



**João Luís Cardoso
Consolado Chambel dos
Santos**

**Sistema Dinâmico de Microprodução Fotovoltaica de
Elevado Rendimento**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Automação Industrial, realizada sob a orientação científica do Dr. José Paulo Oliveira Santos, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Prof. Dr. Jorge Augusto Fernandes Ferreira
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

orientador

Prof. Dr. José Paulo Oliveira Santos
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

arguente

Prof. Catedrático Joaquim José Borges Gouveia
professor catedrático da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Quero agradecer ao meu pai Luís, à minha mãe Maria e à minha irmã Ana por toda a compreensão, apoio e carinho que me foi dado ao longo de toda a minha vida, principalmente durante a minha ausência e vida académica.

À minha namorada Micaela pelos conselhos, paciência e amizade durante as fases mais complicadas desta viagem. E pelo constante incentivo que me fez continuar mesmo em momento de fraqueza.

Ao Professor José Paulo Santos pela paciência, ajuda e disponibilidade que sempre demonstrou ao longo destes últimos anos.

Por último aos meus amigos, mas não menos importantes, que me acompanharam quase diariamente ao longo de toda a minha vida académica e pessoal. Pela sua ajuda, amizade, lealdade e conselhos, tornaram mais fácil, esta e outras tarefas próprias de um estudante universitário.

A todos, um muito obrigado.

palavras-chave

Microprodução, sistemas fotovoltaicos, energias renováveis, smart-grids, produção.

resumo

A presente dissertação foca-se em sistemas de microprodução fotovoltaicos e numa possibilidade de aumentar a sua produção. Neste tipo de sistemas os painéis solares são o elemento principal, que permitem converter a energia solar em energia eléctrica, mas esta conversão é feita com uma eficiência baixa, da ordem dos 15%.

Para que seja possível a conversão é necessário que as células sejam submetidas a luz solar, quanto maior for a quantidade de luz incidente maior será o valor de energia convertido. Devido ao movimento de rotação e translação da terra, a posição relativa do sol vai-se alterando ao longo do dia e do ano. As variações de luz solar ao longo do dia, fazem com que a produção do sistema fotovoltaico também varie.

Os sistemas de microprodução fotovoltaica em Portugal estão sujeitos a determinadas leis, uma das quais limita a potência máxima que o sistema pode debitar. Nesta situação o sistema de microprodução irá debitar a sua potência máxima no meio do dia, onde a luz solar é mais intensa, sendo que no restante tempo o sistema irá produzir uma potência inferior à limite.

É o objectivo desta tese desenvolver um sistema para melhorar o aproveitamento das horas em que a luz solar disponível não permite produzir a potência máxima. A abordagem tomada parte pelo sobredimensionamento do sistema de produção fotovoltaico e desenvolvimento de um sistema de controlo. O sistema de controlo será responsável por regular a potência produzida ao longo do dia, e assegurar-se de que esta nunca excede o limite.

Pretende-se desenvolver um protótipo para controlo da potência produzida e a sua análise, a fim de verificar os ganhos obtidos com esta abordagem para aumentar a produção de um sistema fotovoltaico.

keywords

Microproduction, photovoltaic systems, renewable energies, smart-grids, production.

abstract

This thesis is focused in photovoltaic micro production systems and the possibility of improving its efficiency. In this kind of systems the solar panels are the main element, because they allow the conversion of sun light into electrical energy, but with low efficiency around 15%.

To start the conversion it is required that the solar cells receive sun light, increased light will also increase the production. Because of the earth's rotation and translation movements, the sun position changes along the day and year. The sun light changes make the photovoltaic production to change as well.

The photovoltaic micro production systems in Portugal are subject to laws, one of them limits the maximum power production. In this case the system will produce its maximum power at around mid-day, where the sun light is stronger, during the rest of the day the production will be lower than the limit because of the weaker sun light.

It is the purpose of this thesis to develop a system that makes better use of the sun light when it is not enough to produce the maximum power. The approach taken requires over dimensioning the photovoltaic system and the development of a controlling system. The control system will take part in regulating the production along the day, avoiding the production to exceed the power limit.

A prototype of the production control system is to be study and developed, in order to check the benefits of this this kind of approach to increase efficiency in photovoltaic micro production systems.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Contexto	2
1.2	Descrição do Problema	3
1.3	Solução	3
1.4	Organização do Documento	5
2	Estado dos Sistemas de Microgeração	6
2.1	Sistema de Produção Fotovoltaico	6
2.1.1	Geração de Energia	7
2.1.2	Conversão de Energia	14
2.1.3	Protecções	20
2.2	Microgeração	21
2.2.1	Condições de Microprodução	22
2.3	Tecnologias Actuais	24
2.3.1	Métodos de Seguimento Solar	25
2.3.2	Método de Concentração Solar	26
2.3.3	Observações	27
3	Solução Proposta	28
3.1	Módulo Painel	28
3.1.1	Medição de Valores	29
3.1.2	Controlo da Produção do Painel (Adição ou Remoção)	46
3.1.3	Unidade de Processamento	49
3.1.4	Alimentação do Módulo	51
3.1.5	Comunicação com a Rede	53
3.1.6	Soluções Propostas	55
3.1.7	Funcionamento	58
3.2	Módulo Central	59
3.2.1	Comunicações	59
3.2.2	Interface	60

3.2.3	Funcionamento	63
3.3	Rede de Comunicação	64
3.3.1	Camada Física	65
3.3.2	Controlo de Acesso ao Meio	68
3.3.3	Protocolo	69
3.3.4	Detecção de Erros	71
4	Implementação	73
4.1	Módulo painel	74
4.1.1	Placa de Prototipagem	74
4.1.2	Placa de Circuito Impresso	75
4.1.3	Dimensionamento	77
4.2	Módulo Central	83
4.2.1	Descrição Interfaces	84
4.2.2	Interface WEB.....	85
4.3	Comunicação Módulos.....	86
4.3.1	Adaptador Módulo Central	86
4.3.2	Adaptador Módulo Painel	87
4.3.3	Esquema de ligação dos condutores.....	88
5	Análise de Rentabilização do Sistema	90
5.1	Condições de Análise.....	91
5.2	Análise do Sistema Estático.....	92
5.3	Análise do Sistema Estático Melhorado.....	95
6	Conclusões.....	98
7	Bibliografia	99
8	Anexos	102
8.1	Fabricação de Células Solares	102
8.2	Esquema Eléctrico Módulo Painel.....	105
8.3	Esquema Eléctrico Adaptador Módulo Central.....	106
8.4	Esquema Eléctrico Adaptador Módulo Painel.....	107
8.5	Mensagens da Comunicação.....	108
8.6	Datasheet Inversor SunnyBoy 700-US	110
8.7	Datasheet SUNPORT 72M	112

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Outras características de funcionamento do inversor.	20
Tabela 2 - Influência da fonte renovável no preço de venda da energia. Fonte: [6].	23
Tabela 3 - Evolução da potência instalada de microprodução em todo o país. Fonte: [5].	24
Tabela 4 - Rendimento célula solar vs. Rendimento inversor.	24
Tabela 5 - Valores das resistências com aplicação da tolerância e temperatura numa situação desvantajosa.	31
Tabela 6 - Erro acumulativo, para as condições desfavoráveis mencionadas.	31
Tabela 7 - Outras características para selecção do relé ou contactor.	48
Tabela 8 - Modos de funcionamento do MOSFET e suas equações.	48
Tabela 9 - Características adicionais do PIC18F26J50. Fonte: [13].	51
Tabela 10 - Exemplos de transcievers.	54
Tabela 11 – Soluções propostas para o módulo painel.	56
Tabela 12 - Configurações inversor.	61
Tabela 13 - Especificações e limitações físicas do modelo RS485.	67
Tabela 14 - Número dos comandos e suas acções.	70
Tabela 15 - Mecanismos mais comuns para detecção de erros.	72
Tabela 16 - Funcionalidade módulo painel seleccionadas.	76
Tabela 17 - Características Relé.	78
Tabela 18 - Função atribuída aos pinos Ethernet.	89
Tabela 19 - Características eléctricas Painel Solar.	91
Tabela 20 - Dados exemplo para introdução no simulador.	94
Tabela 21 - Estrutura mensagem da pergunta Master.	108
Tabela 22 - Consideração dos campos "Valor Comando" e seu significado consoante o comando.	108
Tabela 23 - Campos da mensagem de resposta do Slave ao comando "0".	109
Tabela 24 - Campos da mensagem de resposta do Slave ao comando "1" e "4".	109
Tabela 25 - Campos da mensagem de resposta do Slave ao comando "2" e "3".	109

Lista de Figuras

Figura 1 - Custo Importação e Exportação energética em Portugal. Fonte: [1].....	1
Figura 2 - Mapa solar Europeu. Fonte: [2].	2
Figura 3 - Variação da luminosidade (irradiação) solar ao longo do dia.	3
Figura 4 - Ilustração do controlo de painéis ao longo da variação solar de um dia.....	4
Figura 5- Funcionamento geral de um sistema de produção fotovoltaica.	6
Figura 6 - Organização dos vários tipos de células solares. Fonte: [4].....	7
Figura 7 - Estrutura cristalina pura do silício.....	8
Figura 8 – Estrutura cristalina dopada com boro.....	8
Figura 9 – Estrutura cristalina dopada com fósforo.....	8
Figura 10 - Junção P-N e criação da barreira de potencial.....	9
Figura 11 - Movimentação dos electrões em excesso, criando corrente eléctrica numa carga.....	9
Figura 12 - Curva característica díodo.....	9
Figura 13 - Sentido da corrente no díodo e na célula solar.	10
Figura 14 - Evolução gráfica da curva da célula solar.....	10
Figura 15 - Curva característica da célula solar com variações de luminosidade.	11
Figura 16 - Máxima potência possível de debitar para uma dada curva I-V.....	11
Figura 17 - Associação em série de painéis solares.....	13
Figura 18 - Associação em série com diferentes luminosidades por painel solar.....	13
Figura 19 - Exemplo da aplicação e funcionamento dos díodos de derivação.	14
Figura 20 - Inversor controlado pela rede e onda de controlo.	16
Figura 21 - Inversor autocontrolado e onda de controlo.....	17
Figura 22 - Gráfico de eficiência do inversor SUNNY BOY de 700W. Fonte: Anexo 8.6.....	19
Figura 23 - Quantidade de energia produzida nas diferentes fontes renováveis. Fonte: [5]	22
Figura 24 - Constituição geral do sistema de controlo desenvolvido.	28
Figura 25 - Configuração geral para acondicionamento de sinal.....	30
Figura 26 – Divisor Resistivo (Sem isolamento).	30
Figura 27 - Exemplos de isolamento galvânico e óptico.	32
Figura 28 – Sistema Resistivo (Com isolamento).	33
Figura 29 - Exemplo de gráfico relacionando corrente no díodo emissor com característica de transferência. Fonte: [12].....	34
Figura 30 - Opto-Acoplador com dois díodos receptores, modelo IL300 da Vishay. Fonte: [12].	35
Figura 31 – Sistema Resistivo Compensado (Com isolamento).	36
Figura 32 - Resistência Shunt.	38
Figura 33 - Resistência shunt com amplificador.	39
Figura 34 - Efeito electromagnético e efeito de hall.....	40
Figura 35 - Medição a grandes distancias com controlo em corrente.....	40
Figura 36 - Gráfico R-T de um NTC.....	42
Figura 37 - Circuito simples para medição de termístor.....	43
Figura 38 - Curva R-T para Pt-100.	44
Figura 39 - Circuito simples para medição de termoresistência.....	45
Figura 40 - Ilustração do funcionamento pretendido para o sistema de controlo de produção.....	46

Figura 41 - Simbologia MOSFET.	48
Figura 42 - Controlo de produção por MOSFET.	49
Figura 43 - Interligação de blocos com CPU.....	50
Figura 44 - Constituição geral do módulo painel, com alimentação proveniente do painel solar. ..	52
Figura 45 - Constituintes do módulo painel, alimentados por uma fonte externa.....	52
Figura 46 - Diagrama de blocos fonte isolada.....	53
Figura 47 - Constituintes do módulo painel, alimentado por fonte isolada.	53
Figura 48 - Criação de referenciais perigosos.	55
Figura 49 - Fluxograma de funcionamento geral do módulo painel.....	59
Figura 50 - Fluxograma do algoritmo de controlo do módulo central.....	64
Figura 51 - Modelos de Redes.....	65
Figura 52 - Ilustração de diferentes topologias de rede.	66
Figura 53 - Ilustração da instalação dos módulos com topologia em estrela e em barramento.....	66
Figura 54 - Palavra binária e sinais eléctricos diferenciais.	68
Figura 55 - Esquema de resistência a aplicar nas extremidades físicas da rede de comunicação....	68
Figura 56 - Estrutura geral da mensagem.	70
Figura 57 - Estrutura da mensagem com os seus delimitadores.	70
Figura 58 - Ligação dos vários módulos do sistema de controlo da produção.	73
Figura 59 - Placa de prototipagem. Fonte: [14].	75
Figura 60 - Protótipo módulo painel, vista superior.	76
Figura 61 - Protótipo módulo painel, vista inferior.....	76
Figura 62 - Circuito de controlo do relé.	78
Figura 63 - Esquema de regulação do LM317AHVT e correspondente equação. Fonte: [17].	80
Figura 64 - Ilustração de fonte de alimentação isolada.	82
Figura 65 - Exemplo fonte isolada. Fonte: [18].	83
Figura 66 - Placa de desenvolvimento PIC-GSM.	83
Figura 67 - Descrição interfaces placa de desenvolvimento.....	84
Figura 68 - Introdução de dados de acesso.....	85
Figura 69 - Monitorização dos painéis solares.....	85
Figura 70 - Introdução de configuração do sistema fotovoltaico.	86
Figura 71 - Adaptador módulo central.....	87
Figura 72 - Adaptador módulo painel.	88
Figura 73 - Ficha RJ45 macho com numeração dos pinos. Fonte: [20].....	88
Figura 74 - Irradiação solar média ao longo do dia (ano 2005).	92
Figura 75- Resultados do dimensionamento e simulação do sistema estático.	94
Figura 76 - Resultados do dimensionamento e simulação do sistema estático melhorado.....	96
Figura 77 - Comparação do retorno de investimento, entre sistema estático e sistema estático melhorado.....	97
Figura 78 - Ilustração método Czochralski.	103
Figura 79 – Pormenor de linhas de ligação da célula solar (mais finas) a barramento (mais grosso).	103

Figura 80 - Processo de formação do cristal para célula policristalina (esquerda) e aspecto de uma célula policristalina (direita)..... 104

Glossário

SRM – Sistema de Registo da Microprodução

DGEG – Direcção Geral de Energia e Geologia

MPP – Maximum Power Point

MPPT – Maximum Power Point Tracking

DC – Direct Current

AC – Alternate Current

IGBT – Insulated-Gate Bipolar Transistor

MOSFET – Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor

GTO – Gate Turn off Thyristor

uC – Microcontroller

PWM – Pulse Width Modulation

ADC - Analog to Digital Converter

CPU – Central Process Unit

RAM – Random Access Memory

EEPROM – Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory

WEB – World Wide Web

HTTP – Hypertext Transfer Protocol

CSS – Cascading Style Sheets

AJAX - Asynchronous Javascript and XML

CRC – Cyclic Redundancy Check

1 Introdução

Desde a revolução industrial iniciada no Reino Unido, em meados do século XVIII, que a humanidade tem assistido a uma evolução tecnológica extremamente rápida. O que até aqui era produzido quase exclusivamente por trabalho humano, começou a ser substituído por maquinaria.

No decorrer dos anos a maquinaria foi-se tornando cada vez mais complexa e mais capaz de substituir o trabalho outrora feito manualmente.

Com a proliferação e evolução das tecnologias criou-se uma indústria mais produtiva e eficiente, mas também uma sociedade mais dependente de energia. De modo a sustentar esta rápida evolução foi necessário explorar novas fontes de energia. Essas fontes começaram pelos combustíveis fósseis, existentes em grande quantidade no planeta, fáceis de armazenar e com grande potencial energético. Os derivados do petróleo e o carvão foram, e ainda são, a nossa maior fonte energética.

O agravamento das condições climáticas devido à poluição gerada em grande parte pela exploração de energia proveniente de fontes fósseis, e a previsão do seu esgotamento (não muito distante) fez com que se procurassem novas fontes de energia. Fontes não poluentes e sustentáveis, como são o caso da energia hídrica, eólica, maremotriz, geotérmica e solar.

Em Portugal, e no resto da Europa, actualmente a maior fatia de energia ainda é produzida de fontes fósseis, seguida da hídrica e eólica. Portugal não tendo depósitos naturais de carvão e petróleo tem de recorrer à sua importação, causando um desequilíbrio económico energético. De modo a balancear os custos energéticos e reduzir a dependência das fontes poluentes e não renováveis, tem-se apostado em energias renováveis, nomeadamente na energia fotovoltaica.

	Importação 10 ⁶ €			Exportação 10 ⁶ €			Saldo Importador 10 ⁶ €		
	2009	2010	2011	2009	2010	2011	2009	2010	2011
Energia (total)	6 380	8 228	10 535	1 493	2 667	3 435	4 888	5 561	7 100
	13,0%	15,2%	18,4%	4,7%	7,3%	8,1%	28,5%	31,8%	47,4%

Figura 1 - Custo Importação e Exportação energética em Portugal. Fonte: [1].

A Figura 1 ilustra a dependência e o aumento da importação de produtos energéticos externos nos últimos três anos.

Sendo Portugal um dos países da Europa com maior incidência solar (Figura 2), cobrindo todo o território nacional, faz todo o sentido que a produção de energia a partir do sol seja uma prioridade. Para que seja possível atingir uma independência energética, é preciso que se aposte na sua produção a partir de fontes rentáveis e de grande disponibilidade. Tal como é o caso do sol, uma fonte de energia amplamente disponível e de fornecimento ilimitado.

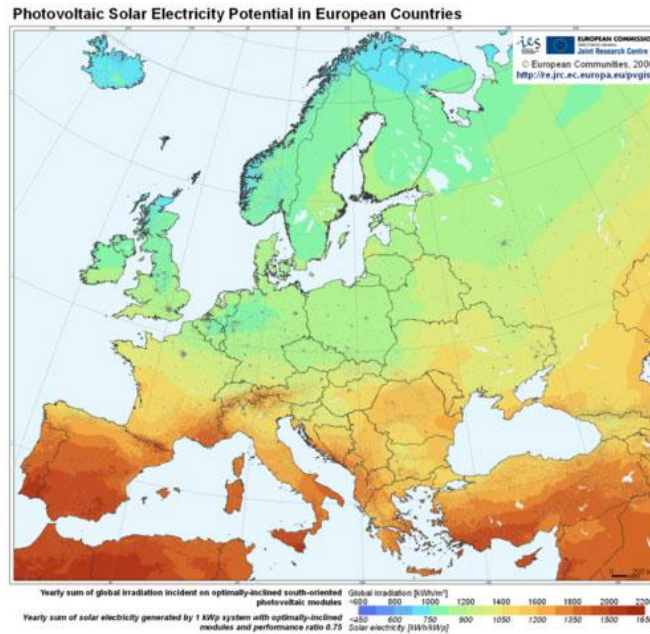


Figura 2 - Mapa solar Europeu. Fonte: [2].

1.1 Contexto

O tema desta dissertação tem por base o estudo de sistemas de microprodução fotovoltaica, estes sistemas produzem energia eléctrica a partir do sol, uma fonte renovável e inesgotável.

Em Portugal a produção de energia fotovoltaica tem origem em centrais solares ou de microprodução, nas primeiras a produção é feita em grande escala recorrendo a campos de painéis solares, torres solares e concentração. Em 2010 a potência total instalada proveniente das duas origens combinadas, rondava os 150MW, prevendo-se um aumento de 10x para 2020, rondando uma potência total instalada de 1500MW [Fonte: [2]]. Do valor de potência total instalado em 2011 cerca de 38,8% da potência tem como origem sistemas de microprodução, no ano seguinte esse valor subiu para 41,1% [Fonte: [3]]. Estes valores mostram um aumento da produção de energia fotovoltaica com base em instalações de microprodução, bem como o peso na potência total.

Como referido anteriormente, Portugal encontra-se numa posição muito favorável à exploração desta fonte de energia, pelo que se prevê uma escalada na potência total instalada. A microgeração permite que pessoas individuais, empresas e condomínios, possam gerar a sua própria energia limpa, cobrindo algum dos gastos energéticos próprios e/ou vender energia para a rede eléctrica. O aumento de instalações de microgeração permitirá às entidades fornecedoras de energia, reduzir custos na produção (reduzindo a importação de energia eléctrica ou minério) e descentralizar a sua produção.

1.2 Descrição do Problema

Os sistemas de microprodução fotovoltaica, tal como todos os que são baseados no efeito fotovoltaico, estão dependentes da luminosidade solar que recebem. Quanto maior a luminosidade recebida maior será a potência produzida.

Ao longo do dia o sol irá movimentar-se, criando variações de luminosidade e ao mesmo tempo variações na potência que o sistema de microprodução consegue debitar. Apesar da movimentação do sol ser o factor mais importante nesta variação, a passagem de nuvens ou outras alterações climáticas também irão afectar a intensidade luminosa, mas de uma maneira mais inconstante.

Como é de esperar, e ao que estamos habituados a observar todos os dias, a luminosidade solar começa a aumentar no início do dia e a reduzir no final deste. Atingindo o seu valor máximo sensivelmente a meio do dia. Esta variação de luminosidade solar que se observa, pode ser representada por uma curva gaussiana (ou curva em forma de sino). Na Figura 3 pode-se observar a evolução da irradiação solar ao longo de um dia.

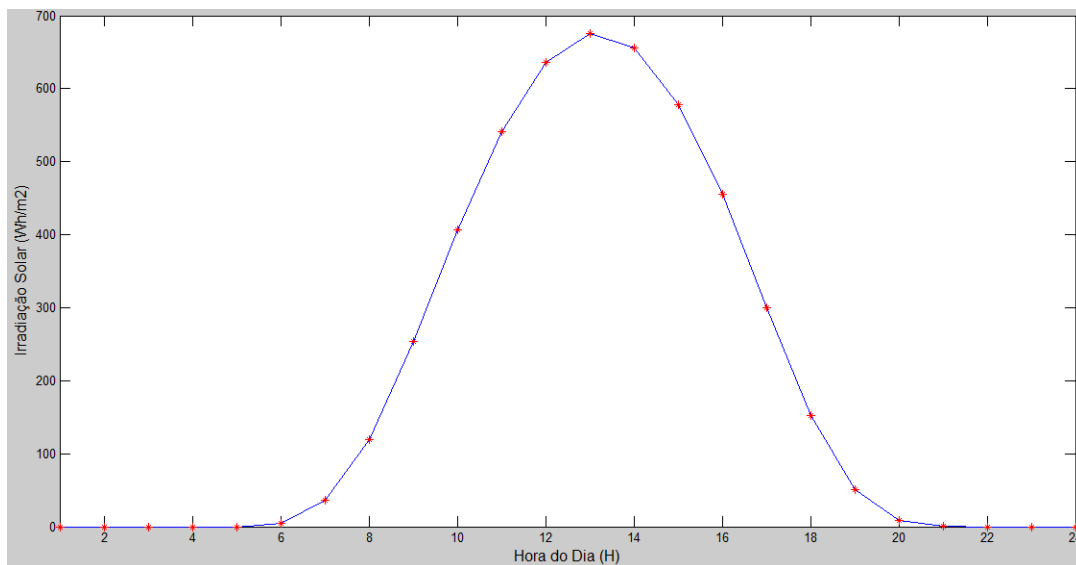


Figura 3 - Variação da luminosidade (irradiação) solar ao longo do dia.

Através do exposto na Figura 3 e conhecendo a dependência de um sistema fotovoltaico da luminosidade solar, pode-se concluir que na fase inicial e final do dia o sistema de microprodução irá apresentar o seu pior valor de produção. Bem como as variações de produção que este irá sofrer ao longo do dia.

1.3 Solução

É o objectivo deste trabalho o estudo e desenvolvimento de uma solução que seja capaz de gerir um sistema de microprodução fotovoltaica, de tal maneira que o sobredimensionamento do sistema não afecte negativamente o inversor da instalação e não sejam excedidos os limites de potência impostos pelo fornecedor de energia. Os sistemas de microprodução fotovoltaica são

controlados pela legislação em vigor, em que uma das limitações é a potência máxima que o microprodutor poderá injectar na rede eléctrica. Um sistema de microprodução fotovoltaica tradicional não poderá fazer proveito do sobredimensionamento, visto que em certas condições de luminosidade solar iria exceder a potência limite. Mas com a aplicação da solução desenvolvida neste trabalho é possível fazer proveito do sobredimensionamento do sistema em condições de baixa luminosidade solar, sem em qualquer situação exceder os limites impostos ou colocar a instalação numa situação perigosa, nomeadamente a sobrecarga do inversor.

De modo a tirar partido do sobredimensionamento do sistema, sem exceder os limites impostos, será desenvolvido um sistema para controlo individual da produção. Este controlo permitirá adicionar ou retirar um determinado número de painéis solares de produção, variando a potência total produzida pela instalação.

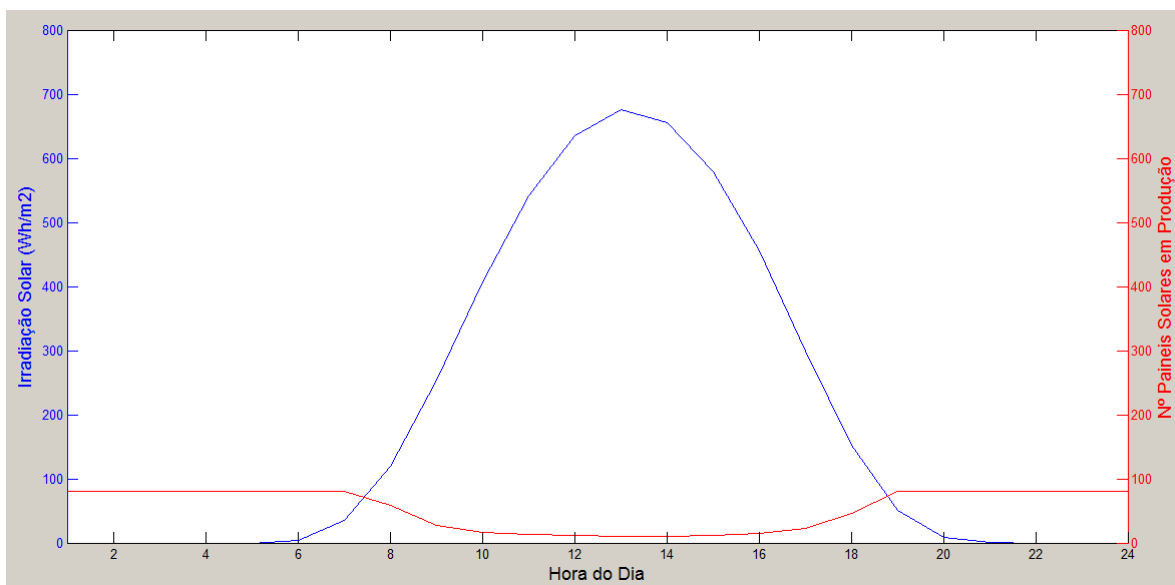


Figura 4 - Ilustração do controlo de painéis ao longo da variação solar de um dia.

Na Figura 4 pode-se observar um gráfico que pretende exemplificar o comportamento da solução de controlo proposta, em que o número de painéis solares em produção (linha vermelha) irá variar consoante as condições de luminosidade ao longo do dia (linha azul). O número de painéis solares é bastante elevado, pelo que se pede ao leitor para interpretar este valor apenas como ilustrativo do funcionamento do sistema de controlo, e não valores de uma situação real.

Como se pode observar no início e fim de dia onde a luminosidade é muito reduzida ou nula, o sistema de controlo introduz todos os painéis na produção, numa tentativa de melhorar o aproveitamento da baixa luminosidade com o número de painéis disponíveis.

Conforme a luminosidade solar aumenta o número de painéis vai reduzindo, a fim de não exceder o limite de potência. O inverso acontece quando a luminosidade começa a reduzir, em que o número de painéis em produção começa a aumentar.

O sistema de controlo ajusta a produção consoante os limites definidos pelo microprodutor e recebe o feedback das suas alterações pela leitura da potência individual e total da instalação fotovoltaica, permitindo um controlo fechado e proporcional do sistema.

