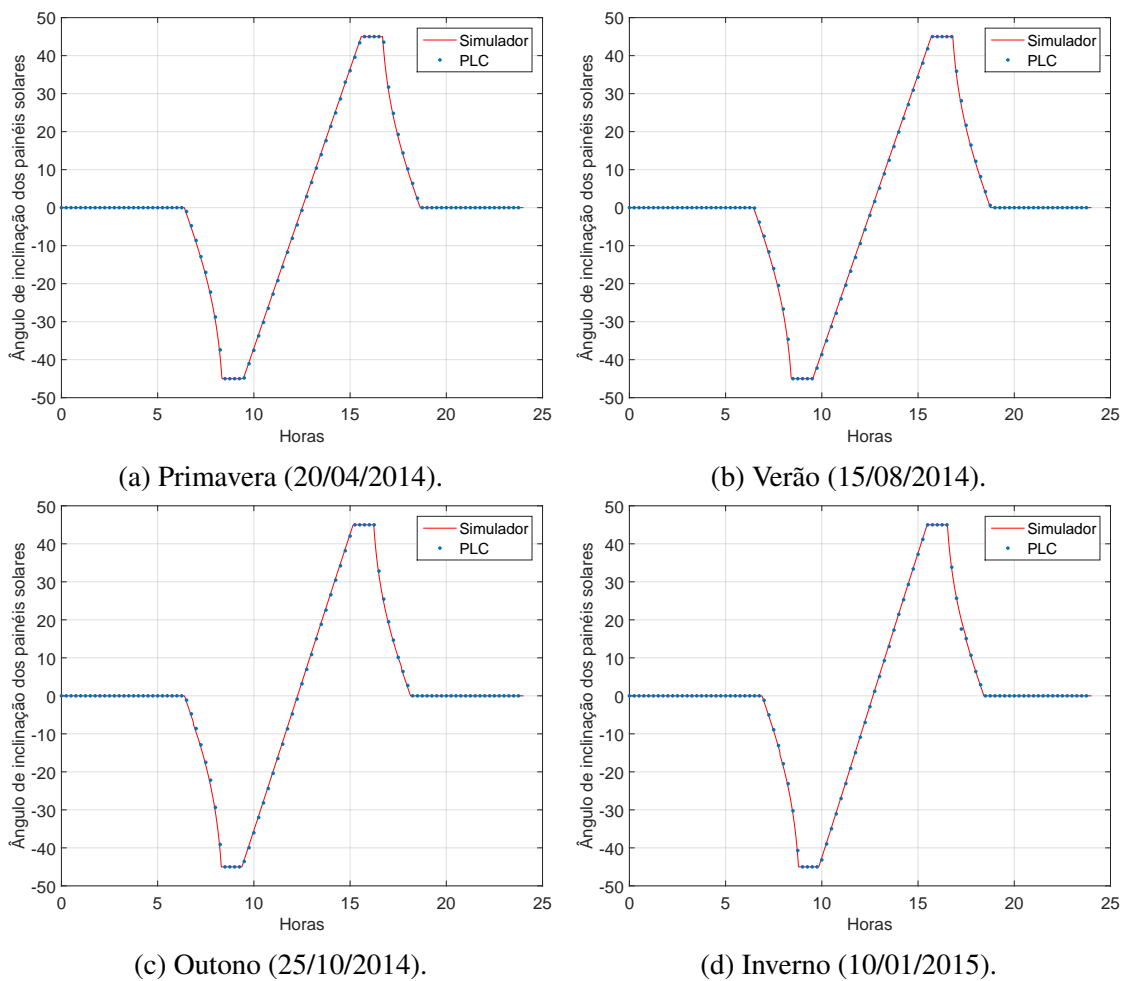


Figura 5.8: Ângulos de inclinação dos painéis solares (Simulador vs PLC).