No final deste trabalho pretende-se analisar a viabilidade económica desta solução, se o sobredimensionamento do sistema fotovoltaico e o custo que acarreta são cobertos pelo aumento da produção.

1.4 Organização do Documento

Neste capítulo pretende-se dar ao leitor uma ideia geral da disposição do presente trabalho, facilitando a procura de um determinado tema abordado no trabalho.

O capítulo 2 (Estado dos Sistema de Microgeração) apresenta ao leitor informação específica do funcionamento de um sistema de microprodução fotovoltaica, mostrando as várias etapas, equipamentos e tecnologias envolvidas no processo de conversão de energia. Numa fase intermédia é exposta a legislação que incide sobre este tipo de sistemas, tendo sido resumidas as condições mais importantes referenciadas nos diferentes decretos-lei. Este capítulo termina com uma rápida análise das tecnologias existentes até à data, que têm como objectivo o melhoramento do rendimento de uma instalação fotovoltaica. Estas tecnologias tomaram uma abordagem diferente da que se pretende com este trabalho.

O capítulo 3 (Solução Proposta) apresenta o sistema que se pretende desenvolver com este trabalho, apresentando o estudo e análise levados a cabo para os vários constituintes do sistema, bem como as considerações levadas a cabo. No final deste capítulo o leitor terá uma noção bastante concreta do sistema que se pretende implementar, tal como o seu funcionamento e tecnologias envolvidas.

No capítulo 4 (Implementação), e já com a estrutura e funcionamento do sistema conhecidos, é focado o *hardware* constituinte de cada um dos componentes da solução que se propõe. As decisões que levaram à sua escolha e o seu dimensionamento são os tópicos principais deste capítulo.

O capítulo 5 (Análise da Rentabilização do Sistema) expõe os resultados obtidos da simulação efectuada entre um sistema de microprodução fotovoltaica tradicional e o mesmo sistema com a solução proposta neste trabalho implementada.

O capítulo 6 (Conclusões) contém um resumo do presente trabalho, focando melhorias futuras, análise da solução proposta e sua implementação.

2 Estado dos Sistemas de Microgeração

A produção de energia fotovoltaica devido à sua sustentabilidade e disponibilidade tem-se tornado uma fonte de energia importante. Devido a isto, vários estudos têm emergido, com a finalidade de tornar este método de geração de energia mais acessível e eficiente. O objectivo desta tese tem por base a apresentação e estudo de uma nova abordagem no incremento de eficiência de um sistema fotovoltaico.

Para que se entenda a abordagem é necessário perceber o funcionamento de um sistema fotovoltaico e as suas características, bem como uma rápida apresentação das abordagens anteriores levadas a cabo nesta área.

2.1 Sistema de Produção Fotovoltaico

Um sistema de produção fotovoltaico é composto por vários equipamentos necessários à produção e tratamento da energia. Dos sistemas que existem, podem-se distinguir dois grupos. Os sistemas de microprodução ligados à rede e os não ligados à rede. Em termos de equipamentos são ambos muito semelhantes, o que os distingue é o propósito dado à energia produzida. Nos sistemas ligados à rede, a energia produzida é totalmente injectada (vendida) na rede eléctrica, enquanto que os sistemas não ligados à rede normalmente servem para alimentação de cargas, sendo também estas desligadas da rede eléctrica, como por exemplo, motores eléctricos, baterias e iluminação.

No âmbito desta tese apenas os sistemas de microprodução fotovoltaica ligados à rede eléctrica serão sujeitos a análise e apresentação, visto serem os mais pertinentes à compreensão do estudo que se efectuou nesta dissertação. Sendo que a partir daqui os sistemas de microprodução fotovoltaica serão considerados os que se encontram ligados à rede eléctrica.

Um sistema de microprodução fotovoltaico pode ser repartido, de uma maneira geral, em três grupos: a geração de energia, a conversão e as protecções. Na Figura 5 pode-se visualizar os grupos que constituem este tipo de sistemas e como são ligados entre si.

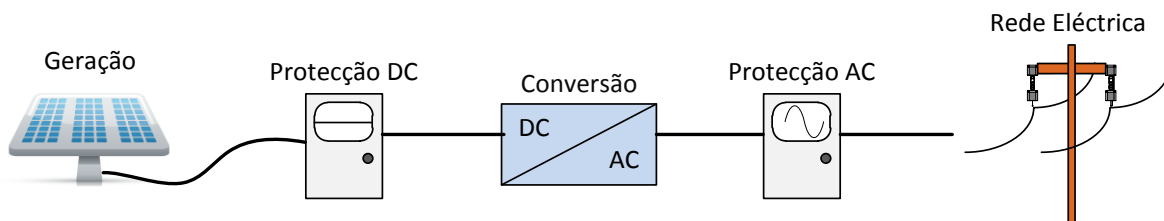


Figura 5- Funcionamento geral de um sistema de produção fotovoltaica.

2.1.1 Geração de Energia

A geração de energia num sistema fotovoltaico é feito através de painéis solares. Cada painel solar é composto por várias células solares, estas são as responsáveis por converter energia luminosa em energia eléctrica. As várias células solares que compõem um painel, são ligadas entre si em série. Isto porque a potência que uma célula solar consegue debitar é muito pequena, daí que são postas em série tantas células, quanto a potência que se pretende atribuir ao painel.

As células solares são fabricadas com materiais semicondutores, como o silício, arsenieto de gálio, disselenieto de cobre e índio, sendo o silício o componente principal. Consoante a sua estrutura cristalina e método de fabrico é possível obter uma variedade de células solares, em que a principal característica de distinção é a sua eficiência de conversão solar em energia eléctrica.

O preço também é uma característica muito importante a ter em conta, aquando do dimensionamento de um sistema fotovoltaico.

Os vários tipos de células solares, podem-se organizar como apresentado no diagrama da Figura 6.

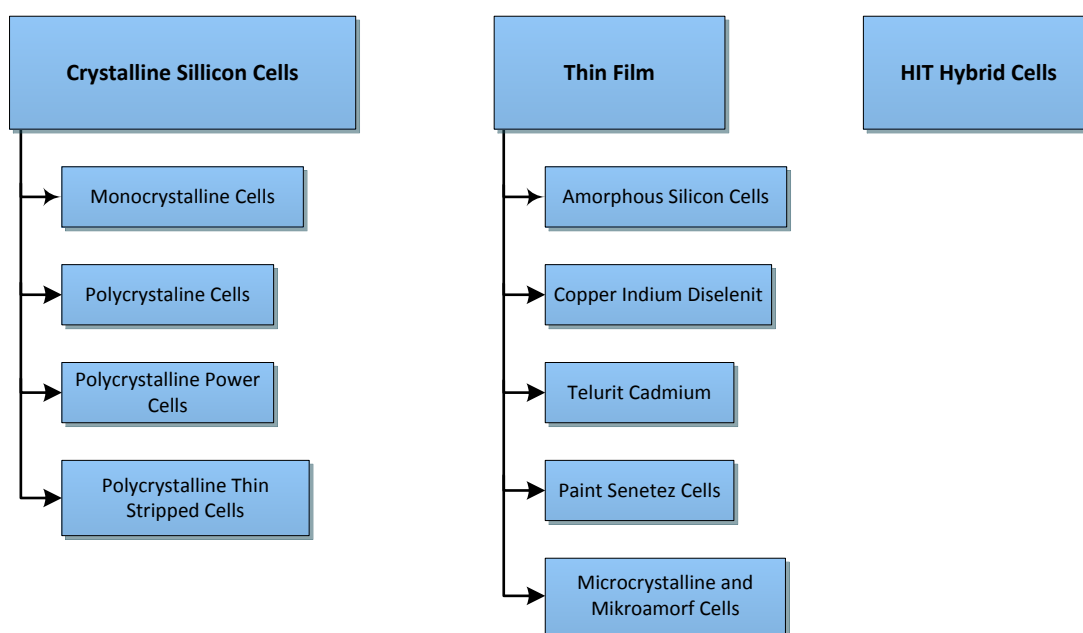


Figura 6 - Organização dos vários tipos de células solares. Fonte: [4].

Dos vários tipos de células solares apresentadas, as mais utilizadas na produção de painéis solares e que apresentam uma maior eficiência são as Monocristalinas, Policristalinas e as Híbridas. A eficiência de conversão solar para cada uma destas células é de 15 a 18%, 13 a 16% e 18.5%, respectivamente.¹

¹ Para maior detalhe no fabrico de células solares consultar anexo 8.1.

2.1.1.1 Funcionamento de uma célula solar

Uma célula solar não é mais que um pedaço de material semiconductor, dopado com impurezas do tipo P e N. Criando uma junção P-N que quando exposta à luz gera uma corrente eléctrica, a este fenómeno dá-se o nome de *efeito fotovoltaico*.

O efeito fotovoltaico consiste na movimentação de electrões no silício, aquando da incidência de luz (fotões). Os átomos de silício numa estrutura cristalina pura são compostos por 4 electrões de valência, estes são os electrões mais afastados do núcleo do átomo e mais facilmente manipuláveis (visto o campo electromagnético do núcleo ser mais fraco). Esta estrutura ao ser dopada positivamente com boro e negativamente com fósforo, faz com que se crie um desequilíbrio de electrões. Porque na estrutura cristalina pura do silício (Figura 7) cada átomo partilha dois electrões com o seu vizinho, mas quando se adiciona a impureza para dopagem positiva, boro (que é constituída por apenas três electrões de valência), cria-se uma lacuna ou a falta de um electrão (Figura 8). No caso da dopagem negativa com fósforo (que contém cinco electrões de valência) é adicionado um electrão em excesso na estrutura cristalina (Figura 9).

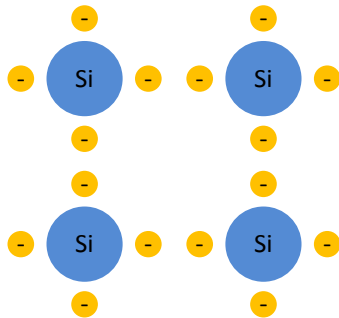


Figura 7 - Estrutura cristalina pura do silício.

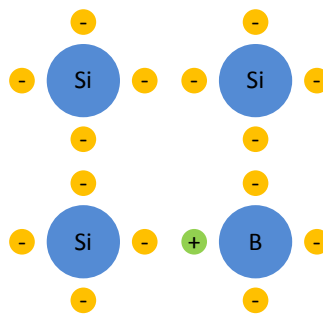


Figura 8 – Estrutura cristalina dopada com boro.

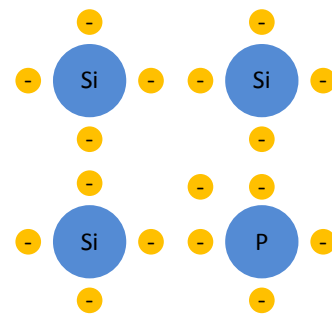


Figura 9 – Estrutura cristalina dopada com fósforo.

Este desequilíbrio só por si não é suficiente para que exista deslocação de electrões, isto porque ao combinar-se a camada dopada positivamente com a dopada negativamente, cria-se uma camada intermédia designada por camada de depleção. Esta camada de depleção foi criada devido à combinação de electrões e lacunas mais próximas, gerando um campo magnético que evita passagem de outros electrões ou lacunas. Desta maneira é impedido que todos os electrões das duas camadas dopadas se equilibrem totalmente (Figura 10), levando a um estado estacionário dos electrões. Este estado é alterado quando a junção P-N é sujeita a fotões, criando novos pares de electrões e lacunas, aumentando o desequilíbrio entre eles (Figura 11). Assim que o circuito eléctrico é fechado, os electrões em excesso irão percorrer o condutor a fim de se anularem com as lacunas em excesso. Quanto maior o número de fotões a incidir sobre a junção, maior será o número de electrões em desequilíbrio. Desta maneira é gerada uma corrente eléctrica, que se define pela movimentação de electrões.

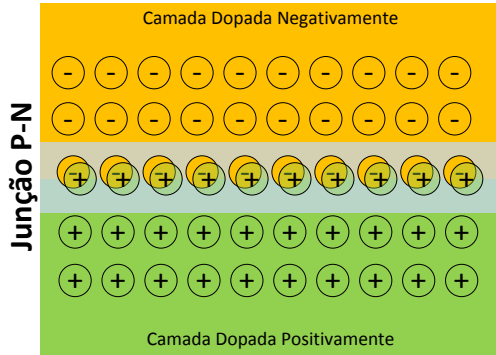


Figura 10 - Junção P-N e criação da barreira de potencial.

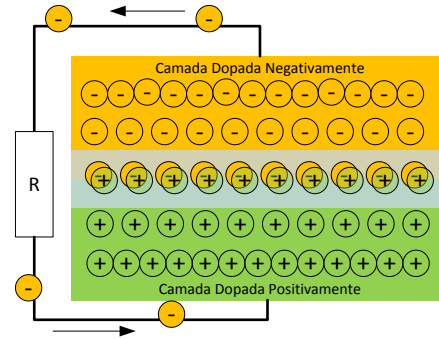


Figura 11 - Movimentação dos electrões em excesso, criando corrente eléctrica numa carga.

2.1.1.2 Características eléctricas de uma célula solar

O comportamento eléctrico da junção P-N de uma célula solar é em tudo semelhante à de um díodo, que apresenta o mesmo tipo de junção.

No díodo é possível ter dois modos de funcionamento, o corte e a condução. Quando está directamente polarizado, potencial positivo aplicado no ânodo (impureza do tipo P) e potencial negativo no cátodo (impureza do tipo N), e após ultrapassar a tensão de limiar, o díodo entra em condução, ou seja, deixa-se atravessar por corrente. Enquanto que polarizado inversamente, potencial positivo no cátodo e potencial negativo no ânodo, o díodo não deixa passar corrente, excepto quando a tensão de rotura é excedida. Na Figura 12 apresenta-se a curva característica do díodo para os dois modos de funcionamento referidos.

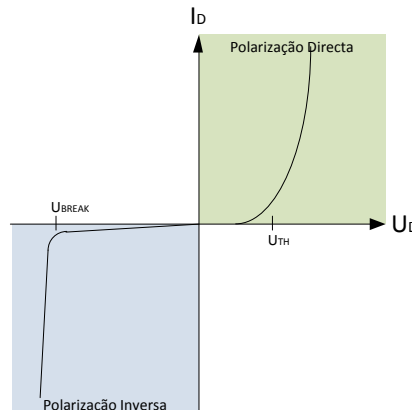


Figura 12 - Curva característica díodo.

Exceder a tensão de rotura é perigoso, pois poderá levar à destruição do díodo. A maior diferença no comportamento entre o díodo e a célula solar, é que o díodo funciona como um receptor de energia e a célula solar como um gerador, o que faz com que o sentido da corrente na célula solar seja oposta ao do díodo. Na Figura 13 está ilustrado os sentidos da corrente.

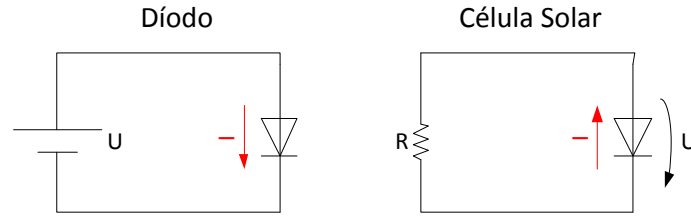


Figura 13 - Sentido da corrente no díodo e na célula solar.

Sendo assim é pertinente referir que ao contrário do que se observa no 1º quadrante, do gráfico da Figura 12, a curva característica da célula solar irá alongar-se no sentido negativo da corrente (eixo das ordenadas) e não no sentido positivo, como acontece com a curva do díodo. Ficando a curva característica da célula solar contida no 4º quadrante, como se apresenta na Figura 14.

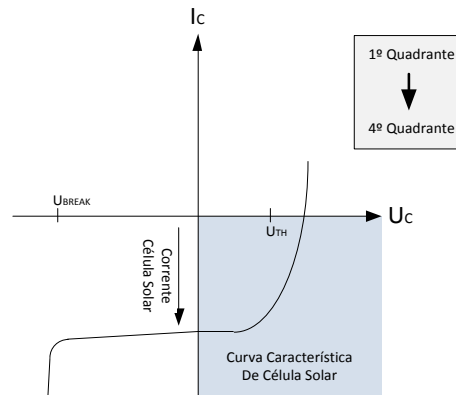


Figura 14 - Evolução gráfica da curva da célula solar.

Tal como foi referido anteriormente, um painel solar é constituído por várias células solares, de modo a obter uma potência considerável por painel. Uma célula solar, dependendo do tipo, gera tensões muito reduzidas nos seus terminais. Para células cristalinas essa tensão ronda os 0,6V. O facto de serem ligadas em série num painel solar é justamente para permitir ao painel gerar uma tensão mais elevada aos seus terminais, visto que em série a tensão total é a soma das tensões individuais de cada célula.

Tal como nos díodos, a tensão que uma célula gera nos seus terminais é, bastante constante ao longo das variações de corrente, o que deixa a corrente como uma variável da célula solar. No díodo a corrente que o atravessa é directamente proporcional à imposta pela fonte de alimentação, mas na célula solar a corrente gerada é directamente proporcional à luminosidade que a célula recebe. O resultado é o apresentado na Figura 15.

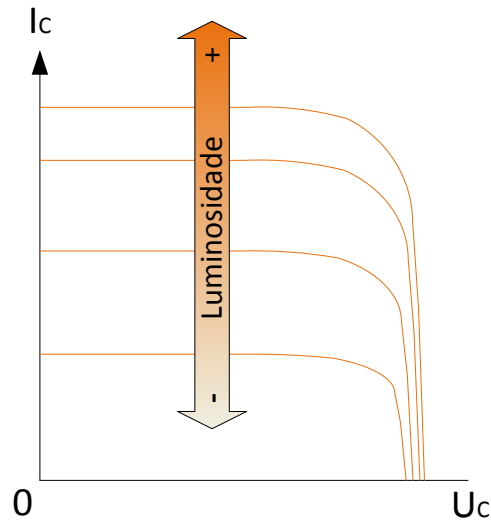


Figura 15 - Curva característica da célula solar com variações de luminosidade.

Como se pode observar, a tensão da célula é bastante constante, ao longo das variações de luminosidade, enquanto a corrente é bastante dependente do valor da luminosidade. Sendo assim pode-se deduzir que a potência que um painel solar produz é em grande parte influenciada pela intensidade luminosa que este recebe.

A curva da Figura 15 é mais conhecida por curva I-V do sistema fotovoltaico, para além de permitir mostrar o efeito que a intensidade luminosa tem sobre um painel solar, é a responsável por indicar a potência máxima que se pode extrair do sistema fotovoltaico a cada instante. Para cálculo da potência máxima que se pode extrair num dado instante (ou numa dada curva), basta calcular a área do maior rectângulo que se consiga encaixar debaixo da curva. Na Figura 16 pode-se ver um exemplo.

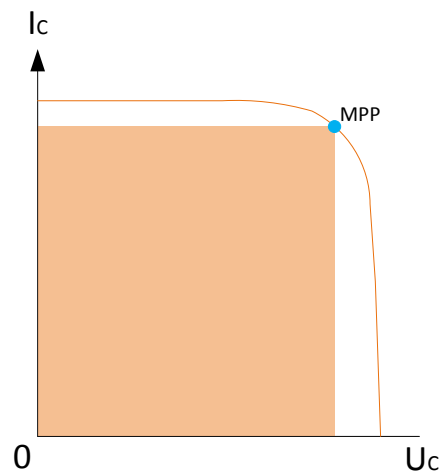


Figura 16 - Máxima potência possível de debitar para uma dada curva I-V.

Como se pode observar no gráfico da Figura 16, a área do rectângulo a laranja claro representa a potência máxima que se pode debitar do sistema fotovoltaico para uma dada situação. A azul está indicado o ponto do rectângulo, onde ambas as suas coordenadas (ordenadas e abcissas) são máximas, logo a área é máxima assim como a potência. A este ponto é dado o nome de MPP, que do inglês significa Maximum Power Point. Mais adiante neste capítulo será abordado novamente este ponto, mais precisamente na parte onde serão abordados os inversores. Porque para aproveitar o máximo de potência gerada, é necessário que o inversor ou carga se adaptem às constantes alterações de produção, procurando sempre o ponto de funcionamento óptimo MPP.

Outra variável que influencia a produção de uma célula solar é a temperatura, quanto maior for a temperatura menor será a corrente que a célula consegue gerar, isto para a mesma luminosidade. A temperatura afecta directamente a eficiência da célula solar. A única maneira de reduzir este efeito parte pela refrigeração das células solares. É possível adoptar medidas de refrigeração naturais, como permitir uma melhor circulação do vento pelos painéis solares, ou então torna-se muito dispendioso e insustentável manter um sistema dedicado de refrigeração. A melhor solução passará pela criação de novos materiais, com as mesmas propriedades do semicondutor usado actualmente nas células solares, mas com melhores propriedades de refrigeração ou com melhores eficiências, reduzindo os desperdícios de conversão em calor.

2.1.1.3 Associação de painéis solares

Numa instalação de microprodução fotovoltaica pretende-se retirar o maior proveito possível do sol, ou por outras palavras, pretende-se produzir o máximo possível de potência dentro de um certo limite de investimento. Para que seja possível produzir uma potência apreciável é necessário ter mais do que um painel solar. Até aqui foi apenas discutido o comportamento e funcionamento de uma célula solar e a sua aplicação num painel. Foi visto que as células solares actualmente (as economicamente viáveis para comercialização) dispõem de rendimentos relativamente baixos, aliando este factor à reduzida potência de uma única célula, é previsível a necessidade de vários painéis solares para produção de uma potência considerável.

Para que seja possível, atingir um determinado nível de potência é necessário fazer associação de painéis solares, quer seja em série, paralelo ou misto. Se os painéis forem associados em série conseguimos uma corrente comum a todos os painéis e a soma das tensões individuais de cada painel. Ao invés, numa associação em paralelo, consegue-se um somatório das correntes produzidas por cada painel, mas a tensão fica reduzida à produzida por apenas um painel. Na associação mista consegue-se o melhor da associação série e paralela, mas ao custo de uma grande quantidade de painéis solares, o que irá encarecer a instalação.

A associação mais comum de encontrar é a associação em série (relembrando que a análise se foca nos sistemas de microprodução ligados à rede eléctrica). Isto deve-se a dois factores, a facilidade de conversão da energia de um potencial superior para um potencial inferior (230V da rede eléctrica) e porque como foi visto no funcionamento das células solares a tensão é

mais estável com as variações de luminosidade. Na Figura 17 encontra-se esquematizado um exemplo de uma associação em série.

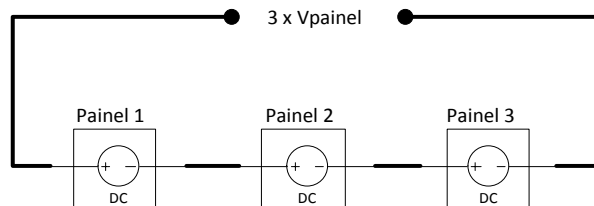


Figura 17 - Associação em série de painéis solares.

2.1.1.4 Sombreamento e díodos de derivação

Anteriormente neste capítulo foi mostrada a relação de proporcionalidade directa entre a luminosidade que uma célula recebe e a corrente que esta produz. Pela definição de corrente, “corrente é um fluxo de electrões que se movimenta numa determinada direcção e sentido”, pode-se deduzir o seguinte: a produção de corrente numa célula é a maior ou menor movimentação de electrões, quanto maior for a luminosidade recebida por uma célula maior será o número de electrões que esta permite movimentar. Atendendo à Figura 18, em que se pode observar uma associação em série de painéis solares, cada um recebendo diferentes valores de luminosidade. Se todos os painéis recebessem a mesma luminosidade, o valor da corrente seria igual em todos os painéis. Mas no caso da Figura 18, qual será o valor da corrente que circula na associação em série?

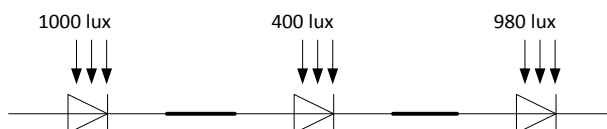


Figura 18 - Associação em série com diferentes luminosidades por painel solar.

Nesta situação o valor da corrente será imposto pelo painel com menor incidência luminosa, porque ao ser sujeito a uma luminosidade inferior permite uma movimentação de electrões inferior à dos outros painéis (aos que estão a receber uma maior incidência luminosa). Isto causa um “estrangulamento” na circulação de electrões, prejudicando a produção geral do sistema. Apesar dos painéis que recebem maior luminosidade terem capacidade para produzir um valor superior de corrente, não o poderão fazer devido ao estrangulamento causado pelo painel com menor incidência luminosa. A este efeito prejudicial, dá-se o nome de *sombreamento*. O *sombreamento* pode ter várias causas na sua origem, como sujidade acumulada na parte frontal do painel solar, sombra causada por uma árvore ou envelhecimento do painel são as causas mais comuns.

A redução de potência produzida não é o único efeito prejudicial que o sombreamento pode trazer ao sistema, se a célula em vez de ter incidência reduzida, ficar totalmente sombreada

o painel não irá produzir nenhuma corrente. Neste caso, o painel deixa de ser um gerador de energia para ser tornar um consumidor (carga eléctrica), isto faz com que o painel se comporte como uma resistência. Ao ser percorrido pela corrente produzida pelos outros painéis vai aquecer, podendo criar pontos quentes no painel. De salientar que ao funcionar como carga eléctrica, a corrente terá sentido oposto (em relação ao sentido da corrente quando está em produção, exemplo da Figura 13) e ficará inversamente polarizado. Os pontos quentes são pequenas manchas que aparecem nas células que constituem um painel, devido a um aquecimento excessivo. Este efeito é mais prejudicial que o sombreamento visto que pode causar danos irreversíveis no painel solar. Relembrar que neste modo (inversamente polarizado, 3º quadrante do gráfico da Figura 12) a célula solar está ao corte, não deixando passar corrente, apenas excedendo os valores de rotura.

De modo a evitar este tipo de problemas (sombreamento e pontos quentes), cada painel solar é equipado com um diódo derivador. Este diódo é instalado em paralelo com o painel. Sempre que um painel ficar com um nível de sombreamento muito elevado, levando a uma polarização inversa, o diódo entra em condução. Fazendo a corrente circular pelo diódo de derivação, libertando aquele painel da produção. Na Figura 19, pode-se observar como os diódos são aplicados nos painéis, e a sua actuação aquando do sombreamento de um dos painéis.

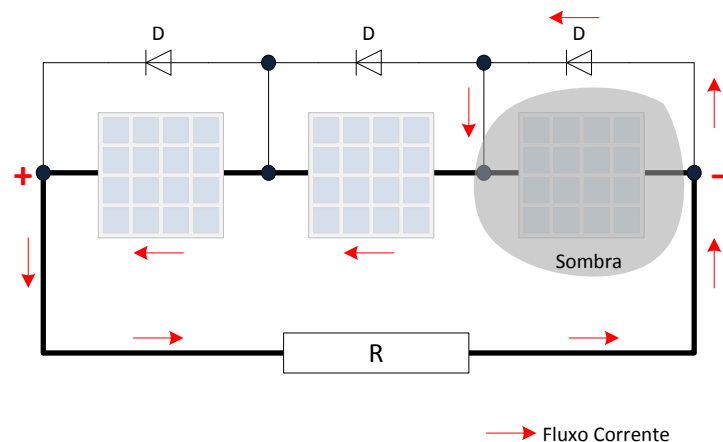


Figura 19 - Exemplo da aplicação e funcionamento dos diódos de derivação.

Neste capítulo foram abordados os conhecimentos necessários na conversão de energia solar em energia eléctrica, num sistema de microprodução fotovoltaico ligado à rede eléctrica.

2.1.2 Conversão de Energia

No caso dos sistemas ligados à rede eléctrica, em que a energia produzida é para injeção na rede, é necessário proceder à conversão da energia proveniente dos sistema de microprodução, nomeadamente os painéis solares. A rede eléctrica funciona com corrente alternada, tendo o valor de 240 volt a tensão nas linhas de distribuição. As linhas de distribuição são as que abastecem as nossas casas directamente, e são nestas onde será injectada a energia proveniente do sistema de microprodução. Os painéis solares apenas produzem corrente

contínua, e a rede só funciona a corrente alternada, de maneira que a energia da microprodução terá de ser convertida em corrente alternada.

Na conversão de energia são utilizados inversores. Os inversores são dispositivos que fazem uso da electrónica de potência para a conversão de energia. Basicamente, convertem DC (corrente contínua) em AC (corrente alternada), mantendo a sua saída em AC no mesmo nível de tensão que a rede onde estão ligados, isto mantendo a sua saída sincronizada tanto em fase como em frequência, com os valores da rede.

Consoante a potência máxima passível de se produzir, pode-se usar inversores monofásicos ou trifásicos. O limiar de potência, que normalmente separa os dois tipos de inversor, é de 5kW. Sendo que para potências $\leq 5\text{kW}$ usam-se os monofásicos e para potências $> 5\text{kW}$ usam-se os trifásicos. Ambos os tipos conseguem fazer uma conversão de energia com elevada eficiência.

Como foi visto anteriormente neste capítulo, um sistema de produção fotovoltaico irá sofrer grandes alterações na produção de acordo com a luminosidade que este recebe (que varia ao longo do dia), nomeadamente a corrente que este consegue gerar. De modo a poder injectar na rede a potência máxima, os inversores são equipados com circuitos capazes de regular a carga no lado DC, isto permite ao inversor adaptar-se às alterações de potência na produção do sistema. Esta adaptação do inversor não é mais que a procura do MPP (Maximum Power Point) do sistema fotovoltaico.

Actualmente os inversores dispõem de mais funcionalidades, do que aquelas estritamente necessárias à conversão da energia. Algumas dessas funcionalidades são listadas abaixo:

- Armazenamento e visualização de dados relativos à conversão de energia;
- Diversidades de alertas ao produtor;
- Protecções contra inversão de polaridade, sobretensão, sobreintensidade e excesso de temperatura.
- Portas de comunicação para monitorização, alerta ou transferência de dados. Exemplos: RS232, RS485, Ethernet.

2.1.2.1 Tipos de Inversor e Funcionamento

Os inversores podem ser classificados em dois tipos, os controlados pela rede eléctrica e os auto-comutados. Os inversores comandados pela rede eléctrica são constituídos por uma ponte H de tiristores ou IGBT's, como se pode ver na Figura 20.

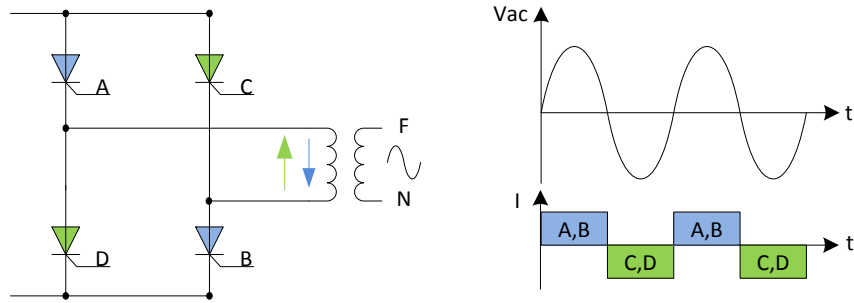


Figura 20 - Inversor controlado pela rede e onda de controlo.

Pelo que se pode observar na Figura 20, através das ondas quadradas de controlo, os tiristores são ligados aos pares, fazendo a corrente circular num sentido e depois no outro. Os tiristores uma vez actuados conseguem conduzir corrente eléctrica, mas não a conseguem cortar. Para que seja possível alternar entre os pares de tiristores, é necessário que um dos pares corte a passagem de corrente antes do próximo par poder conduzir. Este corte dos tiristores é conseguido graças à passagem por zero da corrente do lado da rede eléctrica. Quando o valor da corrente na rede eléctrica se anula os tiristores deixam de passar corrente, entrando automaticamente ao corte. Esta particularidade de controlo foi a origem para o nome destes inversores, inversores controlados pela rede.

Apesar de um controlo relativamente simples, carecem de um problema, sempre que a rede eléctrica estiver em baixo o inversor é incapaz de converter energia. Para além disto, a onda AC gerada por este tipo de inversores é muito diferente da onda sinusoidal da rede eléctrica, isto deve-se ao controlo dos tiristores ser feito com base numa onda quadrada tão discreta. Este facto leva à produção de harmónicos de grau elevado, o que tem de ser compensado com filtros à saída do inversor, afim de não exceder a produção de harmónicos permitidos por lei.

Outro caso são os inversores auto-comutados, estes inversores ao contrário dos anteriores, utilizam elementos electrónicos de potência com a capacidade de controlar o estado de condução e de corte. Como são o caso dos MOSFET's, transístores bipolares e GTO's.

Estes inversores são independentes da rede no que toca ao controlo. Para a geração da onda sinusoidal é utilizado um sinal PWM (pulse width modulation) de elevada frequência e com variação da duração do pulso. Através da criação de "uma média" da tensão na saída, é possível criar uma onda sinusoidal muito semelhante à da rede eléctrica. Desta maneira reduz-se muito a produção de harmónicos em relação ao tipo de inversor anterior, mas em contrapartida o ruído electromagnético produzido aumenta. Na Figura 21 pode-se observar um esquema representativo do funcionamento deste tipo de inversores, bem como o sinal de controlo.

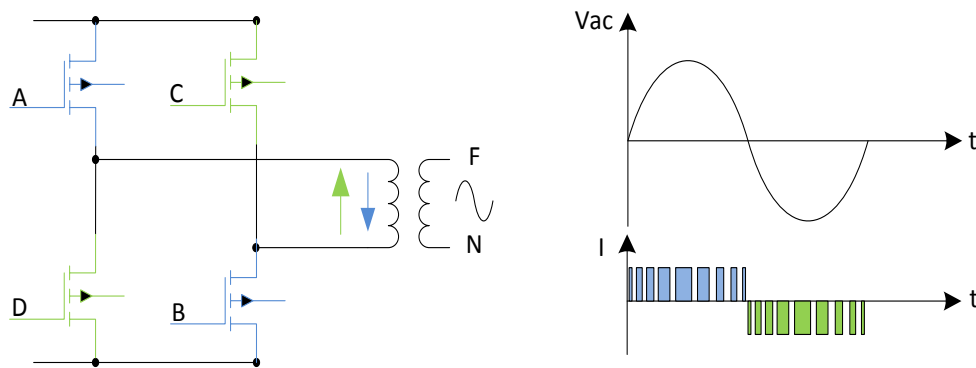


Figura 21 - Inversor autocontrolado e onda de controle.

Este tipo de inversor consegue funcionar tanto em sistemas de microprodução ligados a rede como em sistemas não ligados a rede, sendo que no caso dos primeiros a frequência de comutação do sinal PWM tem de ser sincronizado, de modo a obter uma sincronia com a frequência da rede.

Dos dois tipos de inversores apresentados em cima, podem-se obter duas ramificações, a versão com transformador e a versão sem transformador. Os inversores que disponham de transformador garantem um isolamento galvânico entre o sistema de microprodução fotovoltaico e a rede eléctrica, não sendo necessário tomar precauções adicionais e garantindo uma protecção tanto do sistema de microprodução como dos utilizadores do sistema.

No caso de ser uma versão sem transformador, o inversor será mais barato, leve e compacto. Mas o sistema de microprodução terá de ser sujeito a regras de segurança mais apertadas, como a utilização de um disjuntor diferencial para a detecção de fugas de corrente para a terra. O diferencial terá de ter um dimensionamento adequado, visto que este tipo de conversão de energia gera fugas que poderão ser detectadas pelo diferencial.

2.1.2.2 Características de funcionamento

São várias as características a ter em conta num inversor, mas a que mais se destaca é a sua eficiência. A eficiência define a capacidade do inversor converter a potência de entrada (DC) para a saída (AC), com o mínimo possível de perdas. O inversor tem duas componentes principais, que afectam directamente a sua eficiência, que são:

- Eficiência de conversão de energia;
- Eficiência do sistema de procura da máxima potência (MPP).

2.1.2.3 Eficiência de conversão de energia

A eficiência de conversão de energia é a relação entre a potência de entrada e a sua potência de saída correspondente. A relação é dada pela Equação 1.

$$\eta_{inversor} = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}}$$

Equação 1 – Cálculo da eficiência de conversão.

A eficiência de conversão pode ser afectada por vários factores, dos quais se destacam os seguintes:

- Utilização de transformador para garantir isolamento galvânico;
- Técnica de controlo para a conversão de DC em AC;
- Tecnologia de semicondutor utilizada;
- Auto alimentação.

Os factores apresentados têm impactos negativos na eficiência do inversor, tendem a reduzi-la. A perda de eficiência pelo transformador por ser evitada usando inversores sem transformador, mas acarretando as consequências já expostas anteriormente. Quanto às restantes causas de ineficiência, não podem ser eliminadas, mas podem ser reduzidas com adopção de componentes de melhor qualidade e técnicas de controlo melhoradas como é exemplo o PWM, utilizado nos inversores auto-comutados.

2.1.2.4 Eficiência do sistema de procura da máxima potência (MPP)

De modo a injectar na rede a máxima potência possível é necessário que o sistema de procura do ponto de potência máxima (MPPT) seja capaz de se adaptar às constantes alterações de produção do sistema fotovoltaico. As variações de luminosidade e temperatura a que os painéis solares são sujeitos ao longo do dia vão constantemente alterar o gráfico I-V dos painéis.

Este sistema tem de se aperceber dessas alterações e ajustar-se de modo a usufruir da potência máxima que se pode produzir em cada instante. Dependendo da rapidez de actuação deste sistema é possível, em dias nublados, aproveitar os picos de luminosidade. O desempenho deste sistema vai depender fortemente do algoritmo implementado e da sua capacidade de adaptação.

2.1.2.5 Eficiência estática

Normalmente nos documentos dos fabricantes apenas é apresentada a eficiência nominal do inversor. A eficiência nominal do inversor é calculada a partir de valores de entrada nominais, mas com as alterações de temperatura e luminosidade ao longo do dia os valores reais vão se encontrar longe dos valores nominais. De modo a obter uma melhor caracterização da eficiência de um inversor é calculada a eficiência estática, esta resulta do produto entre a eficiência de conversão e a eficiência do sistema de procura da máxima potência, sendo calculado para diversas situações de carga do inversor. Na Figura 22 pode-se observar a curva que relaciona a eficiência do inversor para as várias situações de carga.

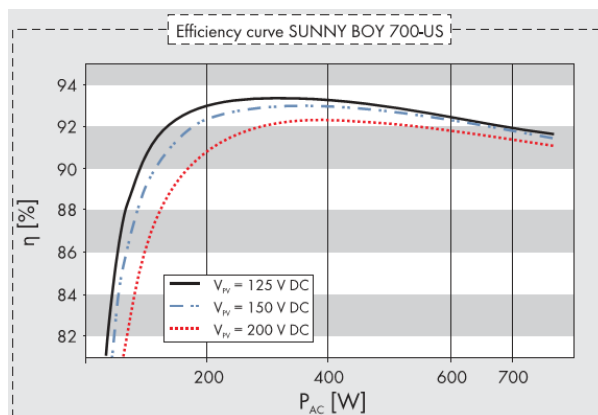


Figura 22 - Gráfico de eficiência do inversor SUNNY BOY de 700W. Fonte: Anexo 8.6.

Pelo gráfico da Figura 22 pode-se verificar que para condições de fraca produção fotovoltaica, a eficiência de conversão do inversor tem tendência a reduzir. O factor temperatura também irá afectar negativamente a eficiência de conversão de um inversor, sendo que alguns inversores vêm equipados com sistemas de ventilação extra a fim de reduzir o efeito da temperatura.

2.1.2.6 Eficiência Euro ou Média pesada

De modo a criar uma base de comparação concreta e o mais realista possível, entre a eficiência de inversores de diferentes fabricantes, foi criada a eficiência euro. Este método de cálculo da eficiência de conversão é baseado em dados de irradiação solar da Europa. Com base nestes dados foram criadas classes de irradiação, às quais foram atribuídas um determinado peso. Este peso varia conforme o tempo anual, em percentagem, que se pode obter um determinado valor de irradiação.

Desta maneira o valor de eficiência euro é mais realista que a eficiência nominal ou máxima. Porque reflecte a eficiência que o inversor terá na maior parte do tempo ao longo do ano.

$$\eta_{euro} = 0.03 \times \eta_{5\%} + 0.06 \times \eta_{10\%} + 0.13 \times \eta_{20\%} + 0.1 \times \eta_{30\%} + 0.48 \times \eta_{50\%} + 0.2 \times \eta_{100\%}$$

Equação 2 - Equação para cálculo da média euro ou média pesada.

Na Equação 2 pode-se observar os pesos atribuídos a cada valor de carga do inversor. Como se pode ver é dado o maior peso, de 48%, a uma carga de inversor de 50%. Isto significa que se obteve uma irradiação tal, capaz de carregar 50% da carga nominal do inversor, durante 48% do tempo anual. Por exemplo, determinou-se dos dados da irradiação solar que o inversor irá estar 20% do tempo à carga nominal. O mesmo raciocínio se aplica aos restantes elementos da equação.

2.1.2.7 Outras características de funcionamento

Na Tabela 1 são apresentadas outras características importantes a ter em conta na escolha de inversor para um determinado sistema de produção fotovoltaico.

Entrada (DC)	Unidades
Potência Máxima	W
Tensão Máxima	V
Tensão Nominal	V
Tensão Mínima	V
Corrente Máxima	A
Saída (AC)	Unidades
Potência Nominal	W
Tensão Nominal	V
Frequência	Hz
Corrente Máxima	A
Parâmetros Inversor	Unidades
Eficiência Máxima	%
Temperatura de Funcionamento	°C
Potência de Consumo em Vazio	W

Tabela 1 - Outras características de funcionamento do inversor.

2.1.3 Protecções

A fim de proteger a integridade do sistema fotovoltaico contra falhas e garantir a segurança de pessoas é necessário dotar a instalação de aparelhos de protecção. No que respeita à aplicação das protecções, pode-se separar o sistema de produção fotovoltaico em duas situações distintas: a situação a montante do inversor, onde a corrente que aqui circula é contínua e a situação a jusante do inversor, aqui a corrente é alternada. Ambos os aparelhos de protecção estarão contidos nos seus quadros eléctricos respectivos, de modo a proteger os equipamentos contra questões ambientais e, mais importante, contra contactos directos. Os quadros eléctricos que se encontrem no interior de edifícios deverão ter um índice de protecção mínimo de IP2X e no exterior de IP44.

2.1.3.1 Protecções DC

Em corrente contínua há três factores a considerar, a protecção dos condutores contra sobreintensidades, protecção contra contactos indirectos e o corte de ligação entre o conjunto de painéis solares e a entrada do inversor. A protecção contra sobreintensidade só é necessária caso a corrente máxima admissível pelos condutores (I_z) seja inferior a 125% da corrente de curto-circuito dos painéis solares instalados. Esta é a situação ideal, pelo que se evita a utilização de aparelhos de protecção extra e se garante um sobredimensionamento da cablagem. Caso seja necessário aparelhos de protecção, devem ser utilizados fusíveis DC dimensionados para o efeito. De modo a proteger a instalação DC de contactos indirectos é necessário que os condutores eléctricos garantam uma tensão mínima de isolamento, esta tensão é dada pela Equação 3.

$$V = V_{\text{circuito aberto}} \times 1,15 \times N_{\text{painéis}}$$

Equação 3 - Tensão mínima de isolamento suportada pelo condutor DC.

Para ser possível o corte da ligação entre os painéis solares e a entrada do inversor é utilizado um interruptor DC, com corrente de corte superior à que o sistema conseguirá produzir em qualquer situação, normalmente superior a corrente de curto-circuito. Este corte de ligação é necessário, e boa prática, visto auxiliar em operações de manutenção ou substituição do inversor, pelo que a potência produzida é cortada a todo o circuito a jusante do interruptor.

2.1.3.2 Protecções AC

No lado AC são precisos levar em conta quatro factores: protecção contra sobrecargas, curto-circuitos, contactos indirectos e seccionamento.

Na protecção contra sobrecargas e curto-circuitos é obrigatória a utilização de um disjuntor. A protecção de sobrecarga é feita pela boa selecção da corrente nominal (I_n) de um disjuntor, a selecção deste valor está dependente das condições da instalação e deve ser consultada a secção 563.3 da Regras Técnicas de Instalações em Baixa Tensão. No que toca ao valor de corte do disjuntor, para situações de curto-circuito, este valor deve ser pedido ao fornecedor de energia.

O disjuntor normalmente é utilizado como seccionador, para cortar a ligação entre a saída do inversor e a rede eléctrica, mas como este é um dispositivo de protecção não deverá ser utilizado como tal, a fim de evitar desgaste no aparelho de protecção. Para seccionamento é boa prática a instalação de um interruptor AC.

Para protecção contra contactos indirectos é possível a instalação de um disjuntor diferencial, este dispositivo detecta fugas de energia para a terra, sempre que o valor da fuga exceder o predefinido o aparelho irá actuar. A sensibilidade do diferencial deverá ser de 300mA ou inferior.

2.2 Microgeração

A microgeração (ou microprodução) define-se como sendo uma produção descentralizada e em pequena quantidade de energia eléctrica, proveniente de fontes renováveis. Pode ser produzida por particulares ou empresas para utilização própria ou injeção na rede eléctrica.

Os equipamentos utilizados são de pequena escala e distinguem-se o painel solar, o colector solar, mini-hídricas e micro eólicas. Sendo os painéis solares e os colectores solares os mais comuns de serem encontrados numa instalação de microprodução.

Os colectores solares são usadas no aquecimento de águas para utilização na habitação ou para alimentação de um motor do tipo stirling, que por sua vez poderá gerar energia eléctrica. Os painéis solares são utilizados fundamentalmente para a geração de energia eléctrica.

Fontes Renováveis (Microprodução)



Figura 23 - Quantidade de energia produzida nas diferentes fontes renováveis. Fonte: [5]

Na Figura 23 pode-se observar, em percentagem, a potência instalada de microgeração para cada um dos tipos de fontes renováveis. Como se pode evidenciar, o sol é a fonte de energia mais comum e também mais aproveitada, comparativamente com as outras fontes de energia.

A potência total instalada, de todas as fontes renováveis da Figura 23, soma-se em cerca de 70,479MW.

2.2.1 Condições de Microprodução

Num sistema de microprodução, em que a sua finalidade é a injeção de energia eléctrica na rede, o produtor está sujeito a um conjunto de regras definido pela DGEG (Direcção Geral de Energia e Geologia). Em que o SRM (Sistema de Registo de Microprodução) fica encarregue de aplicar as regras e controlar a criação de novos sistemas de microprodução.

De modo a controlar o número de microprodutores e a potência que se pode injectar na rede, todos os microprodutores são obrigados a efectuar um registo no SRM. Consoante a disponibilidade de potência o pedido poderá ser aceite ou não. Para o ano de 2012 a DGEG estipulou que poderiam ser aceites novas inscrições até um limite máximo de 13,5MW. O limite de potência é estipulado anualmente e poderá ser reforçado com potência do ano anterior que não tenha sido atribuída.

Caso a inscrição tenha sido aceite, o produtor poderá instalar o sistema de microprodução, sendo este sujeito a uma inspecção de conformidade e atribuição do respectivo certificado de produção, em caso de tudo se encontrar dentro da lei vigente.

O limite no número de sistemas de microprodução independentes é definido pelo número de contractos de fornecimento de energia, ou seja, para que a energia de um sistema de microprodução seja vendida é necessário que o produtor tenha um contrato de compra e venda de energia com um dos fornecedores de energia disponíveis, como é o caso da EDP.

A potência que o produtor poderá injectar (vender) na rede irá depender do estabelecido no contrato com o fornecedor de energia, mas não deve exceder 50% da potência contratada ao fornecedor de energia. Imaginando uma habitação abastecida pela EDP, e que a potência contratada para alimentar a habitação é de 20kW, logo o sistema de microgeração não poderá produzir mais de 10kW. Isto cria uma salvaguarda para o fornecedor de energia, sabendo que o produtor não produzirá mais do que aquilo que pode gastar.

O preço de venda da energia é estabelecido pela DGEG e irá depender de dois factores. O tipo de fonte renovável que é utilizada para a produção e o tarifário que o produtor escolher. São dois os tarifários, o normal e o bonificado. No tarifário normal a energia é vendida ao mesmo preço a que o produtor a compra do seu fornecedor de energia. Enquanto no tarifário bonificado a energia que vende é sobrevalorizada em relação ao preço da energia do tarifário normal. O tarifário bonificado foi criado para permitir ao microprodutor rentabilizar o seu sistema mais rapidamente e incentivar à microprodução.

O tarifário bonificado tem a duração máxima de 15 anos e é dividido em dois períodos. No primeiro período de 8 anos a energia é vendida a 326€/MWh e no segundo período de 7 anos a 185€/MWh. Os valores referidos acima, para o tarifário bonificado, foram estabelecidos pelo despacho da DGEG de 26 de Dezembro de 2011, ainda em vigor. O produtor a qualquer altura poderá decidir prescindir dos benefícios do tarifário bonificado pelo tarifário normal.

A influência, no preço da energia, da fonte renovável utilizada para a microprodução pode ser observado na Tabela 2.

Fonte Renovável	Valor Tarifário
Solar	100%
Eólica	80%
Combinada	70%
Hídrica	40%

Tabela 2 - Influência da fonte renovável no preço de venda da energia. Fonte: [6].

O tarifário bonificado não traz apenas vantagens, para que seja possível usufruir dos preços da energia estipulados neste tarifário é necessário que o produtor cumpra algumas regras adicionais. Neste caso, o produtor não poderá exceder a potência de 3,68kW no caso de um particular e 11,04kW no caso de um condomínio. Sendo também necessário existir pelo menos 2m² de área útil em colectores solar, caldeira de biomassa ou outro sistema que permita produzir a mesma quantidade de calor.

É de referir que sistemas de microprodução com rendimento inferior a 5000€ estão isentos de IVA.

2.3 Tecnologias Actuais

A utilização de sistema de produção fotovoltaica, em ambiente doméstico e de pequena escala (microprodução), tem vindo a ganhar muita adesão (ver Tabela 3). Este facto deve-se aos incentivos aplicados à microprodução de energia por fontes renováveis, sendo a fotovoltaica a mais beneficiada. Para além dos incentivos esta fonte de energia ilimitada, permite a redução de emissões poluentes e ajuda a reduzir despesas energéticas no meio onde se encontra.

Ano	Potência (kW)
2008	1797,06
2009	12387,97
2010	19208,75
2011	29706,93
2012	6871,15*

*Dados relativos apenas aos primeiros meses do ano.

Tabela 3 - Evolução da potência instalada de microprodução em todo o país. Fonte: [5].

Para possibilitar a geração de energia eléctrica com origem solar, é necessário que o produtor adquira os equipamentos indispensáveis à geração de energia. O conjunto destes equipamentos é denominado por sistema de produção fotovoltaico e representam um custo inicial elevado, que aliado ao baixo rendimento de conversão de luminosidade em energia eléctrica, faz com que o retorno de investimento nestes sistemas apenas se verifique passado alguns anos.

Um sistema fotovoltaico, na sua forma mais simples é composto por três equipamentos principais. Os painéis solares, onde estão encapsuladas as células solares responsáveis pelo efeito fotovoltaico, o seguidor MPPT, que permite regular a carga a que os painéis solares estão sujeitos para manter a produção no seu pico máximo, e o inversor, que converte energia DC em AC para injeção na rede ou alimentação de cargas AC. Sendo os painéis solares o componente mais crítico, na medida em que reduz drasticamente a eficiência do sistema de produção fotovoltaico (ver Tabela 4).

Tipo célula solar	Rendimento	Inversor	Rendimento
Monocristalinas	~16%	Dependendo da constituição e método de funcionamento.	Tipicamente superior a 85%.
Policristalinas	~14%		
Híbridas	~18,5%		

Tabela 4 - Rendimento célula solar vs. Rendimento inversor.

Aliando a baixa eficiência de conversão das células solares actuais, e a necessidade de exposição à luz solar para geração de energia, faz com que este componente seja o mais “frágil” do sistema de produção fotovoltaico. O maior problema parte da variação de incidência solar nas células ao longo do dia, a movimentação do sol ao longo do dia altera o ângulo de incidência dos raios solares na célula. Quanto mais este ângulo se afasta da perpendicularidade entre os raios solares e a superfície da célula, menor será a produção desta, devido à maior dispersão luminosa.

Outro factor que influencia a produção é a nebulosidade, na medida em que reduz a quantidade de energia solar que chega até à superfície da terra. De modo a reduzir o efeito destes

problemas, e por sua vez melhorar o desempenho e produção do sistema fotovoltaico, têm-se desenvolvido e aplicado sistemas para colmatar principalmente o problema da movimentação do sol. Estes sistemas normalmente requerem a aplicação de uma estrutura, que permita aos painéis adquirir um determinado número de graus de liberdade. Os sistemas de seguimento solar utilizados são baseados em um ou dois eixos (graus de liberdade).

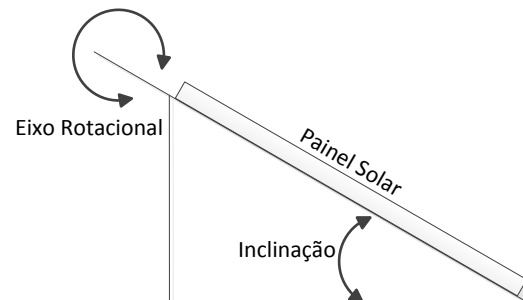
2.3.1 Métodos de Seguimento Solar

Os métodos de seguimento solar visam garantir a maior perpendicularidade possível, entre os raios solares e a superfície do painel solar. A detecção da posição do sol poderá ser feita utilizando métodos distintos, nos subcapítulos seguintes serão apresentados os vários métodos de seguimento solar e os sistemas utilizados para detectar a posição do sol.

2.3.1.1 Seguimento Solar de um Eixo

Um exemplo de um sistema de seguimento solar a um eixo foi estudado e implementado em [7], por fazer uso de apenas um eixo, necessita que o painel solar seja instalado com uma inclinação fixa. Esta inclinação dependerá do local onde o painel está a ser instalado, mas está directamente relacionado com a latitude do local. Após o painel apresentar a devida inclinação, o eixo móvel introduzido (eixo rotacional) por este sistema irá acompanhar o sol, tentando manter os raios solares o mais perpendicular possível com a superfície do painel.

Para determinar a posição e movimentação do sol ao longo do dia, o sistema é constituído por dois sensor luminosos colocados em lados opostos do painel solar (lados perpendiculares à linha do horizonte). Um controlador será encarregue de medir os dois sensores, actuando no eixo móvel sempre que um sensor apresentar maior incidência solar que o outro, o eixo será actuado num determinado sentido (indicado pelos sensores) até que a incidência solar seja igual nos dois sensores. Este sistema foi estudado e implementado num protótipo, onde o autor de [7] refere um ganho compreendido entre 18 e 25% comparativamente com os sistemas fixos.



A utilização de apenas um eixo requer, como foi dito anteriormente, uma inclinação fixa dos painéis solares. Esta solução poderá não apresentar um aproveitamento máximo, visto que o movimento de rotação da terra sobre si mesma é feito num eixo inclinado, o que fará com que a inclinação não seja a ideal ao longo do ano.

2.3.1.2 Seguimento Solar de dois Eixos

Para melhorar o aproveitamento, pela razão referida acima, foi desenvolvida uma evolução do sistema de seguimento solar a um eixo. Em [8] os autores implementaram um sistema de seguimento solar baseado em dois eixos. A utilização de dois eixos garante um posicionamento mais preciso e uma maior liberdade no seguimento do sol, daí não existir a

necessidade de garantir uma determinada inclinação dos painéis solares. Os sistemas de localização da posição do sol são idênticos em ambos, dependendo de sensores de luminosidade. No caso do seguimento a dois eixos é necessário um par extra de sensores para controlo do eixo adicional, nesta situação os sensores são montados na forma de uma pirâmide quadrangular, sempre que a incidência luminosa não for igual nas quatro faces, o sistema procede ao ajuste na direcção determinada pela leitura da pirâmide.

A utilização de sensores de luminosidade comporta um problema, com o passar do tempo o encapsulamento dos sensores irá começar a acumular sujidade e/ou deteriorar-se pela constante incidência solar, levando a medições erradas da incidência solar. Devido a este problema, o seguimento solar poderá não ser efectuado da maneira mais eficiente, reduzindo drasticamente a utilidade/eficácia do sistema de seguimento solar.