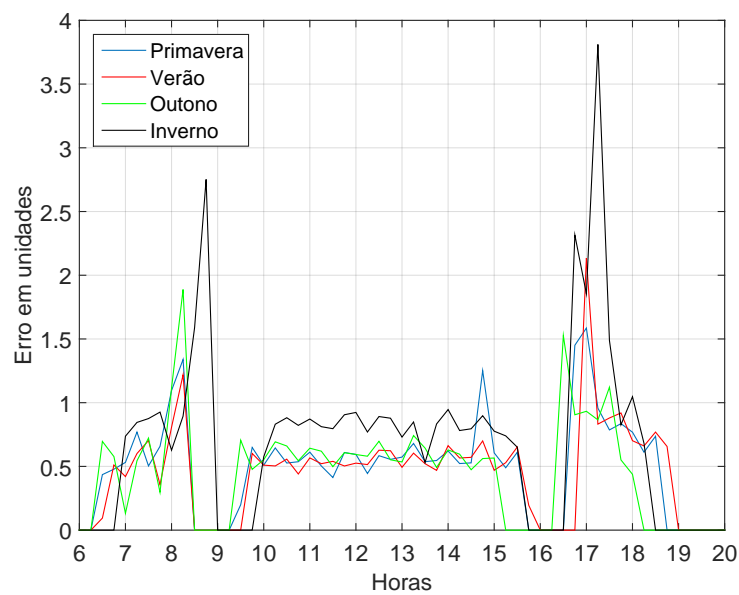


Figura 5.9: Erro do ângulo de inclinação dos painéis solares (4 estações).

6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões Gerais

As energias renováveis são cada vez mais uma opção para a produção de energia elétrica, porque é uma fonte com recursos infinitos e com baixa poluição ambiental. O conteúdo deste documento relatou uma solução encontrada para melhorar o rendimento de um seguidor FV de um eixo. Para tal, foi implementado um algoritmo de posicionamento solar, cujo objetivo foi descobrir o ângulo de incidência solar para à posteriori traduzir essa informação na correta inclinação a dar aos seguidores solares. Para complementar todo este sistema foi desenvolvido e implementado um outro algoritmo que evita o sombreamento dos painéis solares adjacentes, denominado por algoritmo de *backtracking*. Para além disso, também tem a funcionalidade de adaptar os seguidores solares a terrenos inclinados.

Relativamente aos resultados obtidos, o algoritmo SPA mostrou ser a melhor alternativa, pois contém uma alta precisão no cálculo da posição do Sol, quando comparado com o PSA, um outro algoritmo de posicionamento. A adaptação do ângulo de incidência solar à inclinação dos painéis mostrou que poderia ser um problema, porque a diferença de valores MATLAB-PLC é acentuada. No entanto chegou-se à conclusão que a maior gama de erro ocorria no período em que o programa transita do algoritmo de posicionamento solar SPA para o algoritmo de *backtracking*, baixando logo de seguida e vai diminuindo à medida que a inclinação dos painéis FV tendem para zero.

Este trabalho responde bem às expectativas, pois os resultados obtidos demonstram que os

algoritmos implementados irão melhorar a eficiência dos painéis FV e, assim, será garantido um maior rendimento na produção de energia elétrica.

6.2 Trabalhos Futuros

Todos os objetivos propostos foram atingidos, no entanto podem-se destacar algumas ideias que foram surgindo ao longo da elaboração deste trabalho que podem levar a uma melhoria do trabalho desenvolvido:

- Verificar o comportamento do algoritmo SPA no hemisfério Sul e adaptar todo o sistema para esse hemisfério (uma vez que os painéis estão direcionados a Norte);
- Estudo sobre o seguimento solar no Inverno com o intuito de possibilitar a imobilização dos seguidores solares nesse período, não alterando a produção de energia elétrica;
- Estudo sobre a percentagem máxima de sombra incidente nos painéis com o objetivo de provar se ocorrem alterações nos coeficientes de produção de energia (balanceamento entre a inclinação não-ótima e sombra nos painéis);
- Implementação de uma aplicação ANDROID adaptada a este sistema de produção de energia, com o objetivo de efetuar toda a configuração dos dados inseridos na página web e monitorização dos alarmes;
- Estudo sobre a melhor taxa de atualização da posição do Sol do algoritmo SPA, podendo ser variável ao longo do dia. Maior frequência implica maior consumo; menor frequência implica menor eficiência e menor precisão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Pacheco, “Energias renováveis: breves conceitos,” *Conjuntura e Planejamento, Salvador (C&P)*, pp. 4–11, 2006.
- [2] “História da energia elétrica.” [Online]. Disponível em: <http://www.cpfl.com.br/energias-sustentaveis/eficiencia-energetica/uso-consciente/historia-da-energia/Paginas/default.aspx> [Acedido em: 2014-07-19]
- [3] “The long-term tie between energy supply, population, and the economy; our finite world.” [Online]. Disponível em: <http://ourfiniteworld.com/2012/08/29/the-long-term-tie-between-energy-supply-population-and-the-economy/> [Acedido em: 2014-07-18]
- [4] C. Vieira, N. Ferraz, e J. Alves, “Casos de utilização de energias renováveis,” Associação Empresarial de Portugal, 2010.
- [5] “EfS hub - population.” [Online]. Disponível em: <http://www.swinburne.edu.au/ncs/efshub/sustainabilityPopulation.html> [Acedido em: 2014-07-09]
- [6] *Manual de Boas Praticas na Utilização Racional de Energia e Energias Renováveis*, Associação Portuguesa de Indústria de Cerâmica (APICER), 2012.
- [7] J. B. Conti, “Considerações sobre as mudanças climáticas globais,” *Revista do Departamento de Geografia (USP)*, vol. 16, pp. 70–75, 2005.
- [8] “Efeito de estufa.” [Online]. Disponível em: http://static.publico.pt/fichas/ambiente/efeito_estufa.html [Acedido em: 2014-07-18]
- [9] “An energy/GDP forecast to 2050; our finite world.” [Online]. Disponível em: <http://ourfiniteworld.com/2012/07/26/an-optimistic-energygdp-forecast-to-2050-based-on-data-since-1820/> [Acedido em: 2014-07-18]
- [10] “Solar shifts peak in WA, installations forecast to treble : Renew economy.” [Online]. Disponível em: <http://reneweconomy.com.au/2014/solar-shifts-peak-in-wa-installations-forecast-to-treble-53124> [Acedido em: 2014-07-18]
- [11] “Preço dos painéis solares fotovoltaicos até 2020.” [Online]. Disponível em: <http://www.portal-energia.com/preco-dos-paineis-solares-fotovoltaicos-caira-60-ate-2020/> [Acedido em: 2014-07-10]