2.3.1.3 Seguimento Solar de dois Eixos por Controlo de Potência

O seguimento por procura do ponto de potência máxima, não faz uso dos sensores de luminosidade e logo não apresentando o problema mencionado acima. Neste caso os próprios painéis solares são utilizados como sensores para seguimento do sol, isto é possível porque o sistema de seguimento monitoriza constantemente o sistema MPPT. Consoante as variações de potência detectadas o sistema actua aplicando pequenas movimentações na orientação dos painéis. As movimentações são efectuadas em várias direcções e sentidos, procurando a posição onde é gerada a maior potência. Este sistema de seguimento solar foi proposto no artigo em [9]. O autor concluiu dos testes ao sistema, que este apresenta um erro máximo de 1% na orientação dos painéis em relação à posição do sol.

2.3.1.4 Seguimento solar de dois Eixos por Sistema de Visão

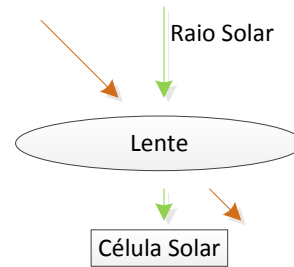
A detecção da posição solar, para direccionamento dos painéis solares, também é possível recorrendo a sistemas de visão. Onde é necessário uma câmara para aquisição de imagem e um sistema capaz de processar essa informação. O sistema proposto por [10], visa a utilização de um sistema de visão para determinar a posição do sol, para alinhamento de painéis solares e colectores solares para aquecimento de água. Para medição da posição do sol a câmara adquire imagens, não do sol, mas de um relógio solar. Através do processamento de imagem é possível retirar o comprimento do pino e da sombra criada, podendo desta maneira calcular os ângulos de inclinação e orientação dos painéis.

2.3.2 Método de Concentração Solar

A concentração solar consiste na utilização de lentes ou espelhos para concentração de raios solares na célula fotovoltaica. A finalidade é o aumento de produção da célula, reduzindo a energia desperdiçada em difusão. Focalizando mais raios solares sobre a célula, irá aumentar o seu rendimento, mas também um aumento na temperatura da célula.

Em [11] o autor refere um aumento de 5.8% de rendimento em células monocristalinas. A concentração de raios solares, como referido, aumenta a temperatura da célula podendo levar à necessidade de instalação de dissipadores.

Este método para aumento da eficiência das células solares, requer a utilização de sistemas de seguimento solar, na medida em que as lentes não conseguiram focalizar os raios solares no centro da célula se estes apresentaram uma grande inclinação em relação à lente. Este efeito é mais significativo em lentes convencionais, sendo que a utilização de lentes de Fresnel reduzirá este efeito. Para que isso seja possível estas lentes apresentam, numa das suas faces uma forma em dente de serra, que permite recolher os raios solares com algum desvio da inclinação ideal, permitindo focalizar os raios solares no centro da célula de uma forma mais permissiva.



Estes sistemas tendem a apresentar grandes dimensões, e a necessidade de auxílio por parte de sistema de seguimento solar. A utilização de sistemas de concentração solar, começaram a ser utilizados nos primeiros satélites artificiais enviados para o espaço.

Apesar do aumento da eficiência que atribui às células, a concentração solar ainda não apresenta um preço e facilidade de implementação em sistemas de microprodução. Mas é um método que merece referência.

2.3.3 Observações

Apesar dos métodos e sistema de melhoramento da eficiência das células solares aqui abordados, estes na maioria das situações não são possíveis de instalar. Em Portugal a maioria das instalações de microprodução fotovoltaica, têm os seus painéis solares instalados nos telhados das habitações ou edifícios, pelo que a utilização de estruturas de seguimento solar nestes locais é proibitiva. O facto de utilizar estruturas para movimentação dos painéis, aumenta o espaço requerido pela instalação para o mesmo número de painéis.

3 Solução Proposta

De modo a efectuar um controlo da produção fotovoltaica, para que se consiga explorar o problema/oportunidade referido no capítulo 1.2 (Descrição do Problema), foi desenvolvido um protótipo funcional para introduzir e retirar painéis solares de produção.

O sistema de controlo é constituído por três blocos importantes, o módulo central, os módulos painel e a rede de comunicação. Na Figura 24 pode-se observar um diagrama de blocos representativo do sistema desenvolvido.

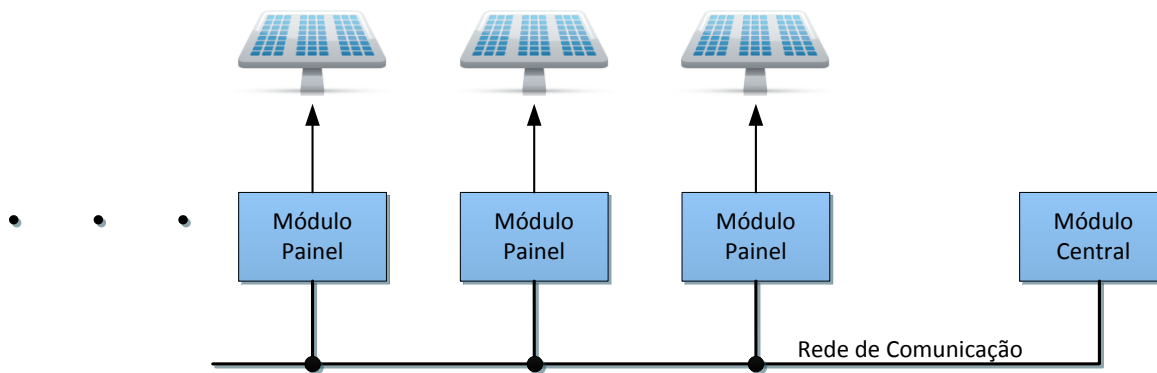


Figura 24 - Constituição geral do sistema de controlo desenvolvido.

O módulo painel é responsável pela leitura dos valores referentes ao painel solar, tensão, corrente e temperatura. Para além de leitura, também será o elemento do sistema capaz de introduzir ou retirar o painel de produção.

O módulo central é o equipamento gestor, que está encarregue de recolher a informação de cada um dos módulos painel disponíveis na rede. Com base nos dados recolhidos e na informação com que foi pré-configurado, irá comandar a actuação ou desactivação de cada um dos módulos painel de modo a otimizar a produção.

A rede de comunicação é uma rede de campo, esta irá conduzir as mensagens de comunicação entre os módulos painel e o módulo central.

De seguida serão apresentados em maior detalhe cada um dos blocos do sistema desenvolvido.

3.1 Módulo Painel

Dos blocos constituintes do sistema, este é o bloco mais complexo do ponto de vista do estudo para a sua concepção. Como foi referido, este bloco terá de efectuar um determinado número de tarefas vitais ao funcionamento deste sistema, as tarefas são expostas de seguida:

- Medição de valores:
 - Leitura da Tensão aos Terminais do Pannel Solar;
 - Leitura da corrente;
 - Leitura da Temperatura.
- Controlo da Produção do Pannel (Adição ou Remoção)
- Unidade de Processamento
- Alimentação do Módulo Pannel
- Comunicação com a Rede

Visto que existe uma grande diversidade no método que se pode aplicar para concluir cada um dos pontos mencionados acima, é possível obter um grande número de combinações para o módulo pannel. Desta maneira serão apresentados em detalhe cada um dos pontos, e as diferentes soluções consideradas, ponderando as vantagens e desvantagens/limitações de cada uma destas soluções.

3.1.1 Medição de Valores

Tal como apresentado anteriormente, é necessário ter acesso ao valor de três importantes grandezas físicas: tensão, corrente e temperatura. Estes valores são os essenciais para que se consiga efectuar um controlo correcto do sistema fotovoltaico, bem como monitorização da produção e do estado dos painéis.

Estas grandezas físicas que se pretendem obter não são mais que sinais analógicos, que variam continuamente ao longo do tempo; para que seja possível digitalizar estes sinais é necessário dispor de uma ADC (Analog to Digital Converter). Só assim é possível representar as grandezas físicas medidas, numa forma que um controlador digital consiga tratar.

Para que se possam fazer medições fiáveis em geral é necessário ter em atenção dois factores, a estabilidade do sistema de medida a factores externos (como por exemplo a temperatura) e imunidade a influências electromagnéticas (comumente chamadas de ruído).

Por vezes para atingir esta estabilidade e imunidade de um circuito é necessário recorrer a componente adicionais, que não estão relacionados com a medição, mas que sem eles o sinal à entrada de uma ADC seria de fraca qualidade. A este tipo de circuito dá-se o nome de acondicionamento de sinal.

É claro que o facto de tornar um sistema de medida robusto trará custos adicionais, cabe ao “bom senso” balancear os custos adicionais com os benefícios que daí se obtêm. Na Figura 25 pode-se observar as várias etapas desde a captura do sinal até à sua leitura pela ADC.

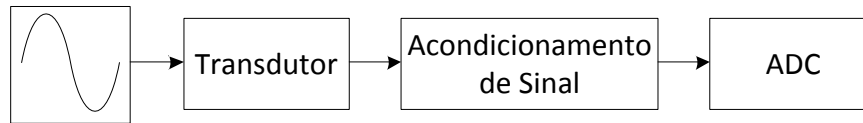


Figura 25 - Configuração geral para acondicionamento de sinal.

3.1.1.1 Leitura da Tensão

Aqui serão apresentadas as possibilidades consideradas para leitura da tensão do painel solar. As possibilidades variam em complexidade, custo e isolamento. O isolamento é um factor importante na decisão de escolha dos vários constituintes do módulo painel, que mais adiante será abordado. Para já a atenção será focada na apresentação das diversas possibilidades.

Na Figura 25 é dado o nome de transdutor ao método de medição da tensão, mas na verdade o que se pretende aqui não é converter uma grandeza física (tensão) noutra, mas sim adaptar o valor da tensão a medir. O valor da tensão que um painel solar pode apresentar aos seus terminais é muito superior ao valor que uma ADC normalmente consegue tolerar à sua entrada, desta maneira é necessário criar uma relação entre o valor da tensão medido e o que se apresenta na entrada da ADC.

3.1.1.1.1 Divisor Resistivo (Sem isolamento)

A maneira mais simples, barata e funcional de implementar uma relação entre a tensão do painel e a tensão que é aplicada na ADC, é usando um divisor resistivo. Desta maneira obtém-se um sistema em que a relação entre a entrada e a saída é linear e que se pode relacionar da seguinte maneira: $Y = X \times R$. Em que X é a tensão aos terminais da ADC, R a relação e Y a tensão do painel.

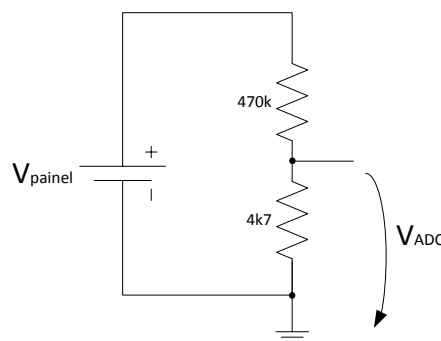


Figura 26 – Divisor Resistivo (Sem isolamento).

No exemplo da Figura 26 está implementada uma relação de 100x, sendo assim se a tensão máxima na entrada da ADC for de 1V, a tensão do painel poderá subir até 100V sem causar estrago na ADC.

Esta solução não proporciona qualquer isolamento entre a tensão de entrada e a tensão de saída, mas apresenta uma elevada linearidade com baixo custo. O factor temperatura poderá afectar a relação do divisor resistivo, levando a erros de medição, o que pode facilmente ser reduzido para valores desprezáveis com a utilização de resistências de baixa tolerância e baixo coeficiente de temperatura.

Nas resistências de montagem superficial é comum encontrar tolerâncias da ordem de $\pm 0.1\%$ e coeficientes de temperatura de $\pm 10\text{ppm}/^\circ\text{C}$. Admitindo uma situação desfavorável, com duas medições a temperaturas diferentes, e com as seguintes considerações:

Condição	Resistência de 470k	Resistência de 4k7
Valor máximo da tolerância.	$R = 470k + 470k \times 0,1\% = 470,47k$	$R = 4k7 - 4k7 \times 0,1\% = 4k695$
Valor máximo da tolerância + incremento de 25°C na temperatura.	$\pm \frac{10\text{ppm}}{^\circ\text{C}} \leftrightarrow \frac{10}{1 \times 10^6} \times 25 = 2,5 \times 10^{-4}$ $\leftrightarrow 2,5 \times 10^{-4} \times 100 = 0.025\%$ $R = 470,47k + 470,47k \times 0.025\% = 470,587k$	$\pm \frac{10\text{ppm}}{^\circ\text{C}} \leftrightarrow \frac{10}{1 \times 10^6} \times 25 = 2,5 \times 10^{-4}$ $\leftrightarrow 2,5 \times 10^{-4} \times 100 = 0.025\%$ $R = 4k695 + 4k693 \times 0.025\% = 4k696$

Tabela 5 - Valores das resistências com aplicação da tolerância e temperatura numa situação desvantajosa.

A Tabela 5 apresenta o valor das resistências da Figura 26 numa situação desfavorável, com o intuito de calcular o erro máximo deste método para medição da tensão. Na segunda linha da tabela é calculado o valor das resistências para a pior situação possível, em que o valor de uma delas reflecte a aplicação da tolerância no extremo positivo, e a outra no extremo negativo. O que faz com que o valor das resistências varie em sentidos opostos. Na terceira linha da tabela é aplicado o factor da variação de temperatura, neste caso o valor das resistências varia no mesmo sentido (positivo), isto porque ambas são afectadas pelo mesmo valor de temperatura.

Condição	Erro da Relação
Valor Nominal	$\frac{470k}{4,7k} = 100 \rightarrow 0\%$
Valor máximo da tolerância.	$\frac{470,47k}{4k695} = 100,2 \rightarrow 0,2\%$
Valor máximo da tolerância + incremento de 25°C na temperatura.	$\frac{470,587k}{4k696} = 100,21 \rightarrow 0,21\%$

Tabela 6 - Erro acumulativo, para as condições desfavoráveis mencionadas.

Na Tabela 6 pode-se observar o erro obtido para cada uma das situações desfavoráveis, sendo que para a situação mais desfavorável se obteve um erro de 0,21%. Isto considerando os limites máximos de tolerância e um incremento de 25°C . Como se pode concluir, este tipo de resistências conseguem boa imunidade às variações de temperatura, por cada aumento de 25°C na temperatura, o erro da relação sobe apenas 0.01%.

3.1.1.1.2 Sistema Resistivo (Com isolamento)

De modo a garantir um isolamento entre a tensão do painel e a tensão à entrada da ADC, tem de se recorrer a isolamento, este poderá ser feito de duas maneiras, apresentadas na Figura 27.

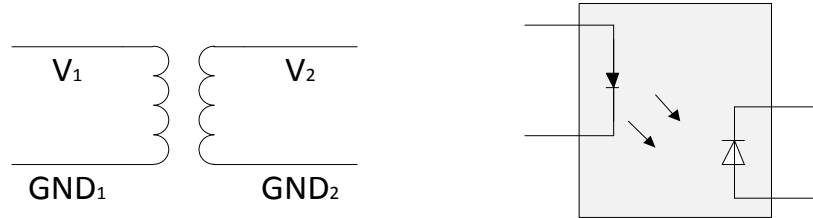


Figura 27 - Exemplos de isolamento galvânico e óptico.

No isolamento mais a esquerda utiliza-se um transformador para garantir o isolamento, a única “ligação” que existe entre o primário e o secundário do transformador são campos magnéticos. Este sistema apenas funciona com corrente alternada, inviabilizando a sua utilização, visto os painéis solares apenas gerarem corrente contínua.

No sistema mais a direita, é utilizado um opto-acoplador para garantir o isolamento, neste caso é possível utilizar corrente alternada ou contínua. Ao contrário do sistema baseado em transformador, não é possível transferir energia pela barreira de isolamento, apenas existe transferência de luz infravermelha. Daí este sistema requerer alimentação (energia) em ambos os lados do isolamento. No caso de apenas se dispor de uma alimentação e querer manter o isolamento, é necessário tomar medidas adicionais.

Na presente situação, e como foi referido anteriormente, os painéis solares apenas geram corrente contínua, pelo que terá de se optar pelo isolamento mais a direita da Figura 27. Neste tipo de opto-acopladores, para se “transmitir” um sinal entre os dois lados do isolamento temos de controlar a corrente que percorre o diodo emissor. Desta maneira regula-se a quantidade de fotões que são emitidos, regulando a corrente que atravessa o diodo receptor. Na Figura 28 pode-se visualizar uma solução baseada neste tipo de isolamento.

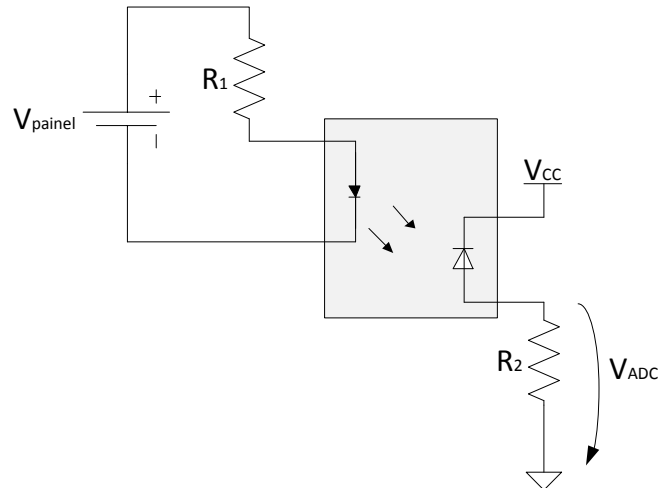


Figura 28 – Sistema Resistivo (Com isolamento).

Tendo em conta o que foi explicado sobre o funcionamento do opto-acoplador, pode-se perceber que quando a tensão aos terminais do painel solar aumentam, a corrente que percorre o díodo emissor também vai aumentar. A relação entre a tensão do painel e a corrente que percorre o díodo emissor pode ser retirada pela lei de Ohm. Admitindo que a tensão máxima do painel é de 60V, que a corrente máxima admissível pelo díodo emissor é de 30mA e a tensão aos terminais do díodo emissor em condução é de 1.25V, podemos calcular a resistência R1.

$$R_1 = \frac{U}{I} = \frac{60 - 1,25}{30 \times 10^{-3}} = 1958 \approx 2000\Omega$$

Com isto obtém-se uma relação linear entre a tensão do painel e a corrente que atravessa o díodo emissor. Para se determinar qual a relação entre a corrente que atravessa o díodo emissor e a que atravessa o díodo receptor, terá de se consultar o datasheet do opto-acoplador em utilização.

É de referir que esta relação ou característica de transferência do opto-acoplador irá variar ao longo da vida útil do mesmo e de variações na temperatura. Esta “dependência” do opto-acoplador certamente irá introduzir erros na medição. Admitindo que a relação de transferência típica deste opto-acoplador é de 0.007, podemos tirar a seguinte equação:

$$I_{receptor} = 0,007 \times I_{emissor}$$

Continuando os cálculos anteriores, e admitindo que a tensão máxima que a ADC poderá ler é de 5V, pode-se calcular R2.

$$I_{receptor} = 0,007 \times 30 \times 10^{-3} = 210\mu A$$

$$R_2 = \frac{V_{ADC}}{I_{receptor}} = \frac{5}{210 \times 10^{-6}} = 23810 \approx 24000\Omega$$

Com os cálculos efectuados é possível atingir o valor máximo da ADC quando a tensão no painel também for máxima. A relação entre os valores de entrada e saída do sistema irá ser bastante linear, excepto para correntes pequenas no LED emissor, onde irá existir alguma não linearidade.

Anteriormente foi referido que este tipo de opto-acoplador, com o tempo de utilização e com a temperatura, vai alterar a sua característica de transferência. Na Figura 29 pode-se observar a variação da característica de transferência com a variação de temperatura e a não linearidade causada por correntes de valor reduzido (inferior a $\approx 10\text{mA}$) no díodo emissor.

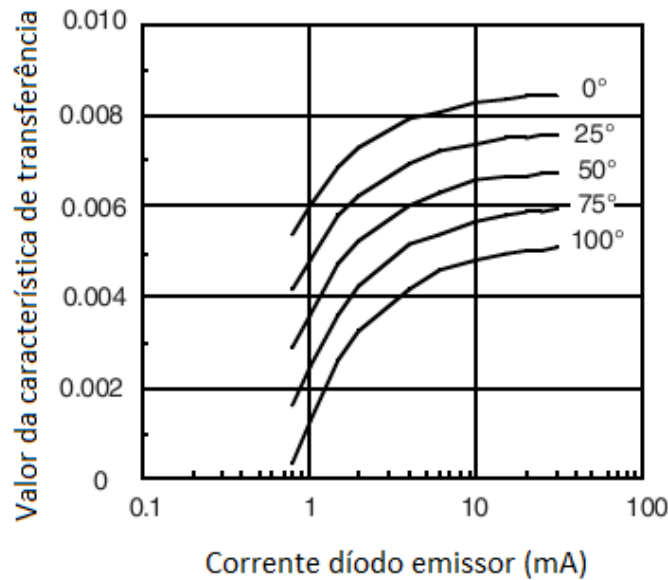


Figura 29 - Exemplo de gráfico relacionando corrente no díodo emissor com característica de transferência. Fonte: [12].

É possível fazer uma pequena demonstração do erro que é introduzido na *Solução Número 2* só pela variação da temperatura. Foi calculado anteriormente para esta solução os valores das resistências tendo em conta que a característica de transferência seria constante (0.007), admitindo isto, ao passar 30mA pelo díodo emissor obter-se-ia 5V á saída do sistema. Admitindo agora que a temperatura subia e que (com base na Figura 29) o valor de transferência variava para 0.0065.

$$I_{receptor} = 0.0065 \times 30 \times 10^{-3} = 195\mu A$$

$$V_{ADC} = R_2 \times I_{receptor} = 23810 \times 195 \times 10^{-6} = 4.643V$$

$$ERRO = \frac{(5-4.643) \times 100}{5} = 7.14\%$$

Como se pode verificar pelos cálculos efectuados acima, uma variação de $\approx 9^{\circ}\text{C}$ causou um erro de 7.14%. Isto admitindo que para correntes no díodo emissor superiores a 10mA, a característica de transferência se mantém constante.

Este método para medição da tensão proporciona isolamento a um custo mais elevado que o divisor resistivo, mas ao custo de um erro significativo com variações de temperatura e envelhecimento do led emissor e receptor de infravermelhos.

3.1.1.1.3 Sistema Resistivo Compensado (Com isolamento)

A fim de reduzir a dependência de factores externos é possível adquirir isolamento óptico baseado em infravermelhos, mas com dois díodos receptores. Um exemplo é o da Figura 30.

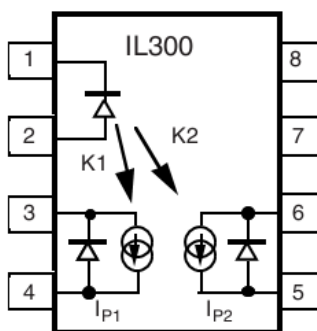


Figura 30 - Opto-Acoplador com dois díodos receptores, modelo IL300 da Vishay. Fonte: [12].

Como se pode observar, K1 e K2 representam a característica de transferência do díodo emissor para cada um dos díodos receptores. Tendo em conta que ambos são construídos na mesma pastilha de silício e que estão protegidos de interferências de infravermelhos provenientes de outras fontes, pode-se considerar que $K1 = K2$. Ou seja, ambos os díodos receptores serão sujeitos à mesma intensidade de luz infra vermelha.

Este tipo de opto-acopladores permitem garantir elevada linearidade de transferência entre o díodo emissor e os receptores, porque é possível utilizar um dos díodos receptores para efectuar correcções na corrente que atravessa o díodo emissor. Desta maneira consegue tornar-se o circuito muito independente das variações de temperatura, envelhecimento do CI e pequenas não linearidades introduzidas pelo díodo emissor em correntes de valor baixo.

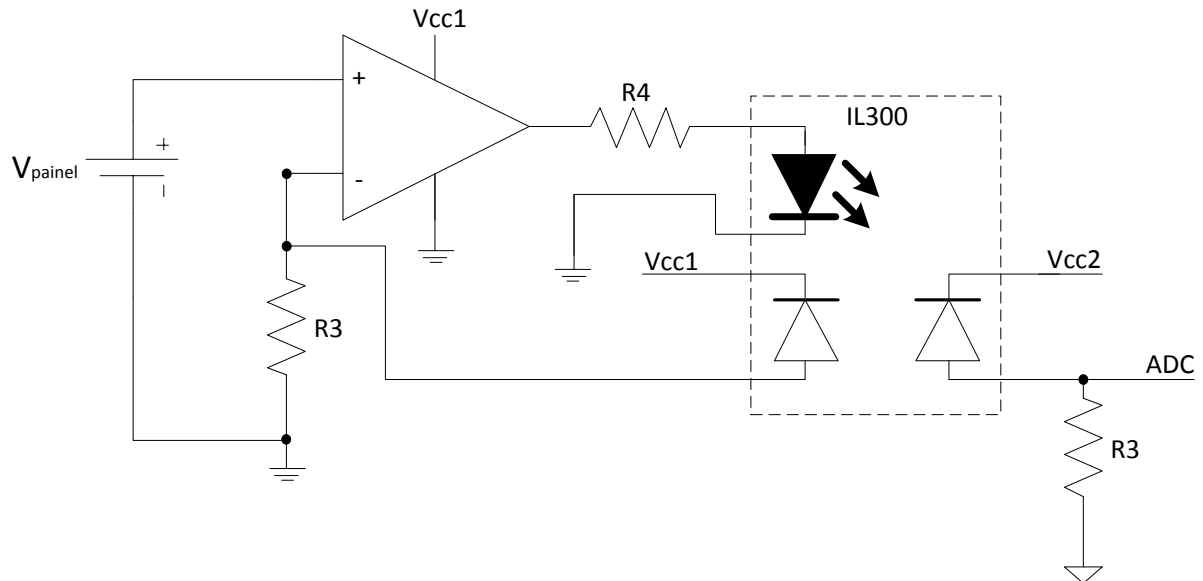


Figura 31 – Sistema Resistivo Compensado (Com isolamento).

Como se pode observar na Figura 31 a complexidade do circuito aumentou, e também o seu custo. Analisando o circuito, pode-se verificar que o amplificador desempenha o papel de “imunizador” do circuito. Através do feedback que o amplificador recebe de um dos díodos receptores, é possível efectuar correcções no díodo emissor.

O amplificador vai tentar manter o valor da tensão, nas suas entradas, igual. Se a tensão do painel for de 3V, o amplificador vai aumentar ou reduzir a tensão na sua saída (variando a corrente que atravessa o díodo emissor), até que o produto da corrente do díodo receptor pela resistência R3 seja igual a 3V. Como já foi dito, ambos os díodos receptores são considerados exactamente iguais, daí pode-se deduzir que a tensão na ADC vai ser sempre igual à tensão na entrada inversora do amplificador e do painel. Devido a esta realimentação através do amplificador, consegue-se corrigir os desvios provenientes dos factores já mencionados.

Para que conste, os cálculos efectuados para o Sistema Resistivo (Com isolamento) continuam a ser válidos para este circuito, apenas com o cálculo extra do valor da resistência R4. Para o cálculo desta resistência é necessário saber a corrente e tensão máxima de saída do amplificador, e também a tensão aos terminais do díodo emissor. Admitindo $I_{max} = 30\text{mA}$, $V_{max} = 5\text{V}$ e $V_{díodo} = 1,25\text{V}$, podemos efectuar o seguinte cálculo:

$$R_4 = \frac{5 - 1,25}{25 \times 10^{-3}} = 150\Omega$$

Poderá levantar-se a questão de se estar a usar 25mA no cálculo, quando se admitiu que a corrente máxima do amplificador era de 30mA. Isto deve-se ao facto, que para ser possível ao amplificador efectuar as correcções este tem de fazer variar a corrente que atravessa o díodo emissor, se no caso, do sistema estar a trabalhar perto do seu limite máximo e de existirem

grandes influências externas, o amplificador poderá já estar a fornecer a corrente máxima ao diodo emissor e mesmo assim os erros não estarem corrigidos por completo. Com este pensamento está-se a admitir uma margem de manobra para o amplificador conseguir efectuar as correcções necessárias, mesmo em situações de grandes variações.

Este tipo de solução, apesar de apresentar uma elevada linearidade, compensação de desvios causados pelo envelhecimento e pela temperatura, e proporcionar isolamento, tem uma fraqueza que não deve ser descuidada. Como se pôde observar na Figura 31, são indicadas duas alimentações separadas (V_{cc1} e V_{cc2}), isto significa que estas duas alimentações são independentes uma da outra. Isto é necessário para que se continue a manter o isolamento entre as duas partes do sistema.