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [12] J.-S. Ko e D.-H. Chung, “Control of a novel pv tracking system considering the shadow influence,” *Journal of Electrical Engineering and Technology*, vol. 7, pp. 524–529, 2012.
- [13] L. Narvarte e E. Lorenzo, “Tracking and ground cover ratio,” *Wiley InterScience*, vol. 16, pp. 703–714, 2008.
- [14] D. Schneider, “Control algorithms for large-scale single-axis photovoltaic trackers,” Institute of Imaging & Computer Vision, RWTH Aachen University, Prague, Czech Republic, May 17 2012.
- [15] D. Weinstock e J. Appelbaum, “Diffuse irradiance and tracker simulations,” *Journal of Solar Energy Engineering*, 2004.
- [16] “Antropia: A ação do homem sobre o meio ambiente - Rotação e Translação.” [Online]. Disponível em: <http://antropia3.blogspot.pt/2010/10/rotacao-e-translacao.html> [Acedido em: 2014-07-29]
- [17] T. Vale, “Fundamentos de astronomia e astrofísica,” Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Física, Departamento de Astronomia, 2010.
- [18] “Etimología: Nihil sub sole novum, page 3.” [Online]. Disponível em: <https://nihilnovum.wordpress.com/category/etimologia/page/3/> [Acedido em: 2014-07-29]
- [19] D. P. d. Silva *et al.*, “Sistema eletrônico para processamento de energia solar fotovoltaica, operando na máxima transferência de potência, com aplicação na alimentação de refrigeradores convencionais,” Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.
- [20] “Consultor de Telecomunicaciones y Electricidad (CTE).” [Online]. Disponível em: <http://ingenieroandreotti.blogspot.pt/2013/01/plan-solar-san-juan-fabricacion-de.html> [Acedido em: 2014-07-28]
- [21] D. M. S. Carvalho, “Análise e Caracterização Energética de Sistemas Fotovoltaicos de Baixa Potência com Ligação à Rede Eléctrica,” Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
- [22] A. H. Fanney, “Comparison of photovoltaic module performance measurements,” *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 128, no. 2, pp. 152–159, 2006.
- [23] “Energia solar termica y paneles solares.” [Online]. Disponível em: <http://www.duraclima.es/documentos/energia-solar-puerto-real-cadiz.html> [Acedido em: 2014-07-16]
- [24] “Painéis policristalinos.” [Online]. Disponível em: <http://www.paineisfotovoltaicos.com/policristalinos.php> [Acedido em: 2014-07-16]
- [25] R. J. M. Cortez, “Sistema de Seguimento Solar em Produção de Energia Fotovoltaica,” Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [26] “Solar Tracking.” [Online]. Disponível em: <http://www.degerenergie.de/en/solar-tracking.html> [Acedido em: 2014-07-28]
- [27] “Seguidores solares, ISOFOTON.” [Online]. Disponível em: <http://www.nanfor.com/demos/isofoton/productos-seguidores-solares.html> [Acedido em: 2014-08-10]
- [28] “Seguidores solares, Sumiseran.” [Online]. Disponível em: <http://www.sumiseran.es/contents/es/d18.html> [Acedido em: 2014-08-10]
- [29] “Solar Trackers for Field Power Systems.” [Online]. Disponível em: http://www.brightgreenenergy.co.uk/deger_solar_trackers.asp [Acedido em: 2014-08-10]
- [30] “Dual Axis Solar Tracking System, Team Internationals.” [Online]. Disponível em: <http://carnot.mech.columbia.edu/~sd/Design2014/Team2/> [Acedido em: 2014-08-11]
- [31] W. Q. Brandão, “Cálculo das coordenadas horizontais do Sol,” *Universidade Estadual de Feira de Santana*, pp. 933–936, 2011.
- [32] M. Blanco-Muriel, D. C. Alarcón-Padilla, T. López-Moratalla, e M. Lara-Coira, “Computing the solar vector,” *Solar Energy*, vol. 70, no. 5, pp. 431–441, 2001.
- [33] I. Reda e A. Andreas, “Solar position algorithm for solar radiation applications,” National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2008.
- [34] J. H. Meeus, *Astronomical Algorithms*. Willmann-Bell, Incorporated, 1991.
- [35] J. Carneiro, “Módulos fotovoltaicos: Características e associações,” Universidade do Minho, Guimarães, 2010.
- [36] W. F. Marion e A. P. Dobos, “Rotation angle for the optimum tracking of one-axis trackers,” TP-6A20-58891. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, Tech. Rep., 2013.
- [37] “Materiais utilizados: Laboratório de Fontes Alternativas de Energia.” [Online]. Disponível em: http://bdtd.bce.unb.br/tesesimplificado/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=1313 [Acedido em: 2014-07-24]
- [38] S. O. Moraes, “Ventos em ambientes externos: Métodos de controle e medições,” Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2013.
- [39] L. Pinto, “Técnicas com sistemas digitais,” 2014.
- [40] *Inclinometers*, TURCK Inc. Minneapolis, Industrial Automation, brochure.