3.1.1.2 *Leitura da corrente*

Aqui serão apresentados os métodos para ler corrente, considerados no estudo. O factor isolamento também terá um factor decisivo na escolha do método a escolher, não descurando o custo. Aqui o nome transdutor dado ao bloco da Figura 25, já faz sentido, visto haver uma conversão de grandezas físicas. Apesar de tanto a grandeza de entrada como de saída serem grandezas eléctricas, a de entrada é corrente eléctrica e a de saída é tensão.

3.1.1.2.1 Resistência Shunt (Sem isolamento)

Este método para medição de corrente é bastante simples e muito linear. Apesar de que por si só não garante isolamento. O funcionamento deste método é baseado na lei de Ohm, daí a linearidade.

Para que se faça a medição é utilizada uma resistência em série com o condutor onde se pretende medir a corrente. O valor da resistência deverá ser de preferência o mais baixo possível, por duas razões:

- Valor baixo de resistência evita a criação de uma diferença de potencial, potencialmente indesejável, aos terminais da resistência.
- Reduz as perdas de energia no sistema de medida, perdas em DC medidas pelo efeito de Joule.

Caso as correntes que se pretendem medir, sejam de valores muito elevados, é preciso levar em consideração um outro factor da resistência shunt, a potencial máxima que esta consegue dissipar. Apesar de na maioria das vezes o seu valor ser da ordem das décimas de $m\Omega$, quando valores elevados de corrente estão presentes, a potência dissipada poderá ser de alguns watts. Como qualquer resistência, o seu valor é alterado pela temperatura, para além das variações de temperaturas causadas externamente é também necessário considerar o auto aquecimento desta.

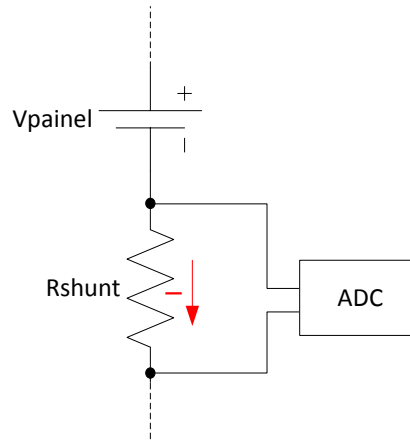


Figura 32 - Resistência Shunt.

Na Figura 32 pode-se observar o circuito para medição da corrente através de uma resistência shunt. Como é possível verificar, a ADC irá amostrar o valor da tensão aos terminais da resistência, sabendo o valor da resistência shunt e pela lei de Ohm é possível retirar o valor da corrente que a atravessa.

Admitindo que a tensão máxima da ADC é de 3,3 volt e que a corrente máxima que o painel poderá gerar é de 1 ampere, pode-se calcular o valor da resistência shunt:

$$R_{shunt} = \frac{3,3}{10} = 0,33\Omega$$

Este seria o valor da resistência de shunt para o circuito apresentado na Figura 32, em que a ADC lê o valor da tensão directamente na resistência. Mas há que levar em conta a dissipação de energia que esta resistência irá causar. Através da lei de Joule pode-se deduzir o seguinte:

$$P = R \times I^2 = 0,33 \times 10^2 = 33W$$

A energia dissipada, e que pertence ao auto aquecimento da resistência, é de 33W. Este elevado valor de energia dissipada, sob a forma de calor, irá afectar o valor da resistência shunt. Para não falar que outros componentes ao redor desta resistência serão afectados negativamente pela geração deste calor. A fim de amenizar este efeito pode-se reduzir o valor da resistência shunt, reduzindo a energia dissipada, mas ao custo de prejudicar as amostragens da ADC, visto não se estar a aproveitar toda a escala desta. Caso o valor da resistência shunt fosse de 10mΩ, pode-se calcular o seguinte:

$$V_{ADC} = R_{shunt} \times I = 0,01 \times 10 = 0,1V$$

$$P = R \times I^2 = 0,01 \times 10^2 = 1W$$

Como se pode observar pelas equações anteriores, a potência dissipada tomou um valor muito mais baixo, assim como o valor que a ADC irá amostrar para a corrente máxima. De modo a

que se possa aproveitar toda a escala da ADC, e evitar desperdiçar a sua resolução, pode-se amplificar o valor da tensão aos terminais da resistência shunt.

$$G = \frac{V_{ADC}}{V_{shunt}} = \frac{3,3}{0,1} = 33$$

Adicionando um amplificador com ganho de 33 é possível aproveitar toda a escala da ADC, podendo esta amostrar os 3,3V para uma corrente de 10A. Na Figura 33 é possível observar um circuito de medição de corrente com resistência shunt e amplificador de sinal.

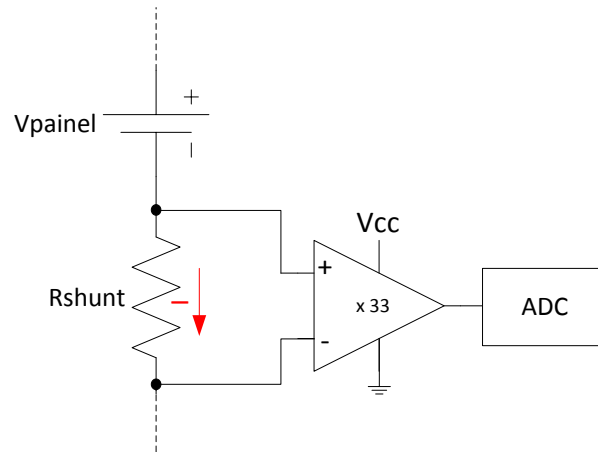


Figura 33 - Resistência shunt com amplificador.

O método para medição de corrente da Figura 33 consegue, tal como o da Figura 32, apresentar uma elevada linearidade, colmatando o excesso de dissipação de energia com um aumento pouco significativo no preço.

3.1.1.2.2 Sensor de Hall (Com isolamento)

A medição de corrente utilizando sensores baseados no efeito de hall, permite a medição de elevados valores de corrente e ao mesmo tempo fornecendo isolamento. O isolamento neste tipo de sensores está sempre presente, pois a medição de corrente é feita pelo sensing do campo magnético, criado pela corrente ao atravessar um condutor eléctrico.

O funcionamento deste sensor está dependente da conjugação de dois efeitos, o já referido efeito de hall e o efeito electromagnético presente num condutor eléctrico. O efeito de hall comprova o aparecimento de uma diferença de potencial, num condutor eléctrico, quando este é sujeito a campos magnéticos externos. Sendo possível medir a intensidade de um campo magnético, quanto maior a intensidade do campo maior a diferença de potencial criada.

Enquanto o efeito electromagnético comprova o inverso, um condutor ao ser percorrido por uma corrente eléctrica irá gerar um campo magnético ao seu redor proporcional ao valor da corrente que o atravessa.

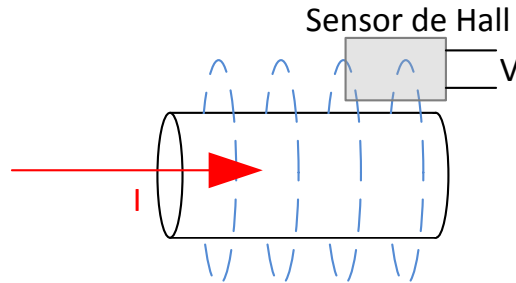


Figura 34 - Efeito electromagnético e efeito de hall.

O sinal proveniente do sensor de hall é caracterizado por ter uma amplitude e potência baixas. O que implica a introdução de amplificadores de modo a obter um sinal mais fácil de tratar, por exemplo por uma ADC. As versões comerciais deste tipo de sensores, já incluem sistemas para melhoramento do sinal de saída e um anel ferromagnético que permite concentrar as linhas do campo magnético, gerado pelo condutor, no sensor de hall.

Os sensores de hall comerciais, para além dos valores de corrente que conseguem ler, podem ser diferenciados pelo tipo de sinal de saída. Existem dois tipos, os sensores com saída em tensão e saída em corrente. A saída em tensão é ideal para interligar directamente numa ADC e quando a distância entre o sensor e a ADC é reduzida. No caso da saída em corrente é preferível o seu uso para medições em que a distância entre o sensor e a ADC é considerável, de modo a evitar as quedas de tensão provocadas pela resistência do condutor que liga o sensor a ADC.

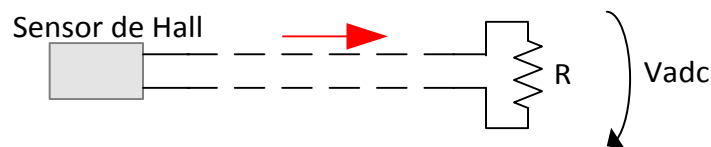


Figura 35 - Medição a grandes distancias com controlo em corrente.

No caso da aplicação deste sensor no módulo painel, seria preferível a utilização do sensor com saída em tensão, tendo em conta que o sensor e a ADC estarão na mesma PCB e logo a alguns centímetros de distância.

A grande vantagem deste tipo de sensor reside na capacidade de proporcionar isolamento, devido à tecnologia utilizada na medição de corrente, capacidade de medir correntes muito elevadas sem causar dissipação de energia e/ou causar auto aquecimento e boa linearidade (não tão boa como a presente na resistência shunt). Mas isto é possível a um custo, o preço destes sensores é mais elevado comparativamente à resistência shunt, apresentam algum erro na medida de correntes baixas e sofrem de desvios no que toca a medição de corrente nula.

Tomando como exemplo o sensor CSLA1CD da Honeywell, pode-se retirar do seu datasheet os seguintes dados:

Tensão de Alimentação (Vcc)	8 a 16V
Medição Máxima de Corrente	57A
Offset	$\pm 1\%$ de Vcc/2
Sensibilidade	$\approx 70\text{mV/A}$ (Vcc=8V), $\approx 140\text{mV/A}$ (Vcc=16V)

Admitindo que o sensor é alimentado a 8V, idealmente este deveria apresentar na sua saída 4V para uma corrente nula. Isto porque normalmente os sensores são capazes de medir corrente nos dois sentidos, quando a corrente atravessa o condutor no sentido positivo a tensão à saída cresce de 4V até 8V e quando no sentido negativo a saída decresce até aos 0V.

Considerando a sensibilidade e o offset pode-se calcular o valor de corrente que poderia ser falsamente medido.

$$4V \times 1\% = 0,04V$$

$$I_{offset} = \frac{0,04}{70\text{mV}} = 0,57A$$

Como este tipo de sensores têm sensibilidades elevadas, exprimem valores elevados de corrente em mV, um pequeno desvio do zero poderá causar medições erradas de corrente. É também de esperar que cada sensor tenha um desvio do zero particular, o que faz com que seja necessário alguma afinação para obter medidas precisas. Como se pode verificar pelas equações acima, um erro de 40mV causa um erro de 0,57A.

3.1.1.3 *Leitura da Temperatura*

Os sensores de temperatura logo à partida já fornecem isolamento, visto que para efectuar as medições de temperatura não é necessário ter qualquer tipo de ligação com os potenciais criados nos painéis solares. Daí não ser necessário a distinção (com isolamento ou sem isolamento) dos vários métodos para medição da temperatura.

3.1.1.3.1 *Termístores*

Os termístores são sensores semicondutores resistivos, que quando submetidos a variações de temperatura, variam o seu valor de resistência. A sua componente semicondutora resistiva é normalmente fabricada em óxidos metálicos, como por exemplo o cobre e o titânio.

São sensores que apresentam uma grande precisão e sensibilidade, são capazes de medir pequenas variações de temperatura. Consoante o termístor é possível obter sensibilidades que variam entre 1°C e $0,05^\circ\text{C}$, sendo os valores intermédios mais comuns. A gama de temperatura dos termístores encontra-se normalmente entre os -90°C e os 140°C , esta gama é onde o termístor apresenta uma maior precisão, sendo possível exceder estes valores à custa da redução de precisão.

Existem dois tipos básicos de termístores, os designados por PTC e NTC. Como foi referido, os termístores são basicamente resistências variáveis com a temperatura, no caso de um PTC o

valor da resistência aumenta com o aumento de temperatura e o NTC reduz o valor de resistência com o aumento da temperatura. Devido a este fenómeno se atribuiu o nome a cada um dos sensores, PTC para *Positive Temperature Coefficient* e NTC para *Negative Temperature Coefficient*.

Na Figura 36 pode-se observar o gráfico referente aos valores de resistência de uma NTC para diversos valores de temperatura.

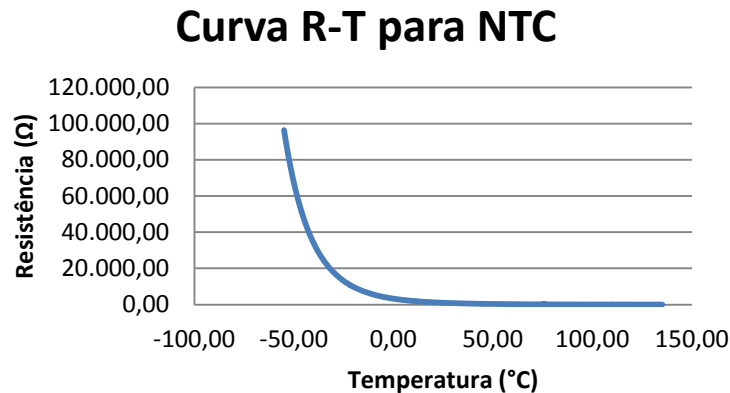


Figura 36 - Gráfico R-T de um NTC.

Ambos os termístores não apresentam um comportamento linear da variação de resistência ao longo da temperatura. De modo a que seja possível corresponder um valor de resistência a uma determinada temperatura é necessário encontrar uma relação, que pode ser na forma de uma tabela ou na forma de uma equação. Por vezes os fabricantes fornecem uma tabela que relaciona a resistência com a temperatura, podendo-se interpolar os valores de modo a obter correspondências R-T para novos intervalos, não fornecidos na tabela.

A outra maneira é através de uma equação, a equação de Steinhart & Hart permite relacionar os valores de resistência e temperatura para qualquer termístor, desde que se saibam os seus coeficientes. A fórmula de Steinhart & Hart é a seguinte:

$$T = \frac{1}{a + b \times \ln(R) + c \times \ln(R)^3}$$

Os coeficientes a, b e c são relativos ao tipo de material de que o termístor é constituído, R é o valor da resistência e T é a temperatura. Através desta equação é possível calcular no momento o valor da temperatura para uma determinada resistência.

Para além da variação de resistência que diferencia uma PTC de uma NTC, existe também o efeito de auto aquecimento. Este efeito é mais significativo na PTC, para além de reforçar com o aumento da temperatura. Já foi visto anteriormente que se pode calcular a energia de auto aquecimento num material resistivo através da lei de Joule. Se a corrente que atravessa uma PTC

for constante e a sua resistência aumentar com a temperatura, então também se está a aumentar a energia dissipada na forma de calor. No caso da NTC este efeito é auto regulado, visto que o aumento de temperatura reduz a resistência, e pela lei de Joule também se reduz a dissipação de energia sobre a forma de calor.

Os termístores só por si não geram nenhum tipo de sinal que possa ser lido por uma ADC, apenas variam a resistência, sendo necessário adicionar outros componentes de modo a conseguir um sinal dependente da resistência do termístor. Na Figura 37 pode-se observar um circuito muito simples para medição da resistência do termístor.

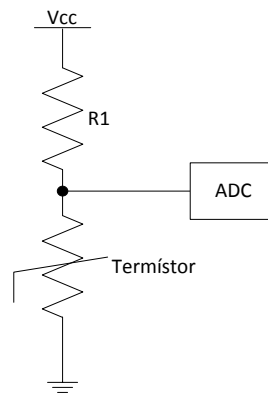


Figura 37 - Circuito simples para medição de termístor.

No circuito apresentado, sabendo o valor fixo de V_{CC} e $R1$, e medindo a tensão através da ADC é possível saber o valor da resistência do termístor pela equação abaixo:

$$U_{ADC} = \frac{R1}{R1 + Termístor} \times V_{CC} \leftrightarrow Termístor = \frac{R1 \times V_{CC}^2 - R1 \times V_{CC} \times U_{ADC}}{V_{CC} \times U_{ADC}}$$

Sabendo o valor da resistência do termístor, ou se consulta uma tabela ou se aplica a equação de Steinhart & Hart.

3.1.1.3.2 TermoResistências

As termoresistências têm um funcionamento muito parecido com os termístores, ambos variam o seu valor de resistência com a temperatura. A diferença reside nos materiais com que são construídos, os termístores são baseados em materiais semicondutores enquanto as termoresistências são baseadas em metais. Para além do material, a linearidade também é bastante diferente. Os termístores apresentam pouca linearidade devido ao comportamento do semicondutor com a temperatura, enquanto as termoresistências apresentam uma elevada linearidade.

As termoresistências metálicas são fabricadas a partir de fios ou fitas de platina, níquel ou tungsténio. As mais utilizadas são as fabricadas com platina ou níquel, são exemplos a Pt-100, Pt-1000, Ni-100 e Ni-1000. No caso da Pt-100, esta termoresistência apresenta o valor de 100Ω a 0°C .

Como já foi referido, as termoresistências apresentam uma elevada linearidade com a temperatura, na Figura 38 pode-se ver a curva R-T da termoresistência Pt-100.

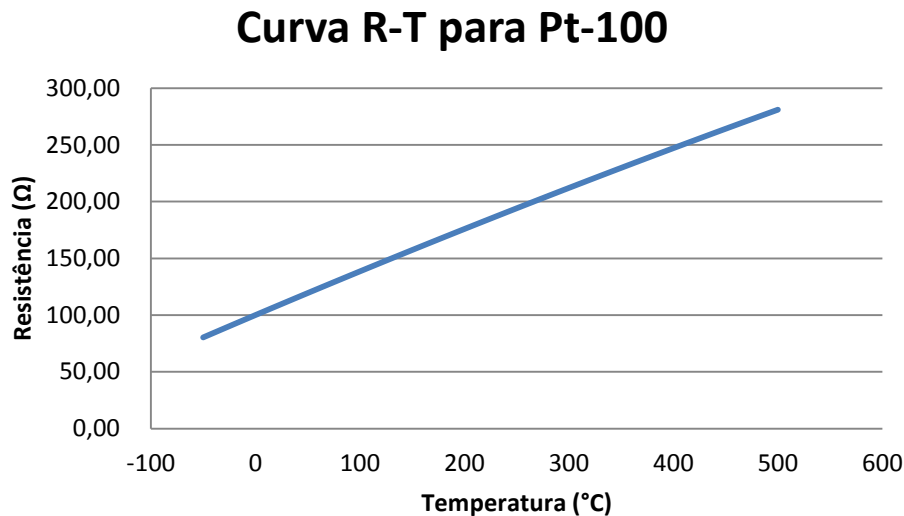


Figura 38 - Curva R-T para Pt-100.

Tal como nos termístores, para além da relação entre a resistência e a temperatura dada por um gráfico é também possível por uma equação. No caso das termoresistências é possível utilizar polinómios de vários graus para obter a relação apresentada no gráfico da Figura 38. Consoante o grau do polinómio utilizado é possível reduzir o erro introduzido pela aproximação do polinómio à curva real do termístor. Na equação em baixo apresenta-se um exemplo genérico do polinómio, em que α varia consoante o material de construção da termoresistência.

$$R = R_0 \times (1 + \alpha_1 \times T + \alpha_2 \times T^2 + \dots + \alpha_n \times T^n)$$

Como as termoresistências apresentam uma relação R-T com elevada linearidade, na maior parte dos casos é possível considerar um polinómio de grau unitário como suficiente, neste caso e admitindo uma termoresistência de platina o valor de α é de $0,38\Omega/^\circ\text{C}$.

A medição da termoresistência pode ser feita, por exemplo, pelo circuito da Figura 39.

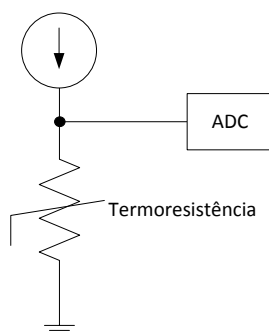


Figura 39 - Circuito simples para medição de termoresistência.

É de referir que as termoresistências também sofrem de auto aquecimento, pelo que é necessário levar em conta o valor da corrente que se faz atravessar pela termoresistência. Valores da ordem de 1 ou 2mA não deverão ser ultrapassados para medição da termoresistência.

3.1.1.3.3 Electrónicos

Os sensores para medição de temperatura electrónicos, são baseados em material semiconductor. O que difere este tipo de sensores, por exemplo dos termístores, é a inclusão de sistemas de acondicionamento de sinal, filtros, linearização e processamento integrados numa pastilha de silício. Isto permite uma maior abstracção da tecnologia de medição em si, e das suas particularidades, permitindo ao utilizador uma maior focalização na componente de programação. E como todos os acondicionamentos e circuitos auxiliares de medição estão totalmente integrados, permite reduzir o espaço ocupado e facilita a sua integração.

Podem ser distinguidos em três tipos mais importantes, que se relaciona com a interface de leitura/comunicação com o sensor.

- Linear analógica, em tensão ou corrente;
- Lógica, nível lógico ou PWM;
- Comunicação série, I2C, SPI, RS232, etc.

A resolução de medição associada a estes sensores, pode ir desde o valor mais grosseiro de 1°C até um valor mais preciso da ordem dos 0,05°C. A gama de temperaturas possível de medir, dentro das condições normais de funcionamento, prende-se principalmente com o facto de serem fabricados em material semiconductor, e que pode ir desde -50°C até 125°C.

Os sensores com saída linear analógica irão necessitar de uma ADC para conversão do valor da tensão. Apesar da saída analógica ser comum a outros tipos de sensores, estes têm a vantagem, de como foi referido anteriormente, de conterem o circuito de linearização, acondicionamento de sinal e filtragem.

Na saída lógica, normalmente é possível programar o sensor de modo a activar uma saída digital em caso da temperatura exceder o valor programado, isto nos sensores com saída de nível lógico. Não permitem medições constantes da temperatura, apenas indicam quando um determinado nível é ultrapassado, tendo uma utilização limitada a casos específicos. Como por exemplo, o controlo de um ventilador para refrigeração forçada na caixa de um computador. Se a

saída for do tipo PWM, então já é possível fazer medições de toda a gama de temperatura, através da medição do duty cycle da onda quadrada de saída do sensor.

Os sensores com as interfaces discutidas até aqui, apenas permitem a sua leitura por ADC ou entrada digital. Se este for dotado de comunicação série, é possível criar uma rede de sensores de temperatura, caso sejam do tipo I2C ou SPI. Com a introdução destes sensores, é possível fazer a medição da temperatura em qualquer instante e sem recorrer a conversões. Isto é possível, porque questionando o sensor através do tipo de comunicação suportado, é devolvida uma resposta, em que o valor da temperatura é representado em binário. No caso do TC74 da Microchip, o valor da temperatura é devolvido num byte, em que o bit mais significativo representa o sinal da temperatura (1 para negativo e 0 para positivo) sendo os restantes bits convertidos para decimal dando o valor da temperatura.

Apesar dos sensores com comunicação série, serem mais pesados do ponto de vista da programação, conseguem libertar muito *hardware* e baixar o custo do sensor.

3.1.2 Controlo da Produção do Painel (Adição ou Remoção)

De modo a que seja possível implementar um controlo individual na produção fotovoltaica, e para que se consiga explorar a ideia exposta em 1.2 (Descrição do Problema), é necessário dotar o módulo painel da capacidade de introduzir ou retirar o painel de produção, ou por outras palavras é preciso que o módulo painel seja capaz de adicionar ou retirar o painel da string a que está ligado.

Tendo em conta que os painéis são ligados em série, é necessário que o sistema de controlo de produção, no caso de remover o painel consiga dar continuidade na string. Caso isso não aconteça, a remoção de um qualquer painel irá parar a produção total. Na Figura 40 está esquematizado o princípio de funcionamento que se pretende para o sistema de controlo da produção do painel. Em caso do interruptor estar na posição nº1, o painel está em série com os restantes painéis da string e a contribuir para a produção total, se o interruptor estiver na posição nº2, então o painel fica em vazio e desligado da string, mas dando continuidade à produção dos restantes painéis.

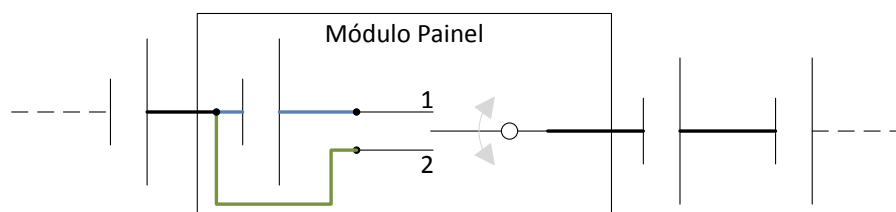


Figura 40 - Ilustração do funcionamento pretendido para o sistema de controlo de produção.

De modo a implementar esta funcionalidade foram consideradas duas abordagens, a utilização de um sistema electromecânico ou electrónico. De seguida serão expostas as duas soluções.

3.1.2.1 *Controlo electromecânico*

O controlo feito por meio de um equipamento electromecânico é conseguido através da utilização de um relé ou contactor. Ambos apresentam o mesmo método de funcionamento, são constituídos por um ou mais contactos que abrem ou fecham consoante é aplicada uma tensão aos terminais da bobine de controlo. A bobine ao ser alimentada cria um campo magnético que atrai os contactos, fazendo alterar o seu estado, quando a bobine deixa de ser alimentada os contactos regressam à posição original.

Podem ser classificados quando ao tipo de contactos e de estado. Um relé ou contactor pode conter apenas um ou dois tipos de contactos, estes podem ser normalmente abertos ou normalmente fechados. Um contacto normalmente aberto/fechado significa que quando a bobine de controlo deixar de ser alimentada, este irá retornar mecanicamente ao estado aberto/fechado.

Quanto ao tipo de estado, podem ser classificados em mono estáveis ou biestáveis. Os mono estáveis apenas conseguem manter um estado (aberto ou fechado) quando a bobine não está a ser alimentada, no caso dos biestáveis é possível obter permanentemente qualquer um dos estados (aberto ou fechado) sem alimentar a bobine. No caso dos biestáveis, o estado a manter é seleccionado pelo sentido da corrente que atravessa a bobine de controlo ou então existem duas bobines de controlo para cada estado.

A grande diferença entre contactores e relés reside na potência que estes conseguem controlar e na sua robustez física e mecânica.

Como se pôde observar na Figura 40, o interruptor utilizado para descrever o funcionamento do controlo de produção, pode ser directamente substituído por um relé ou contactor, ficando a efectuar a função desejada. Os requisitos a levar em conta para a selecção do relé ou contactor são essencialmente dois, a corrente nominal de condução e corte, e a tensão para alimentação da bobine de controlo. No caso da corrente, o relé terá de conseguir conduzir e cortar uma corrente de valor igual ou superior à máxima prevista na string, esta pode ser obtida nas características eléctricas dos painéis solares a utilizar (corrente de curto-circuito). A tensão de alimentação da bobine de controlo, deverá ser seleccionada conforme os níveis de tensão disponíveis no módulo painel e no sistema que irá actuar a bobine. Valores de tensão comuns para alimentação da bobine são, por exemplo, 5V, 9V, 12V, 24V.

Na Tabela 7 são apresentadas outras características adicionais a ter em conta na selecção do relé ou contactor.

Característica	Valor
Actuação da bobine	AC e/ou DC
Potência da bobine	W
Resistência da bobine	Ω
Tensão de activação/desactivação garantida	V
Número de operações	(na ordem dos 10 a 100 milhões de operações)

Tabela 7 - Outras características para selecção do relé ou contactor.

3.1.2.2 Controlo electrónico

O controlo electrónico é conseguido através de componentes semicondutores, como os transístores, MOSFET's ou tiristores. Estes componentes não utilizam partes mecânicas para conduzir ou cortar uma corrente eléctrica, tornando-os mais duradouros e com um número de operações quase infinito. Em contrapartida dissipam grandes valores de energia relativamente aos contactores e relés.

Dos vários componente semicondutores, foi considerada a hipótese de utilização de MOSFET's para o controlo de produção. O que se tornou numa hipótese não viável, sendo a sua inviabilização explicada de seguida.

De modo a compreender o problema encontrado com os MOSFET's é necessário compreender um pouco o seu funcionamento. Os MOSFET's podem trabalhar em três modos distintos, o corte, o tríodo (ou região linear) e a saturação. Estes modos de funcionamento podem ser seleccionados conforme os níveis de tensão aplicados em cada um dos terminais do MOSFET. Este é constituído por três terminais, o dreno a source e a gate, na Figura 41 pode-se visualizar os terminais do MOSFET's na sua configuração de canal P e canal N.

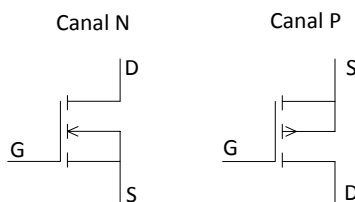


Figura 41 - Simbologia MOSFET.

Na Tabela 8 estão organizados os três diferentes modos de funcionamento do MOSFET, com as equações responsáveis por determinar o respectivo modo de funcionamento.

Modo de funcionamento	Equação
Corte	$V_{GS} < V_{TH}$, V_{TH} é a tensão de threshold do mosfet
Tríodo ou Região Linear	$V_{GS} > V_{TH}$ e $V_{DS} < V_{GS} - V_{TH}$
Saturação	$V_{GS} > V_{TH}$ e $V_{DS} > V_{GS} - V_{TH}$

Tabela 8 - Modos de funcionamento do MOSFET e suas equações.

Para a aplicação pretendida apenas os modos de corte e saturação são necessários, visto que se pretende o corte ou a condução máxima de corrente. Adaptando o esquema da Figura 40 para funcionar com MOSFET's obtém-se o esquema da Figura 42.

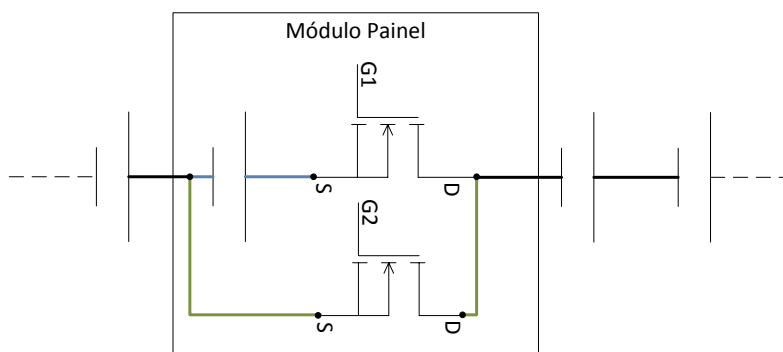


Figura 42 - Controlo de produção por MOSFET.

Atendendo ao MOSFET nº1 e considerando a equação que define o corte, tem de se garantir uma tensão entre a gate e a source inferior à tensão de threshold do MOSFET. O valor da tensão de threshold é indicada pelo fabricante, considerando-se de 2V para este exemplo. Tendo em conta que a tensão entre o dreno e a source é zero (ou muito perto disso), não é possível garantir o valor da tensão de threshold (2V), visto não existir uma diferença de potencial suficiente aos terminais do MOSFET para garantir o seu correcto funcionamento. Ficando o valor da tensão de threshold indefinido.

Foi executada uma simulação no *software* MultiSim da National Instruments e realizada uma pequena montagem em laboratório, de acordo com o circuito da Figura 42 mas considerando apenas o MOSFET nº1. Pelo resultado obtido em ambos, conclui-se que o MOSFET esteve sempre em condução, apesar de se forçar a tensão na gate ao máximo e mínimo disponível no módulo painel. Na montagem em laboratório, foi possível verificar uma pequena variação da corrente quando se passava da saturação para o corte, não sendo possível atingir a condição de corte.

Devido a este problema no controlo do MOSFET e pelo facto de dissipar muita energia na forma de calor, foi preferida a utilização de relés.

3.1.3 Unidade de Processamento

Para que seja possível interligar as várias funcionalidades do módulo painel é preciso dotá-lo de processamento próprio. A adição de processamento ao módulo fará com que este adquira uma certa autonomia, consiga executar rotinas pré-programadas e consiga adaptar-se a alterações.

De um modo geral, a unidade de processamento terá de controlar três importantes blocos. O bloco de instrumentação, onde se encontram os sensores para medida dos valores do painel solar, o bloco de controlo da produção do painel e o bloco de comunicação. Na Figura 43 pode-se observar a interligação entre os vários blocos e a unidade de processamento (CPU).

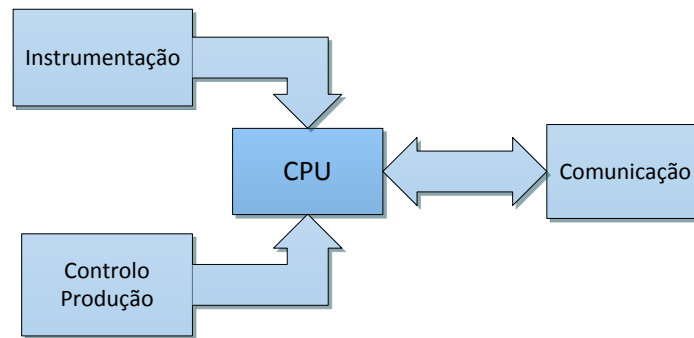


Figura 43 - Interligação de blocos com CPU.

A CPU só por si não consegue interagir com os diferentes blocos do sistema. Por exemplo, uma conversão analógica para digital é impossível de efectuar só com base na CPU, tendo de se recorrer a um periférico para o efeito. Apesar de ser possível adicionar vários periféricos necessários para a interacção entre os diferentes blocos do sistema e a CPU, estar-se-ia a desenvolver uma solução muito complexa e cara.

Para evitar este problema, recorre-se à utilização de microcontroladores. Estes dispositivos não são mais que um CPU e um conjunto de periféricos montados num único componente electrónico. Consoante o fabricante e a aplicação é possível escolher entre uma vasta gama de microcontroladores, as grandes diferenças residem nos periféricos embutidos, na memória RAM, Flash e CPU.

Na selecção do microcontrolador foi dada maior importância aos periféricos embutidos, de modo a que estes consigam suprimir as necessidades do módulo painel. Pelo que foi apresentado até aqui, o microcontrolador terá de incluir os seguintes periféricos:

- ADC (para aquisição dos valores analógicos de tensão e corrente);
- SPI/I2C (para aquisição do valor digital da temperatura);
- I/O digitais (para controlo da produção);
- RS232 (para comunicação com a rede).

Dada a diversificação dos microcontroladores, é possível eleger vários candidatos com a selecção de periféricos mencionados acima. Dessas várias possibilidades o PIC18F26J50 da Microchip é um dos candidatos. Na Tabela 9 são apresentados alguns dos periféricos e características deste microcontrolador.

Periféricos	Quantidade
ADC	10 Canais, 10-bits de resolução
SPI/I2C	2 Periféricos
RS232	2 Periféricos
I/O digitais	>20
Temporizadores	5
WatchDog Timer	1
Memória/CPU	Capacidade
RAM	3,8KBytes
Flash	64KBytes
Frequência da CPU	31kHz - 48MHz
Características	Limites
Tensão de Funcionamento	2 - 3,6V
Temperatura de Funcionamento	-40 - 85°C

Tabela 9 - Características adicionais do PIC18F26J50. Fonte: [13].

Este microcontrolador é capaz de fornecer não só os periféricos necessários, como também memória suficiente para alojar o programa (Flash) e as suas variáveis (RAM). A velocidade da CPU é variável, o que permite adaptar os consumos de energia do microcontrolador a várias situações.

3.1.4 Alimentação do Módulo

Qualquer que seja o método de medição de tensão, corrente, temperatura, controlo de produção e microcontrolador é preciso fornecer energia aos componentes envolvidos. A energia terá de ser tratada de acordo com as necessidades de cada um dos componentes.

Duas soluções foram propostas para fornecer energia aos módulos painel, cada uma delas com as suas particularidades a levar em conta. As soluções de alimentação para o módulo painel são as seguintes:

1. A partir da energia gerada pelo próprio painel;
2. Através de uma fonte externa;
3. Através de uma fonte externa com isolamento nas comunicações

Mais uma vez e como em situações anteriores, o isolamento não será explicado para já mas continua a ser um factor importante na tomada de decisões. Por agora serão apresentadas em maior detalhe as duas soluções de alimentação do módulo painel, levando em conta que terá de existir isolamento entre o potencial da energia produzida pelos painéis e o módulo central.

3.1.4.1 Alimentação pelo Painel Solar

Esta solução permite alimentar o módulo painel a partir do painel solar onde está acoplado, evitando a necessidade de utilizar uma fonte de energia externa, que na situação mais desfavorável teria de suportar o consumo máximo de todos os módulos painel. Mas aparece a necessidade de tratar a energia proveniente do painel, os níveis de tensão produzidos pelo painel, para além de variarem ao longo do dia são muito elevados para o tipo de electrónica em causa. A

Figura 44 ilustra os vários blocos constituintes do módulo painel, alimentados com a energia provenientes do painel. O bloco laranja onde se lê “Alimentação”, apesar de não detalhado representa onde a energia proveniente do painel é normalizada de acordo com os limites dos componentes.

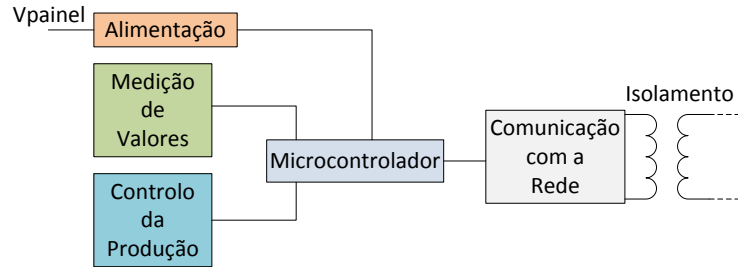


Figura 44 - Constituição geral do módulo painel, com alimentação proveniente do painel solar.

Como se pode ver (Figura 44) o isolamento teve de ser garantido no bloco das comunicações, entre o módulo painel e o módulo central, dando a possibilidade de se alimentarem os restantes blocos pelo painel solar. Sendo assim poder-se-ia utilizar os métodos de medição e controlo abordado nos capítulos 3.1.1 (Medição de Valores) e 3.1.2 (Controlo da Produção do Painel (Adição ou Remoção)) que não forneçam isolamento.

3.1.4.2 Alimentação por Fonte Externa

No caso de a alimentação ser efectuada por uma fonte externa, capaz de alimentar todos os módulos painel, ter-se-ia de dimensionar um condutor capaz de transportar a potência necessária para todos os módulos, levando também em conta as quedas de tensão criadas pelo comprimento do condutor.

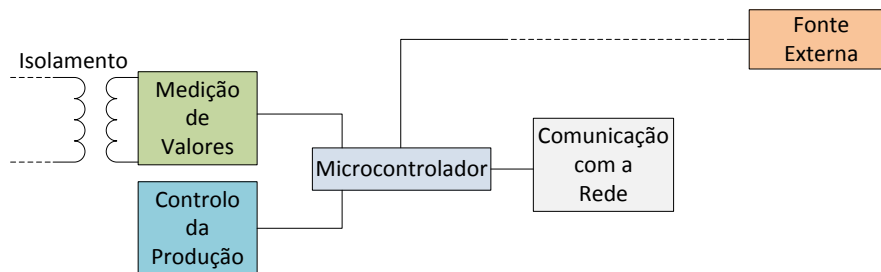


Figura 45 - Constituintes do módulo painel, alimentados por uma fonte externa.

A Figura 45 ilustra os vários componentes do módulo painel alimentados por uma fonte externa, indicada pelo bloco laranja onde se lê “Fonte Externa”. Nesta situação o isolamento teve de se colocar a cargo dos blocos de “Medição de Valores” e “Controlo de Produção”, levando a adoptar os métodos de medição e controlo abordados em 3.1.1 (Medição de Valores) e 3.1.2 (Controlo da Produção do Painel (Adição ou Remoção)) que fossem dotados de isolamento.

3.1.4.3 Alimentação por Fonte Isolada

Utilizando este tipo de alimentação é possível utilizar o isolamento nas comunicações, (como é feito em 3.1.4.1 - Alimentação pelo Painel Solar) mas fornecendo a energia por uma fonte externa (como se apresenta em 3.1.4.2 - Alimentação por Fonte Externa).

Para conseguir esta variante de alimentação do módulo painel, é necessário recorrer a fontes isoladas. As fontes isoladas aqui referidas são conversores DC/DC que utilizam transformadores para conseguir isolamento e transferência de energia ao mesmo tempo. Estes equipamentos recebem energia DC na entrada, que internamente é convertida em AC e introduzida no transformador, gerando energia DC na saída, obtida pela rectificação à saída do transformador. Na Figura 46 pode-se visualizar o esquema de blocos da fonte isolada aqui referida.

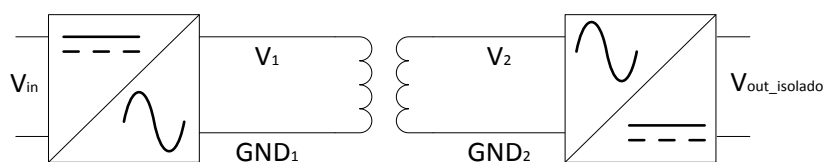


Figura 46 - Diagrama de blocos fonte isolada.

Utilizando este método de alimentação dos módulos painéis é necessário utilizar uma fonte isolada por módulo. A Figura 47 ilustra os vários blocos do módulo painel utilizando alimentação por fonte isolada.

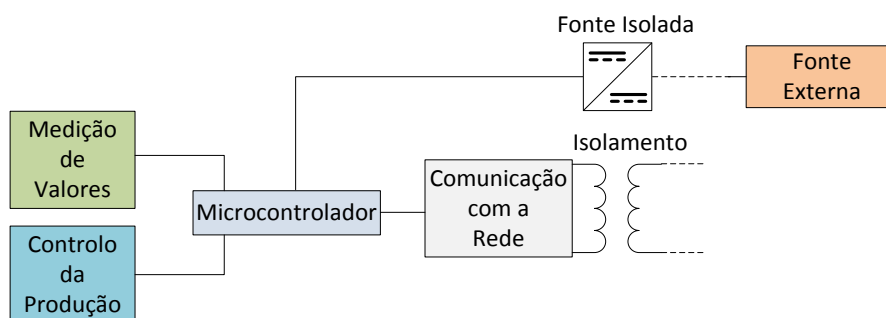


Figura 47 - Constituintes do módulo painel, alimentado por fonte isolada.

Com este método de alimentação é possível continuar com o isolamento no bloco das comunicações e alimentar o módulo painel a partir de uma fonte externa, mantendo sempre o isolamento.

3.1.5 Comunicação com a Rede

A necessidade de comunicação dos módulos através de uma rede de dados levanta algumas considerações adicionais, que serão ditadas pela constituição do módulo painel. Ou seja, pela selecção de métodos de leitura e controlo seleccionados. No subcapítulo 3.1.4 (Alimentação do Módulo), nomeadamente na secção onde se apresenta a possibilidade de alimentar o módulo painel a partir do painel solar, verifica-se a utilização de isolamento no bloco das comunicações.

Neste subcapítulo pretende-se apresentar as considerações levadas em conta para o bloco das comunicações, não sendo aqui discutidos detalhes sobre protocolos, tecnologias de rede, etc.

Na maioria das vezes para que o microcontrolador consiga comunicar com a rede de dados, não basta conter os periféricos necessários, outros factores como níveis de tensão, polaridades, número de canais, tipo de rede, tipo de sinal (ex.: eléctricos ou radiofrequência), não são possíveis de alcançar só com o microcontrolador e o periférico.

Para tornar possível essa comunicação são utilizados *transcievers*, estes englobam em apenas um pacote todos os componentes extra, necessários à comunicação com uma determinada rede. Reduzindo o número de componentes necessários à interface entre o microcontrolador e um determinado tipo de rede. Estes componentes podem simplesmente converter um tipo de comunicação noutra (SPI/Zigbee), ou manter o mesmo tipo de comunicação mas adaptando, por exemplo, os níveis de tensão. A conversão entre diferentes tipos de comunicação poderá levar à inclusão de outras funcionalidades no transciever, como endereço MAC (para transcievers Ethernet), protocolos de acesso ao meio (por exemplo, CSMA/CD para Zigbee) e algoritmos de encriptação. Estas funcionalidades extra estão também embutidas no pacote do transciever, deixando a cargo deste algum do processamento necessário requerido por uma determinada rede, libertando o microcontrolador dessas funções.

Alguns transciever são apresentados na Tabela 10 com uma descrição sucinta das suas características.

Transciever/Fabricante	Descrição
MRF24J40 - Microchip	Transciever wireless com suporte para ZigBee. Comunicação entre microcontrolador e transciever através de SPI. Comunicação entre transcievers através de radiofrequência (2,4GHz). Suporta encriptação, CSMA/CD, RSSI, etc.
ADM2484E – Analog Devices	Transciever RS485. Comunicação entre transciever e microcontrolador através de porta série RS232. Comunicação entre transcievers por RS485. Oferece isolamento entre a comunicação RS232 e a RS485.
ADM234L – Analog Devices	Transciever RS232. Efectua conversão de sinal CMOS/TTL em níveis de tensão normalizados RS232.

Tabela 10 - Exemplos de transcievers.

Levando novamente em consideração a utilização de isolamento, apenas dois dos transcievers apresentados são candidatos a utilizar no bloco de comunicações, na situação de alimentação do módulo painel a partir do próprio painel solar. O primeiro transciever (MRF24J40) já oferece o isolamento por fazer uso de uma comunicação de radiofrequência, o que elimina a utilização de materiais condutores e assim a necessidade de isolamento. No segundo transciever

(ADM2484E), são utilizados condutores eléctricos, mas é criada uma barreira de isolamento entre as duas metades do transceiver.

3.1.6 Soluções Propostas

Como foi referido, é possível obter diferentes variantes do módulo painel, consoante os sistemas de medição e actuação seleccionados. Foi também referido que o factor isolamento seria importante na selecção de uma das várias variantes do módulo painel. Aqui será explicado a necessidade de se considerar o isolamento como um factor importante, as várias soluções propostas para o módulo painel e qual a solução implementada no protótipo.

A existência de um módulo painel por painel solar, e a necessidade de medir e controlar esse mesmo painel, cria no módulo uma dependência do potencial existente aos terminais desse painel solar. Uma vez que todos os módulos são interligados por uma rede de comunicação, cria-se um caminho perigoso que interliga módulos referenciados a potenciais diferentes. Isto causa o aparecimento de tensões perigosas nas comunicações bem como passagem de correntes que destruirão a rede e/ou módulos conectados na rede.

Como se pode observar pela Figura 48, a dependência dos módulos painel do referencial criado aos terminais de cada painel solar, faz com que o nível de tensão introduzido na rede de comunicação seja tão elevado quanto a tensão produzida em série pelos painéis solares. Sendo assim o valor de tensão na rede terá o valor correspondente da soma de V_1 com V_2 , sendo a tensão na rede imposta pelo módulo referenciado ao potencial mais elevado.

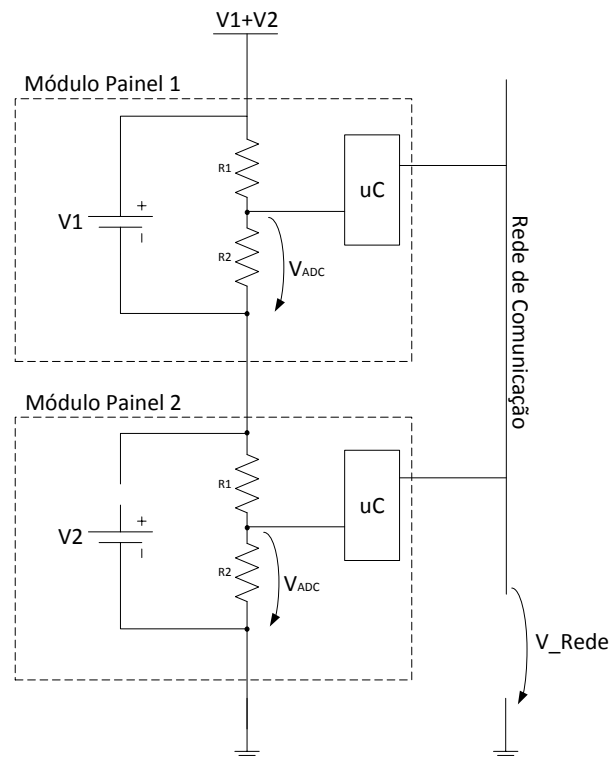


Figura 48 - Criação de referenciais perigosos.

Para evitar esta situação foi necessário recorrer-se ao isolamento, quer seja este efectuado nas comunicações, medições ou ambos. A explicação que leva à utilização de isolamento nos módulos painéis só agora foi exposta, com o intuito de facilitar a apresentação das diferentes hipóteses consideradas para a medição, controlo, alimentação e comunicação.

Agora que os vários métodos foram apresentados e exposta a necessidade de utilizar isolamento, pode-se apresentar as várias combinações levadas em conta para o módulo painel. Na Tabela 11 estão as várias combinações consideradas para o módulo painel, indicando qual ou quais os métodos utilizados em cada um dos blocos do módulo.

	Leitura da Tensão	Leitura da Corrente	Leitura da Temperatura	Controlo da Produção	Alimentação	Comunicação
Nº 1	Sistema Resistivo ou Sistema Resistivo Compensado	Sensor de Hall	Electrónicos	Controlo Electromecânico	Alimentação por Fonte Externa	Transceiver não Isolado.
Nº 2	Divisor Resistivo	Resistência Shunt	Electrónicos	Controlo Electromecânico	Alimentação pelo Painel Solar	Transceiver Isolado (Wireless).
Nº 3	Divisor Resistivo	Resistência Shunt	Electrónicos	Controlo Electromecânico	Alimentação pelo Painel Solar	Transceiver Isolado.
Nº 4	Divisor Resistivo	Resistência Shunt	Electrónicos	Controlo Electromecânico	Alimentação por Fonte Isolada	Transceiver Isolado

Tabela 11 – Soluções propostas para o módulo painel.

Como se pôde observar nas diferentes variações do módulo painel, o isolamento ou é garantido no método de leitura da tensão e corrente, ou na alimentação e comunicações. Este facto prendeu-se com o aumento de preço do módulo painel, caso o isolamento fosse utilizado nas medições e nas comunicações simultaneamente.

Comum a todas as variantes do módulo painel, encontra-se a medição da temperatura e o controlo de produção. De todos os métodos para medição da temperatura o electrónico destaca-se pela sua simplicidade e abstracção do *hardware* necessário para efectuar as medições de temperatura. Tendo em conta que o microcontrolador seleccionado suporta comunicação SPI/I2C, é fácil interligar um sensor de temperatura electrónico com o mesmo tipo de comunicação. Assim elimina-se a necessidade de calibração e linearização do sensor, ficando estas a cargo do sensor, restando ao microcontrolador fazer a leitura da temperatura na forma de uma palavra binária.

Em relação à utilização do controlo de produção electromecânico, este foi escolhido devido a inviabilização do controlo electrónico nesta situação. Adicionalmente o relé providencia isolamento e não dissipa energia na forma de calor. Com os relés electromecânicos no auge do seu

desenvolvimento, o número de operações e o tempo de vida já são bastante elevados, apresentando o relé como uma hipótese fiável.

As restantes componentes (Leitura da Tensão, Leitura da Corrente, Alimentação e Comunicação) diferem entre as variantes propostas para o módulo painel, o factor custo apresentará um grande peso na sua escolha.

À partida é possível prever um custo mais elevado aplicando isolamento nas medições do que nas comunicações. Isto porque nas comunicações basta utilizar apenas um transceiver isolado, ao invés nas medições é necessário aplicar isolamento na medição da tensão e na medição da corrente. O preço terá tendência a subir por ter de se tratar duas componentes em separado (tensão e corrente).

Para a medição de tensão, o método do Divisor Resistivo (Sem isolamento) não proporciona isolamento, mas apresenta uma elevada linearidade e um preço extremamente baixo ($\leq 0,15\text{€}$). No caso do Sistema Resistivo (Com isolamento) é proporcionado isolamento, ao custo da perda de linearidade, apresentado um custo superior ao do método do Divisor Resistivo (Sem isolamento). Isto porque para garantir o isolamento é necessário utilizar um opto acoplador ($\geq 0,9\text{€}$). Finalmente, o Sistema Resistivo Compensado (Com isolamento) tal como o anterior oferece isolamento mas elimina por completo a perda de linearidade. É necessário recorrer a um opto acoplador linear e a um comparador, o que torna este sistema o mais caro dos três apresentados ($\geq 8\text{€}$).

Na medição da corrente acontece o mesmo que na medição da tensão, a utilização de uma resistência shunt e de um amplificador, apresentam uma elevada linearidade a um preço reduzido ($\geq 0,80\text{€}$). Enquanto a utilização de um sensor de hall garante isolamento e linearidade, mas fá-lo a um preço bem mais elevado ($\geq 10\text{€}$).

A selecção do método para alimentação do módulo painel, irá ficar dependente da variante escolhida, devido a dependências relativas aos métodos de medição e comunicação, sendo definido após a escolha da variante dos módulos painel.

Nas comunicações podem-se considerar três tipos de isolamento, transceiver sem isolamento, transceiver com isolamento, e transceiver *wireless*. Sendo este último o mais dispendioso e complexo de implementar do ponto de vista de programação. Consoante a tecnologia de comunicação, os transceivers irão variar bem como o seu preço. Para existir uma base de comparação, define-se a tecnologia de comunicação RS485 para comparação do preço dos transceivers. Um transceiver RS485 sem isolamento apresenta o custo mais baixo dos três ($\geq 3\text{€}$), enquanto o transceiver RS485 com isolamento apresenta o preço intermédio ($\geq 6\text{€}$) e finalmente o transceiver *wireless* apresenta o preço mais elevado ($\geq 11\text{€}$).

Os diferentes métodos de medição e comunicação foram analisados, principalmente com base no seu custo. Consoante a base de preços apresentada ao longo da descrição, pode-se verificar que ao utilizar isolamento nas comunicações (com o transceiver isolado, de preço

intermédio) é possível utilizar os métodos de medição sem isolamento e de preço mais reduzido. Em suma, o balanço do preço geral do módulo é bastante reduzido pela utilização de um transceiver mais caro, mas em contrapartida utilizam-se os métodos de medição mais baratos.

As variantes que encaixam na descrição são as N^o3 e N^o4, em que a diferença entre elas reside no método de alimentação.

O protótipo fabricado para testes é baseado na solução N^o3, com o acréscimo de uma fonte isolada. Dando a possibilidade de alterar o método de alimentação do módulo, ou pelo painel solar ou por uma fonte externa. Criando uma junção entre a variante N^o3 e a N^o4, sendo o resto inalterável.

O protótipo fabricado foi baseado nas considerações até aqui expostas. Foi testado apenas em laboratório, estando ainda pendente o seu teste numa instalação solar fotovoltaica real. O estudo e concepção do protótipo é apenas metade do desenvolvimento, sendo os testes em campo e consequentes alterações a outra metade necessária para se fechar o ciclo de desenvolvimento.

3.1.7 Funcionamento

O módulo painel em termos de comunicação apresenta um comportamento passivo, não iniciando qualquer tipo de comunicação. Este módulo escuta continuamente a rede à espera de uma comunicação iniciada pelo módulo central, e que se destine ao módulo painel em causa.

A principal funcionalidade deste módulo é efectuar constantemente medições sobre o estado do painel solar ao qual está acoplado. Essas medições são guardadas localmente no módulo painel, sendo apenas o valor mais recente acessível.

Os valores das medições serão enviados para o módulo central assim que este os requisitar. No que toca ao controlo de produção do painel, o módulo irá executar os comandos emitidos pelo módulo central, adicionando ou retirando da produção o painel solar, consoante o comando.

Como foi dito o módulo painel tem um comportamento passivo, mas existem duas situações em que pode assumir um comportamento activo, não em relação às comunicações mas no que toca ao controlo de produção. Para evitar um pico de tensão no inversor, caso a instalação fique em vazio, é necessário uma actuação rápida. De modo a que esta actuação seja a mais rápida possível, o próprio módulo painel pode retirar da produção o painel solar. O valor a partir do qual o módulo painel retira o painel solar de produção é definido pela tensão de segurança do painel. Enquanto o valor da tensão medido no painel solar não retornar a valores normais, o módulo painel não permite a entrada em produção do painel em questão.

O valor da tensão de segurança é programado no módulo painel pela configuração disponível no módulo central. Este valor de segurança, pode ser considerado como o valor de tensão do painel solar em vazio fornecido pelo fabricante. Admitindo que os módulos painel estão

a ser iniciados, não existirá nenhum valor de segurança configurado, nesta situação o módulo painel irá esperar pelo envio dos valores de configuração, não podendo ser controlado pelo módulo central até que seja configurado.

Com este mecanismo de bloqueio, é possível proteger a instalação e o inversor caso entre em vazio repentinamente e evita uma possível má actuação por parte do módulo central em caso de se medir valores de tensão muito elevados, e típicos de um sistema em vazio. Na Figura 49 pode-se visualizar o fluxograma geral do comportamento do módulo painel em relação às comunicações e ciclo contínuo de medição de valores e verificação da tensão de segurança.

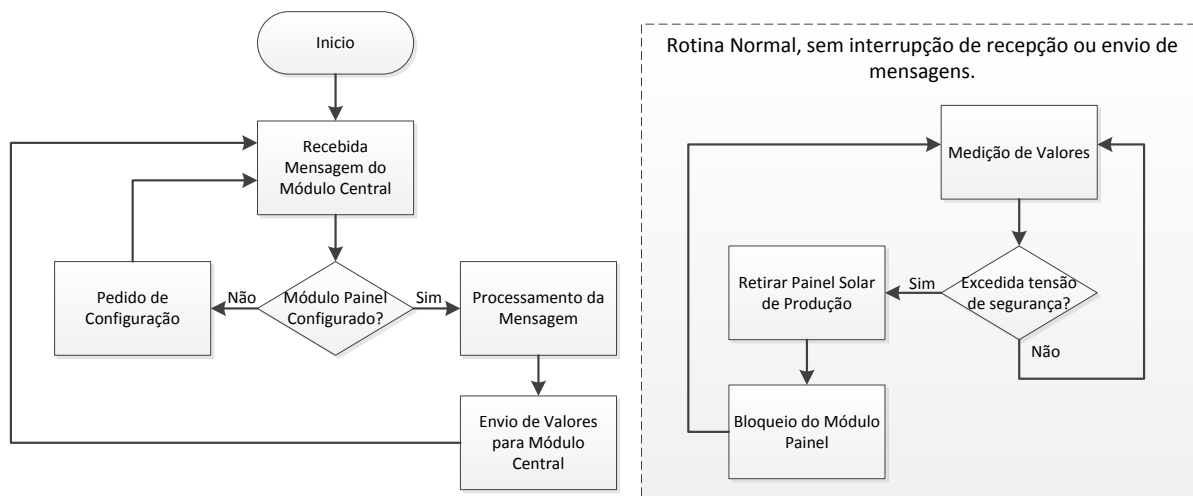


Figura 49 - Fluxograma de funcionamento geral do módulo painel.

Em caso de manutenção ou reparação, este módulo contém um sistema de visualização luminoso, que pode ser activado pelo módulo central a pedido do utilizador. Este modo de sinalização pode ser activado em qualquer altura, desde que o sistema se encontre em modo manual. Desta maneira é possível sinalizar um módulo painel que apresente mau funcionamento ou valores desmedidos.

3.2 Módulo Central

O módulo central é o equipamento responsável pela gestão da rede e de todos os módulos painel. A sua função principal é a gestão da rede de acordo com os parâmetros introduzidos, estes parâmetros reflectem as características e limitações eléctricas do inversor e da instalação fotovoltaica. Terá outras funcionalidades adicionais, que serão apresentadas através de uma interface web, e que servem como ferramentas de gestão e alerta.

3.2.1 Comunicações

O módulo central suporta vários tipos de comunicação. A principal é a que permite o acesso à rede de dados, onde se encontram ligados os módulos painel. As características físicas e protocolares deste tipo de comunicação serão abordadas mais à frente no capítulo 3.3 (Rede de Comunicação). Uma vez ligado à rede de dados, o módulo central iniciará a procura pelos módulos

painel activos, recolhendo os dados de cada um. Com base nos dados recolhidos dos vários módulos painel e os parâmetros de configuração inseridos previamente, irá gerir a rede de dados e os módulos painel activos com o objectivo de aumentar o máximo possível a produção, para as diferentes condições de intensidade luminosa ao longo do dia, sem exceder os limites predefinidos.

Para além da comunicação com a rede de dados, que apenas serve para comunicar com os módulos painel e gerir a rede, existem outras duas comunicações. Estas têm o propósito de alertar o utilizador e permitir acompanhar o estado da instalação fotovoltaica. Uma delas é a comunicação TCP/IP-Ethernet, através da qual é possível ligar o módulo central a uma rede do mesmo tipo já existente. Por exemplo, ligando o módulo central a um *router* existente na casa do utilizador é possível que este consiga aceder a uma página *web* alocada dentro do módulo central, a partir de qualquer computador. A página *web* disponibilizada permite principalmente a configuração dos parâmetros eléctricos da instalação fotovoltaica, para além de outras funcionalidades como a monitorização da instalação e simples tarefas de manutenção. O acesso a esta página não está restrito a um acesso local, podendo ser acedido remotamente através de qualquer equipamento com ligação à internet.

A outra tecnologia de comunicação instalada no módulo central permite o acesso deste a uma rede GSM, permitindo o envio e recepção de mensagens de texto. Estas mensagens podem ser enviadas para um número de telemóvel configurado e servem para alertar o utilizador de eventos importantes que aconteçam na instalação fotovoltaica. O próprio utilizador também poderá enviar mensagens para o módulo central, desde que devidamente formatadas, de modo a requisitar mais informação ou comandar algum tipo de acção.

Das três comunicações disponibilizadas no módulo central, comunicação com a rede de dados, comunicação TCP/IP-Ethernet e comunicação GSM, apenas as duas últimas podem ser facultativas. Apesar do protótipo ser desenhado para utilizar as duas últimas, é possível alterar este esquema de funcionamento. Por exemplo, numa instalação remota poderá não existir acesso à internet, pelo que se poderá utilizar apenas a comunicação GSM para supervisão da instalação fotovoltaica remotamente. Como se irá ver mais adiante, o facto de utilizar a comunicação GSM para supervisão é possível, mas não permite uma interactividade nem acesso a outras funcionalidades que apenas se podem aceder através da comunicação TCP/IP-Ethernet (página *web*).

3.2.2 Interface

Como referido o módulo central permite alojar uma página *web*, através da qual se consegue aceder a funcionalidades e configurações. De modo a permitir criar uma interface apelativa, simples e interactiva, foi necessário recorrer a certas tecnologias *web*.

A interface gráfica criada é composta por várias janelas, que dão acesso a informação ou configurações, sobre a instalação fotovoltaica. A organização das várias janelas pode-se visualizar de seguida:

1. Início
2. Informações
 - a. Estado dos Painéis
 - b. Estatísticas
3. Configurações
 - a. Dados Login
 - b. GSM
 - c. Inversor
4. Manutenção
5. Sobre

O nome dado a cada uma das janelas ajuda a identificar o tipo de informação que se pode encontrar dentro da janela, facilitando a procura do utilizador pela informação desejada. As janelas mais importantes são indicadas nos pontos 2, 3 e 4. As janelas do ponto 2 (Informações) permitem apenas consultar dados relativos a instalação fotovoltaica, no ponto 2.a (Estado dos Painéis) é possível visualizar os módulos painel activos, o seu estado (em produção ou fora de produção) e os seus valores (tensão, corrente, temperatura), no ponto 2.b seria possível visualizar um gráfico com os valores de produção anteriores, esta janela encontra-se inacabada devido à pouca quantidade de memória (*RAM e Flash*) restante no microcontrolador do módulo central.

No ponto 3 (Configurações) encontram-se agrupadas as janelas de configuração, onde o utilizador poderá inserir os dados pertinentes à sua instalação fotovoltaica de modo a configurar o sistema. O ponto 3.a contém uma janela onde é possível alterar os dados de acesso ao módulo painel, este é protegido contra acessos não permitidos e inicializa pela primeira vez com um *username e password* padrão. Em 3.b é possível configurar os números de telemóvel para alertas, verificar o saldo do cartão, a operadora e a força do sinal, esta janela também se encontra inacabada. No ponto 3.c encontra-se uma das janelas mais importante, onde se pode configurar os dados referentes ao inversor da instalação fotovoltaica e que influenciaram as decisões tomadas pelo módulo central na produção. Os dados possíveis de inserir nesta janela são apresentados na Tabela 12.

Característica	Unidades
Tensão máxima do inversor	V
Corrente máxima do inversor	A
Limite de potência a produzir	W
Tensão de segurança do painel	V

Tabela 12 - Configurações inversor.

Na janela referente ao ponto 4, é possível alterar o funcionamento do sistema para modo manual e efectuar um controlo manual da produção, bem como activar o sistema de indicação do módulo painel, onde é possível activar a sinalização luminosa presente em cada módulo painel.

De seguida serão apresentadas as tecnologias web utilizadas para criação da interface web e suas respectivas janelas.

3.2.2.1 HTML

A linguagem HTML (*Hypertext Markup Language*) é a linguagem por marcações mais utilizada na criação de páginas web e apresentação de conteúdos online num navegador web.

As marcações HTML são contidas entre “<”, “>” e são compostas por uma marca de início (Ex: <center>) e uma marca de fim (Ex: </center>), onde todo o conteúdo entre marcas terá as propriedades da marcação utilizada (no exemplo o conteúdo será centrado).

Algumas das marcações não apresentam marca de finalização, isto porque não são utilizadas para atribuir propriedades a um conteúdo, mas sim para o criar. Os conteúdos podem ser texto, botões, imagens, som, tabelas, etc.

As marcações servem apenas para interpretação do navegador web e não são apresentadas ao utilizador. O navegador web após interpretar as várias marcações cria uma versão da página legível, onde o conteúdo inserido é moldado de acordo com as propriedades das marcações onde foi inserido.

3.2.2.2 Estilos CSS

O estilo CSS (*Cascading Style Sheets*) é uma linguagem de estilo utilizada em conjunto com linguagem por marcação, como é o exemplo do HTML.

Esta linguagem tem o propósito de separar o conteúdo de um documento da sua apresentação. Tornando mais fácil alterar o estilo dos conteúdos a partir de um ficheiro externo (.css), sem necessidade de alterar o ficheiro dos conteúdos (.html).

As propriedades do estilo CSS são vastas, podendo ser atribuídas a um documento inteiro ou apenas a algumas das marcações. No excerto de código abaixo é possível observar a aplicação de um estilo CSS à marcação *body* do documento HTML. Neste caso todo o conteúdo contido na marcação *body* irá apresenta a cor de fundo definida.

```
body {  
  background-color: #999999;  
  z-index: 3;  
}
```

3.2.2.3 JavaScript

JavaScript é uma linguagem de programação, criada para ser executada e interpretada pelo navegador web no computador do utilizador. Através desta linguagem é possível criar uma interface melhorada e páginas web dinâmicas.

O recurso a esta tecnologia permite, por exemplo, validar dados antes de serem submetidos para o servidor, evitando sobrecarregar o servidor com o processamento de dados inválidos.

A sintaxe desta linguagem é muito parecida com a linguagem C, não tendo qualquer relação com esta ou com a linguagem de programação Java.

3.2.2.4 Ajax

Ajax (*Asynchronous JavaScript and XML*) é uma tecnologia web que permite desenvolver aplicações assíncronas executadas no computador do utilizador.

Desta maneira é possível transferir dados entre o navegador web e o servidor assincronamente, sem que a apresentação da página web (*HTML*) seja influenciada. Se um certo conteúdo demorar muito tempo a ser descarregado para o computador do utilizador, este poderá continuar a visualizar e interagir com a página web sem qualquer lentidão ou demora.

3.2.3 Funcionamento

O módulo central é capaz de controlar todas as comunicações referidas em simultâneo, sendo que as comunicações Ethernet e GSM só funcionarão caso o sistema tenha uma mensagem pendente e/ou um acesso à sua página web, sendo que estão inactivas ou em funcionamento reduzido durante o restante tempo. A única comunicação que é permanente e que se encontra em constante actividade é a que garante acesso à rede onde os módulos painel estão conectados.

Esta actividade permanente é resultado de um ciclo de código implementado no módulo central e que tem como propósito a constante monitorização dos valores de cada painel e execução de um algoritmo de controlo. Este algoritmo de controlo, apesar de simples (versão de protótipo), é responsável por ajustar a produção fotovoltaica de acordo com os parâmetros configurados (ver 3.c e Tabela 12). Na Figura 50 é possível observar o fluxograma do algoritmo de controlo, apresentando de uma maneira geral o funcionamento do algoritmo e as etapas de controlo.

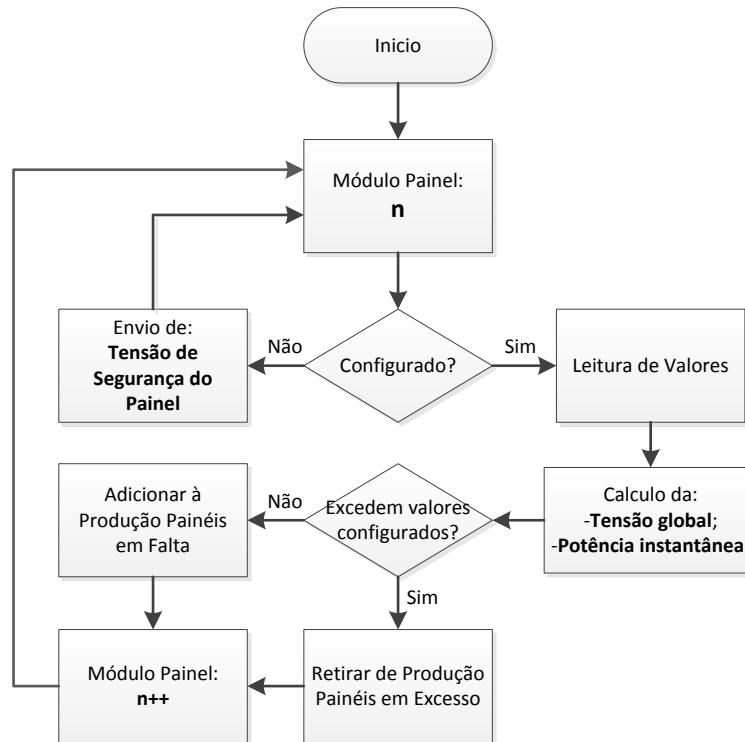


Figura 50 - Fluxograma do algoritmo de controlo do módulo central.

Com o algoritmo de controlo implementado é possível não só controlar a produção, a fim de aumentar o rendimento da instalação fotovoltaica, como também proteger o inversor e a instalação. Através das etapas de controlo é possível perceber que a adição ou remoção de painéis é feita de acordo com o limite de potência máxima configurado (poderá ser a potência máxima do inversor) e do limite máximo de tensão (poderá também ser a tensão máxima admissível pelo inversor).

3.3 Rede de Comunicação

Para que o módulo central consiga comunicar com os vários módulos painel é necessário criar uma rede de comunicação capaz de interligar os vários módulos simultaneamente. Como já foi referido, o módulo central irá recolher a informação dos vários módulos painel e calcular a produção, decidindo se deve adicionar ou retirar painéis de produção.

Este tipo de comportamento é típico de redes centralizadas. Onde a gestão da rede e do seu funcionamento é gerido centralmente, normalmente por apenas um equipamento da rede. Neste caso, o equipamento de gestão da rede é o módulo central. Existem outros modelos de redes, como as descentralizadas e as distribuídas. Mas tendo em conta que nestas redes o processamento de informação é repartido, irá aumentar a complexidade da sua implementação. Redes descentralizadas ou distribuídas são normalmente utilizadas em situações onde se requer grande expansibilidade da rede, flexibilidade e elevado volume de tráfego e seu processamento. Na Figura 51 pode-se observar os modelos de redes mencionados.

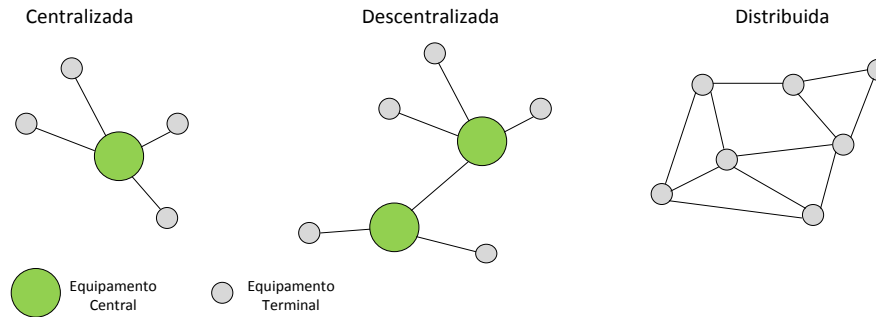


Figura 51 - Modelos de Redes.

Na aplicação que se pretende desenvolver, uma rede centralizada é mais do que suficiente para atender as necessidades dos módulos, visto o tráfego de dados estar limitado a poucas dezenas de bytes por módulo painel, não existindo a necessidade de processamento de dados complexos ou em grande quantidade e a expansibilidade necessária não estar acima de uma centena de módulos painel. Isto porque numa instalação de microprodução o número de painéis é bastante reduzido, não ultrapassando uma centena de painéis por string.

Até aqui foram apresentadas as necessidades gerais da rede que se pretende implementar, levando à conclusão que uma rede com processamento centralizado é a mais eficaz ao modelo de rede a implementar. Considerando isto, vai-se de seguida determinar com maior especificidade os vários elementos da rede a implementar.

3.3.1 Camada Física

A camada física é a responsável pelo transporte de bits de uma localização para outra. Aqui são definidos o tipo de sinais enviados e os condutores utilizados para transportar os referidos sinais. Os sinais poderão ser eléctricos, ópticos ou electromagnéticos (radiofrequências), sendo o tipo de condutor influenciado pelo sinal que se pretende enviar.

Os vários equipamentos, de modo a comunicarem, têm de se interligar aos condutores de sinal. A disposição ou ligação física dos vários equipamentos na rede pode ser ilustrada através de um diagrama de topologia, onde é possível visualizar de uma maneira simplificada e global o fluxo de dados e interligação dos vários equipamentos na rede.

A rede pode assumir uma de várias topologias, em que as mais elementares e comuns, são as topologias em anel, estrela, malha e barramento. Cada uma das topologias tem diferentes requisitos de *hardware* e protocolos. Na Figura 52 estão ilustradas as diferentes topologias mencionadas.

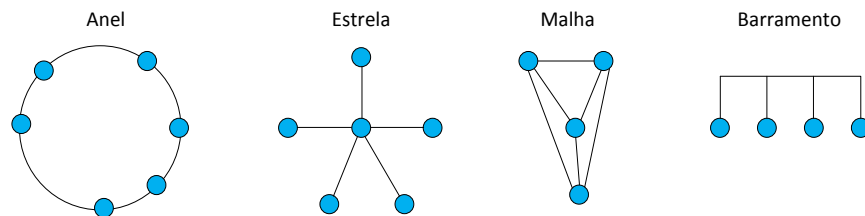


Figura 52 - Ilustração de diferentes topologias de rede.

Pelo que se pôde observar da distribuição das diferentes topologias, aquelas que têm um perfil mais compatível com uma solução de processamento centralizado, são as topologias em estrela e em barramento. Na topologia em barramento, existe um condutor principal onde todos os equipamentos estão ligados. Enquanto na topologia em rede, existe um equipamento central de onde sai um condutor para cada equipamento terminal. Esta última, não se demonstra muito prática na instalação do sistema nos painéis, visto necessitar de um condutor dedicado por painel. Na Figura 53 pode-se verificar a vantagem da topologia em barramento em relação à topologia em estrela para a solução proposta, no que toca ao número de condutores e complexidade de instalação.

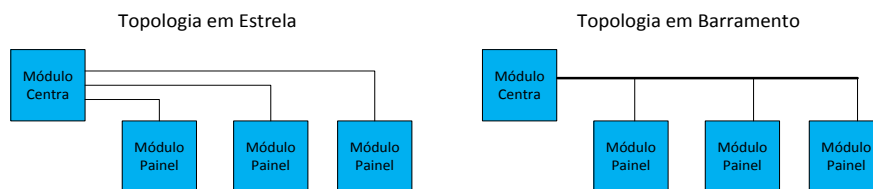


Figura 53 - Ilustração da instalação dos módulos com topologia em estrela e em barramento.

Levando em conta o facto de que os painéis solares estão distribuídos lado a lado, como estão ilustrados os módulos painel na Figura 53, seria necessário uma grande quantidade de condutores para ligar todos os módulos painel, aumentando a complexidade da cablagem e dificuldade de instalação.

Apesar da topologia em estrela permitir adaptações futuras na rede com maior facilidade e evitar que uma falha num dos condutores desligue toda a rede, continua a não justificar os encargos adicionais. Uma instalação solar de microprodução será praticamente estática, não sofrendo modificações severas na disposição dos módulos.

Tendo a necessidade de implementação de um rede com topologia em barramento, é necessário empregar uma tecnologia para o efeito. Existem duas tecnologias que se encaixam no perfil, o CAN (Controller Area Network) e o RS485. Ambas as tecnologias são modelos que definem os sinais eléctricos e os elementos físicos a utilizar, sendo que o CAN vai mais além, definindo a estrutura das mensagens, detecção de erros, controlo de acesso ao meio, entre outros.

Ambas as tecnologias são boas escolhas, mas é necessário escolher a que melhor se adapta às necessidades da rede. O RS485 sobressai em relação ao CAN por permitir uma maior

flexibilidade na estrutura da mensagem a enviar, deixando ao critério do utilizador a escolha da tecnologia para detecção de erros e permitir uma comunicação half ou full-duplex (ao invés do CAN que apenas suporta half-duplex).

Sendo assim, são apresentadas na Tabela 13 as especificações e limites físicos definidos pelo modelo RS485.

Condutores eléctricos:	Par entrançado
Nº máximo de dispositivos na rede:	256
Comprimento máximo da rede:	1200 Metros
Velocidade de transmissão:	100kbits/s a 10Mbits/s
Limiar de tensão para assumir impulso como "1" ou "0" lógico:	$\pm 200\text{mV}$
Gama de tensão:	-7 a 12 Volt

Tabela 13 - Especificações e limitações físicas do modelo RS485.

Para além das especificações eléctricas e físicas expostas na Tabela 13, a norma que regulamenta o protocolo RS485, define que se podem ter até 256 equipamentos no mesmo barramento, mas com a condição que a cada 32 equipamentos (ou unidades de carga) se instale um repetidor de sinal. Isto é necessário devido principalmente à potência que era requerida ao transceiver que estaria a transmitir dados, caso se exceda os 32 equipamentos, visto que cada equipamento apresenta um pequeno consumo de energia a partir da rede (barramento) na recepção de dados. Actualmente, com a evolução da electrónica é possível fabricar transceivers com menor consumo de energia, o que permite reduzir ou até evitar a utilização de repetidores num barramento com 256 equipamentos.

As velocidades de transmissão de dados apresentadas na Tabela 13 são a mínima e a máxima recomendadas, sendo que este valor depende do comprimento do barramento, quanto maior for o comprimento do barramento menor deverá ser a velocidade de transmissão. Isto porque utilizar velocidades elevadas em barramentos grandes levará ao aparecimento de maiores reflexões de sinais, tornando os dados transmitidos "ilegíveis" pelo receptor.

O modelo RS485 define que os sinais eléctricos a enviar deverão ser diferenciais, no caso de uma comunicação *half-duplex* serão necessários dois condutores (A e B) onde são ambos utilizados para transmitir e receber dados alternadamente. Numa comunicação *full-duplex* são necessários quatro condutores (A, B, Z e Y), sendo dois deles (A e B) para transmissão e os outros dois (Z e Y) para recepção, o facto de utilizar sinais diferenciais e condutor de par entrançado reduz a influência de ruído nos sinais eléctricos e permite obter um maior alcance.

Na Figura 54 pode-se ver o exemplo da transmissão de uma palavra binária numa comunicação *half-duplex* e o respectivo sinal eléctrico gerado de acordo com o modelo RS485.

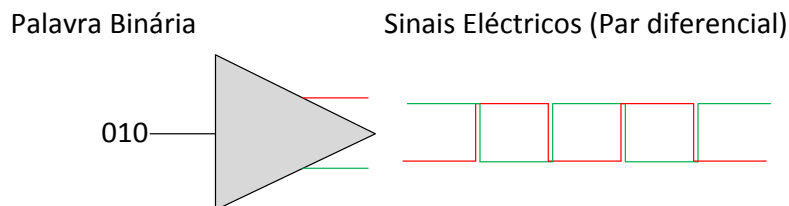


Figura 54 - Palavra binária e sinais eléctricos diferenciais.

Na situação de *half-duplex* todos os Slaves deverão configurar os seus transcievers para modo de alta impedância, ficando à “escuta” de pedidos por parte do Master. Recebido o pedido do Master o transciever tem de sair do modo de alta impedância, sendo possível ao Slave enviar dados para a rede. Após o envio dos dados é imperativo que o Slave retorne o seu transciever para o modo de alta impedância.

Na situação de *full-duplex*, por existir um par de condutores reservado para recepção e outro para transmissão, não há necessidade de controlo do transciever.

A norma RS485 indica também a necessidade de instalar resistências terminadoras nos extremos físicos da rede, para evitar reflexões de sinais com elevada frequência, e de resistências de *pull-up* e *pull-down* para garantir os níveis de tensão na rede. As resistências terminadoras devem ter o mesmo valor que a impedância do condutor utilizado para ligar os vários módulos. Na Figura 55 está representado o esquema de resistências necessário aplicar nas extremidades físicas da rede RS-485.

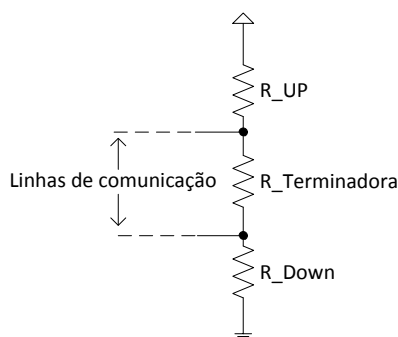


Figura 55 - Esquema de resistência a aplicar nas extremidades físicas da rede de comunicação.

3.3.2 Controlo de Acesso ao Meio

Como no modelo RS485 todos os módulos têm acesso ao barramento, partilhando assim o mesmo meio físico, é necessário implementar um mecanismo de controlo de acesso ao meio. De modo a evitar colisões, ou seja, evitar que mais do que um módulo tente comunicar ao mesmo tempo. Caso exista colisão os dados serão corrompidos e devem ser descartados.

Existem dois mecanismos, capazes de controlar o acesso ao meio físico, passíveis de utilizar neste tipo de rede. São o Master/Slave e o Token Ring.

O Token Ring, ou em português “passagem do testemunho”, é a criação de um testemunho virtual que passa por todos os equipamentos. Quando um equipamento recebe o testemunho é-lhe garantido o acesso ao meio, podendo iniciar qualquer comunicação com outros equipamentos, sendo que os restantes equipamento estão proibidos de iniciar uma comunicação. Quando o equipamento que contém o testemunho terminar a sua comunicação, deverá passar o testemunho ao equipamento seguinte e com ele o direito de aceder ao meio. Este tipo de mecanismo de controlo de acesso ao meio, devido ao seu modo de funcionamento é mais indicado para redes com processamento descentralizado, onde todos os equipamentos podem processar informação própria e de outros equipamentos.

No caso do mecanismo Master/Slave, normalmente existe apenas um equipamento a desempenhar o papel de Master, estando os restantes equipamentos a desempenhar o papel de Slaves. Neste mecanismo de acesso ao meio, apenas o Master pode iniciar uma comunicação com qualquer um dos Slaves. O Master efectua uma pergunta e aguarda a resposta do Slave, esta é a única situação em que o Slave acede ao meio, para responder a um pedido do Master. Desta maneira são evitados acessos em simultâneo ao meio, resolvendo as colisões.

O mecanismo Master/Slave parece o mais adequado ao tipo de rede que se pretende implementar, sendo que o módulo central (Master) é o único com capacidade de gestão e controlo, pelo que só necessita de recolher os dados medidos pelos vários módulos painel (Slaves). Estes últimos apresentam um comportamento passivo, não necessitando de aceder à rede para nenhum tipo de controlo ou actuação, respondendo apenas às “perguntas” do módulo central.

3.3.3 Protocolo

Para que a comunicação seja possível entre os diferentes módulos, é necessário que todos eles utilizem a mesma linguagem. Caso assim não fosse, era impossível existir comunicação entre os módulos, visto nenhum entender as mensagens que recebiam. Por isso é necessário criar um conjunto de regras, a que todos os módulos terão de obedecer, a fim de existir entendimento na rede. A este conjunto de regras chama-se protocolo.

O protocolo utilizado na comunicação de rede entre os módulos foi criado com base nas necessidades encontradas ao longo do desenvolvimento do protótipo. Isto faz com que o protocolo utilizado não seja compatível com nenhum modelo reconhecido, sendo considerado um protocolo proprietário, no sentido em que as regras definidas não o fazem compatível com outro tipo de protocolo reconhecido.

No protocolo desenvolvido, de modo a permitir uma certa flexibilidade na construção das mensagens e adição de novas mensagens no futuro, não existe limitação no número de bytes de dados a adicionar numa única mensagem (ao contrário do que aconteceria no CAN). Devido a isso e a questões de gestão das comunicações foram criadas três importantes regras:

- Estrutura da mensagem;
- Delimitadores da mensagem;
- Timeout da resposta.

A estrutura da mensagem é composta por quatro campos importantes (ver Figura 56), sendo todos de comprimento fixo excepto o campo referente aos dados da mensagem (quadrado laranja). Os campos atribuídos à estrutura da mensagem permitem identificar os módulos em comunicação, o tipo de mensagem, os dados da mensagem e o controlo de erros. Este último será abordado mais adiante, sendo apenas aqui referido para apresentar a estrutura completa da mensagem.

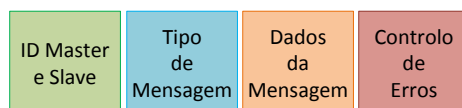


Figura 56 - Estrutura geral da mensagem.

De modo a que os módulos consigam perceber se receberam uma mensagem completa, foi necessário adicionar delimitadores nas mensagens, isto para evitar que um módulo painel tente processar uma mensagem a meio da sua transmissão e por consequência a considere válida. Os delimitadores a utilizar necessitam de ser únicos, não existindo a possibilidade de se confundirem com partes da mensagem. Deste modo foram aplicados dois bytes no início e fim da mensagem. Os de início têm o valor hexadecimal FFFF e os de fim o valor hexadecimal FEFE. Na Figura 57 pode-se visualizar a estrutura completa da mensagem usada nas comunicações.

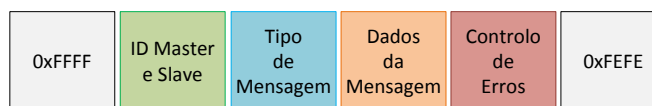


Figura 57 - Estrutura da mensagem com os seus delimitadores.

O campo da mensagem *ID Master e Slave* é composto por 2 bytes, o primeiro indica o endereço do módulo Master presente na rede e o segundo byte indica o endereço do módulo Slave ao qual o módulo Master pretende comunicar. O *Tipo de Mensagem* é composto por um byte, e indica o tipo de comando ou acção que o Master pretender atribuir a um determinado Slave. A Tabela 14 apresenta os comandos atribuídos ao protótipo desenvolvido e as acções correspondentes.

Número Comando	Acção
0	Leitura dos valores do painel. Tensão, Temperatura, etc.
1	Inserir ou retirar painel de produção.
2	Configurar tensão de segurança do painel.
3	Sinalizar módulo painel.
4	Controlo manual do estado de produção.

Tabela 14 - Número dos comandos e suas acções.

Consoante o número do comando, o campo *Dados da Mensagem* irá sofrer alterações no seu comprimento.

A comunicação implementada trabalha em modo confirmado, sendo que o Master (módulo central) irá aguardar por uma confirmação ou resposta do Slave (módulo painel) após envio de uma mensagem. Isto atribui uma certa robustez à comunicação, de modo que o Master consegue determinar se um determinado comando foi aplicado com sucesso ou não. Isto acarreta um problema, caso um dos Slaves deixe de funcionar correctamente, o Master poderia ficar infinitamente à espera da confirmação do Slave. A fim de evitar este problema, foi implementado um sistema de timeout. Este sistema atribui um determinado tempo, desde o envio da pergunta (por parte do Master) até à recepção de uma resposta válida ou confirmação por parte do Slave em causa. Isto determina um espaço temporal no qual o Slave terá de responder, para que a sua resposta seja aceite pelo módulo central.

Para mais detalhes sobre as mensagens, consultar anexo em 8.5 (Mensagens da Comunicação).

3.3.4 Detecção de Erros

Para além da delimitação das mensagens, da atribuição do endereço do remetente e do destinatário da mensagem, foi considerado necessário introduzir um mecanismo adicional para detecção de erros. Os erros que se pretendem detectar nesta secção, são erros causados por interferências externas, podendo causar corrupção na mensagem, distorcendo os seus valores e tornando-a perigosa se for mal interpretada.

Sendo assim é preciso dotar os módulos de um mecanismo que consiga detectar se uma mensagem foi ou não corrompida. Dois mecanismos comuns para detecção de erros são o *Bit de Paridade* e o *Cyclic Redundancy Check (CRC)*.

Estes mecanismos operam pela adição de bits extra no corpo da mensagem. Sempre que uma mensagem é transmitida é calculado um determinado valor e adicionado à mensagem. Na recepção, o módulo calcula o valor para a mensagem que recebeu (com ou sem erros) e compara esse valor com o que veio anexado à mensagem. Se os valores forem iguais, então a mensagem chegou sem erros, se não a mensagem contém erros e deve ser descartada.

De um modo resumido é apresentado na Tabela 15 os mecanismos de detecção de erro mais comuns e a sua probabilidade de falharem. A probabilidade de um mecanismo falhar tem a ver com o facto de uma mensagem ser distorcida de tal maneira que o receptor considera essa mensagem válida, mesmo recorrendo à utilização de um mecanismo de detecção de erros.

Mecanismo de Detecção de Erro	Probabilidade de Falhar
Bit de Paridade	50%
CRC8	0,4%
CRC16	0,0015%
CRC32	0,00000023%

Tabela 15 - Mecanismos mais comuns para detecção de erros.

Vendo a Tabela 15 o ideal seria utilizar o CRC32 por oferecer a probabilidade de falhar mais baixa. Mas isto traz dois inconvenientes, como referido anteriormente, ao utilizar um melhor mecanismo de detecção de erro também irá aumentar o número de bits extra a adicionar na mensagem e o processamento necessário para computar os algoritmos desses mecanismos. No caso do CRC32 seriam adicionados 32 bits extra ao corpo da mensagem.

Para as comunicações implementadas foi utilizado o CRC16, que oferece uma probabilidade de falhar muito baixa ao custo de adicionar 16bits extra na mensagem. Com a utilização deste mecanismo para detecção de erros pretende-se equilibrar o nível de protecção (detecção de erros) com o processamento exigido para o seu cálculo (ciclos de processador).

4 Implementação

O sistema de controlo da produção utilizado para gerir os painéis solares, afim de melhorar a produção e mantê-la dentro dos limites é constituído pelos módulos painéis e respectivo módulo central. Este sistema para funcionar necessita de uma rede para transferência de dados, de modo que os valores medidos pelos módulos painel consigam ser transmitidos ao módulo central, a fim de serem processados e analisados. Na Figura 58 pode-se visualizar todo o *hardware* desenvolvido e utilizado na construção de um protótipo funcional, que permitisse testar o seu funcionamento. A figura também ilustra, de um ponto de vista físico, como os vários módulos são interligados e poderão estar dispostos após aplicados numa instalação fotovoltaica.

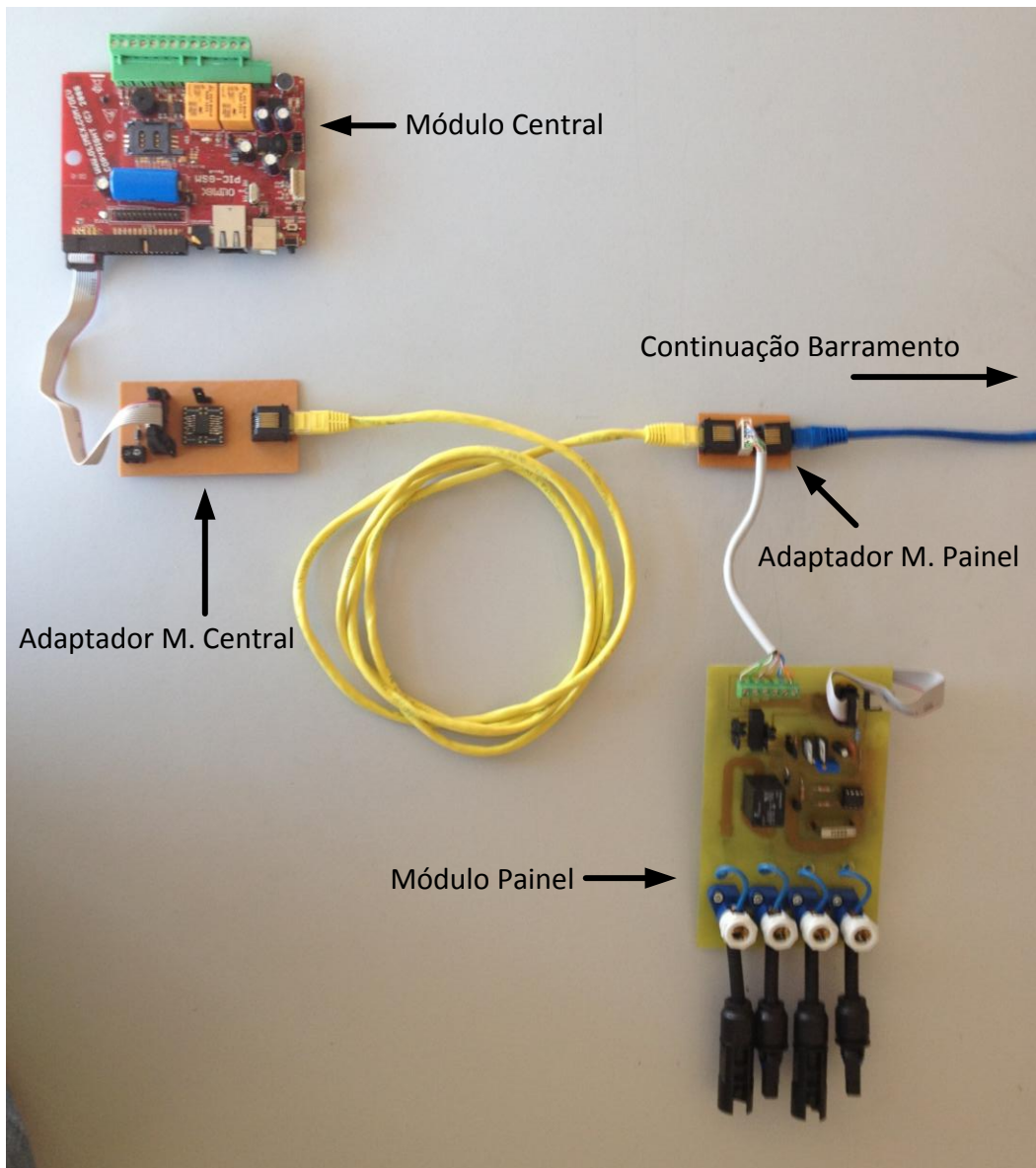


Figura 58 - Ligação dos vários módulos do sistema de controlo da produção.

O módulo central é responsável por gerir os vários módulos painel, recolhendo os valores medidos e actuando conforme necessário. Este módulo para além de gerir a produção e mantê-la eficiente contém uma interface web embutida, onde o microprodutor poderá visualizar o estado da instalação fotovoltaica, tanto localmente como remotamente. Para além da monitorização, também é possível efectuar simples tarefas de manutenção a partir da interface web, mas mais importante é permitir ao microprodutor inserir facilmente os dados da sua instalação, dados esses que reflectem por exemplo o limite de potência a produzir.

O módulo painel irá medir continuamente ao longo do dia os valores do painel solar ao qual está acoplado, enviando esses dados para o módulo central sempre que forem requeridos. Este módulo não necessita de alimentação externa, obtendo a energia para funcionar do painel solar ao qual está ligado, evitando a necessidade de uma fonte de energia dedicada para os módulos painel e reduzindo o número de ligações e condutores necessários. O módulo painel (Figura 58) utiliza dois conectores *Tyco Electronic* centrais (conectores pretos) para ligação ao painel solar, e os conectores exteriores para ligação ao painel solar anterior e seguinte.

Os adaptadores do módulo central e dos módulos painel são utilizados para conversão do tipo de comunicação (RS232 em RS485), sendo que tanto o módulo painel como o módulo central utilizam comunicação RS232 para envio de dados, esta é uma comunicação ponto-a-ponto, permitindo apenas dois equipamentos ligados na rede. De referir que cada módulo painel terá de dispor de um adaptador, isto é necessário para que o módulo painel seja capaz de se ligar na rede, sem interromper a sua continuidade para o próximo módulo painel. A rede à qual os vários módulos estão ligados implementa uma comunicação do tipo RS485, este tipo de rede ao contrário da RS232 permite vários equipamentos ligados na rede. Daí advém a necessidade de utilizar adaptadores, de modo a que se possa converter os sinais eléctricos característicos de cada tipo de comunicação.

4.1 Módulo painel

O *hardware* do módulo painel é composto por duas partes, uma placa de prototipagem onde se encontra o microcontrolador, e uma placa de circuito impresso desenvolvida para comportar todos os sistemas de medida, controlo, alimentação e comunicação.

4.1.1 Placa de Prototipagem

A placa de prototipagem utilizada foi desenvolvida pela Olimex [14] e designada por *PIC-26J50*. Esta placa comporta um microcontrolador PIC18F26J50, com as características já referidas anteriormente (Tabela 9), um botão de teste, oito *led's* para visualização e alertas, regulador de tensão, porta USB para comunicação e/ou alimentação, ficha para ligação de um programador, uma porta UEXT (designação Olimex) e zona perfurada para adição de componentes externos.

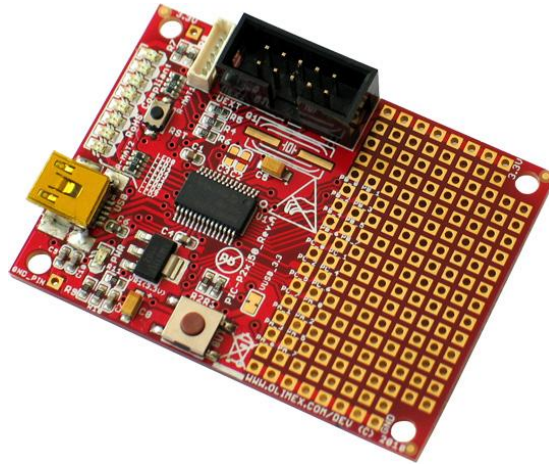


Figura 59 - Placa de prototipagem. Fonte: [14].

As dimensões desta placa são reduzidas, tendo 61mm de comprimento por 45mm de largura. A porta UEXT (*socket* preta Figura 59) disponível na maior parte dos produtos Olimex, permite um fácil acesso aos pinos de comunicação do microcontrolador. Na placa em questão tem-se acesso aos pinos da comunicação série (RS232), SPI e I2C.

A zona perfurada (zona à direita na Figura 59) permite soldar novos componentes para interação com o microcontrolador e ter acesso a vários pinos digitais e analógicos. No total são 20 pinos de fácil acesso dos quais 6 podem funcionar como entradas analógicas.

O esquema eléctrico da placa de prototipagem poderá ser consultado no *datasheet* em [15].

O recurso a esta placa de prototipagem permitiu usufruir das várias capacidades do microcontrolador, bem como de funcionalidades adicionais proporcionadas pela placa, sem a preocupação do seu desenvolvimento e fabrico. Dispondo assim de uma base sólida e funcional para integração com outros sistemas e execução de código desenvolvido para o microcontrolador.

4.1.2 Placa de Circuito Impresso

De modo a comportar todos os componentes necessários às várias funcionalidades do módulo painel (medição de tensão, corrente, controlo, etc.) foi desenvolvida e fabricada uma placa de circuito impresso. Foi tomada a escolha de desenvolver esta placa devido à quantidade de componentes necessários, complexidade do circuito, atribuição de robustez ao módulo e mobilidade, na medida em que permite a instalação do módulo num painel solar, possibilitando testes reais do módulo numa instalação de produção fotovoltaica.

A Figura 60 e Figura 61 apresentam a placa de circuito impresso desenvolvida e os componentes necessários já instalados, incluindo placa de prototipagem.



Figura 60 - Protótipo módulo painel, vista superior.

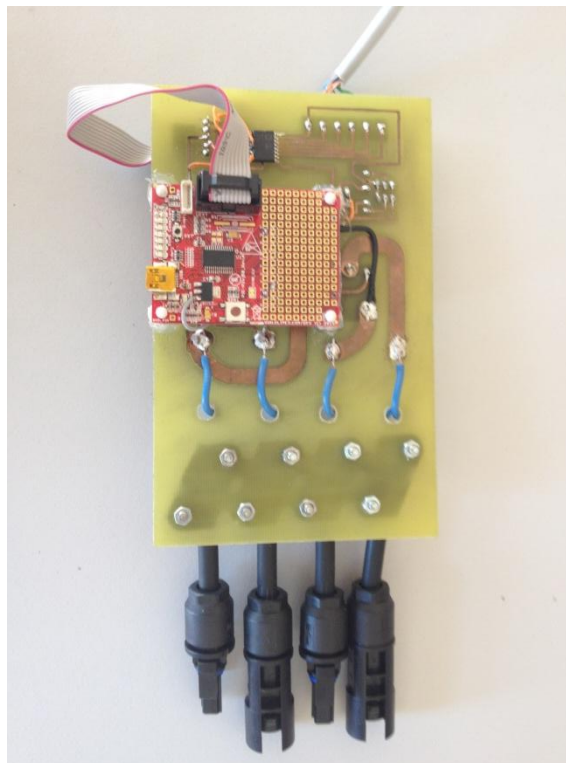


Figura 61 - Protótipo módulo painel, vista inferior.

Nesta placa foram incorporadas as funcionalidades da solução proposta e seleccionada no subcapítulo 3 (Solução Proposta). Para relembrar, pode-se consultar a Tabela 16 onde estão descritas as funcionalidades seleccionadas anteriormente.

Leitura da Tensão	Leitura da Corrente	Leitura da Temperatura	Controlo da Produção	Alimentação	Comunicação
Divisor Resistivo	Resistência Shunt	Electrónicos	Controlo Electromecânico	Alimentação pelo Painel Solar ou Alimentação por Fonte Isolada	Transciever Isolado.

Tabela 16 - Funcionalidade módulo painel seleccionadas.

Na Figura 60 e Figura 61 pode-se observar na parte inferior quatro fichas de cor preta, estas são utilizadas para ligação do módulo painel ao sistema de produção fotovoltaico. As duas fichas centrais são utilizadas para ligar o módulo painel ao respectivo painel solar e as duas fichas nas extremidades são utilizadas para ligar ao painel solar anterior e seguinte.

É necessário que se respeite esta ordem de ligação, caso contrario o módulo painel não conseguirá executar a sua função devidamente. As fichas centrais, que ligam ao painel solar, permitem ao módulo ter acesso aos valores de tensão, corrente e alimentação.

As fichas são normalizadas e compatíveis com qualquer sistema de microprodução fotovoltaica, são robustas e impedem penetração de humidade e poeiras.

A consulta do esquema eléctrico completo da placa de circuito impresso desenvolvida pode ser feita no anexo 8.2.

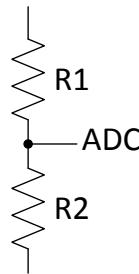
4.1.3 Dimensionamento

De seguida será apresentado o dimensionamento das várias funcionalidades do módulo painel, de acordo com os valores reais e implementados no protótipo.

4.1.3.1 Leitura de Tensão

A medida do valor de tensão do painel solar é feita, como foi seleccionado anteriormente, por um divisor resistivo simples. Para o seu dimensionamento foi estabelecido à partida o valor máximo da tensão que o módulo será capaz de medir, o painel solar disponível apresenta uma tensão de circuito aberto de cerca de 37Volt, de modo a que o módulo painel seja compatível com o maior número possível de painéis solares a tensão máxima foi estabelecida em 76Volt.

Tendo o limite máximo de tensão a medir estabelecido e sabendo a tensão máxima que o microcontrolador suporta na sua ADC (3,3Volt –Tabela 9) pode-se determinar o valor das resistências.



$$\text{Relação Tensões} = \frac{76}{3,3} = 23$$

Sabendo que a relação entre a tensão medida no painel e a tensão medida pela ADC do microcontrolador é de 23, resta encontrar um par de resistências em que o seu valor proporcione a mesma relação. Neste caso o facto da relação entre tensões ser 23, significa que a tensão máxima do painel será 23 vezes superior à medida pela ADC do microcontrolador.

$$\frac{R1}{R2} = 23 \leftrightarrow \frac{620k\Omega}{27k\Omega} \cong 23$$

Na equação acima pode-se ver os valores de resistência atribuídos a R1 e R2.

4.1.3.2 Leitura de Corrente

Tal como na medição de tensão foi necessário estabelecer previamente o valor máximo de corrente que o módulo painel seria capaz de medir, no caso da leitura de corrente foi estabelecido

o limite de 10Ampère. O painel solar de teste apresenta uma corrente de curto-circuito de cerca de 8Ampère, pelo que se definiu o limite para 10Ampère para que o módulo painel tenha alguma margem de medição.

Devido às particularidades deste método de medição de corrente, foi utilizada uma resistência shunt e um amplificador. O cálculo deste sistema já foi feito previamente no subcapítulo 3.1.1.2.1 (Resistência Shunt (Sem isolamento)), não sendo aqui calculado novamente.

4.1.3.3 Controlo de Produção

O método de controlo da produção de um determinado painel solar é feito com base num componente electromecânico. Neste caso foi utilizado um relé de potência para placa de circuito impresso da *tyco electronics*, modelo T7CS5D-05. O seu *datasheet* pode ser visualizado em [16].

As características mais importantes a ter em conta para a sua integração no módulo painel estão expostas na Tabela 17.

Corrente Máxima	Tensão da bobine	Potência da bobine
12A	5VDC	360mW

Tabela 17 - Características Relé.

Como se pode observar pelas características do relé seleccionado, a corrente suportada (12A) é superior ao limite de corrente estipulado para o módulo painel. A tensão de actuação da bobine é de 5VDC, um valor baixo, o que permite manter os níveis de tensão para funcionamento do módulo painel reduzidos.

O microcontrolador seleccionado, e presente na placa de prototipagem, não é capaz de actuar directamente a bobine do relé. A tensão que apresenta nos seus pinos digitais (3,3V) e a corrente que consegue fornecer nesses mesmos pinos (25mA) perfaz uma potência de 82,5mW por pino. De modo a que seja possível a interacção entre o microcontrolador e o relé, devido à potência por pino do microcontrolador (82,5mW) ser muito inferior à necessária para actuar o relé (360mW), foi implementado o circuito da Figura 62.

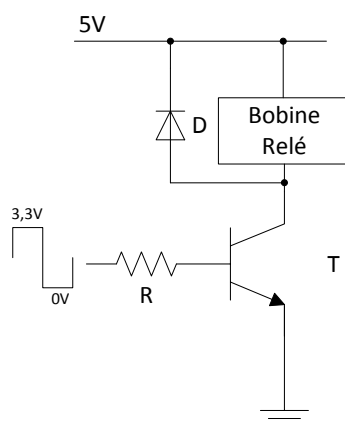


Figura 62 - Circuito de controlo do relé.

O transistor (T) utilizado é o comum $BC547$, este suporta tensões até 50V e corrente de colector máxima de 100mA. Desta maneira é possível actuar cargas até 500mW, valor bem superior ao necessário para actuar a bobine do relé (360mW). O dimensionamento do transistor (T) e da resistência (R) são indicados de seguida.

$$\text{Ganho } BC547 (\beta) = 100 \quad (1)$$

$$I_{colector} = \frac{\text{Potência}_{Bobine}}{\text{Tensão}_{Actuação}} = \frac{360mW}{5V} = 0,072mA \quad (2)$$

$$I_{base} = \frac{I_{colector}}{\beta} = \frac{0,072mA}{100} = 72 \times 10^{-4}A \quad (3)$$

$$R = \frac{\text{Tensão}_{base} - \text{Tensão}_{condução}}{I_{base}} = \frac{3,3 - 0,7}{72 \times 10^{-4}} = 3714\Omega \quad (4)$$

Na equação (1) foi atribuído o ganho do transistor, este valor é conservativo, na medida em que garante que qualquer que seja a condição de funcionamento do transistor este consegue garantir aquele ganho. Em (2) é calculada a corrente necessária que o transistor conduza para actuar a bobine do relé, com essa corrente em (3) é calculada a corrente que o pino do microcontrolador terá de fornecer para essa condição. Como se pode ver pelo resultado de (3), o valor de corrente pedido ao pino digital é muito inferior ao seu limite (25mA).

Em (4) é calculada a resistência que garante o funcionamento do transistor para as condições mencionadas acima e ilustradas na Figura 62.

O diódo (D) presente no circuito da Figura 62 tem a função de *freewheeling*, evitando que quando a bobine do relé estando desactivada tente inverter o sentido da corrente pelo transistor, o que poderia danificá-lo. O dimensionamento deste diódo é simples, tendo apenas de se garantir que a sua corrente de condução é igual ou superior à necessária para actuar a bobine do relé.

4.1.3.4 Alimentação do Módulo Painel

O protótipo do módulo painel possibilita a selecção da fonte de alimentação a utilizar, podendo ser alimentado directamente pelo painel solar ou por uma fonte externa.

No caso de a alimentação ser feita a partir do painel solar é preciso ter em conta que o valor da tensão deste é muito elevado e varia ao longo do dia. Para que se consiga converter os valores de tensão do painel solar para níveis que possam ser utilizados pelo módulo, recorreu-se à utilização de um regulador de tensão linear. Apesar de apresentarem um rendimento inferior aos reguladores comutados, estes não geram ruído electromagnético reduzindo as tensões induzidas nos aparelhos de medida e comunicação do módulo painel, daí a preferência dada aos reguladores lineares.

O regulador linear utilizado para regular os níveis de tensão entre o painel e os componentes do módulo painel, foi o LM317AHVT. Este regulador permite aplicar tensões de entrada até 60Volt, corrente de regulação até 1,5Ampère, dissipação máxima de 20Watt e tensão de saída regulável.

Todos os componentes presentes no módulo painel e referidos anteriormente funcionam com uma tensão de 5Volt, exceptuando o microcontrolador que funciona a 3,3Volt, mas este é alimentado pelo regulador integrado na placa de prototipagem, pelo que se poderá alimentar a placa de prototipagem também a 5Volt. Sendo assim, apenas é necessário regular um único nível de tensão para alimentação do módulo painel.

O regulador LM317AHVT, como referido anteriormente possibilita a selecção da tensão a regular à saída, pelo que esta será regulada para 5Volt a fim de respeitar as necessidades do módulo painel. A Figura 63 apresenta o esquema eléctrico do regulador LM317AHVT e a equação para cálculo do valor das resistências de regulação da tensão à saída.

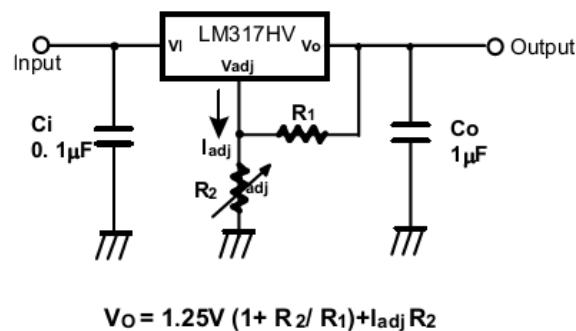


Figura 63 - Esquema de regulação do LM317AHVT e correspondente equação. Fonte: [17].

Analisando a equação presente na Figura 63, pode-se identificar quatro incógnitas, as resistências de regulação (R_1 e R_2), a corrente de ajuste (I_{adj}) e o valor da tensão que se pretende à saída (V_o). As duas últimas incógnitas são conhecidas, a corrente de ajuste é dada pelo fabricante e é da ordem dos $100\mu A$, enquanto a tensão de saída é de 5Volt para alimentação do módulo painel. Sabendo isto resta calcular o valor das resistências de regulação.

Antes de apresentar os cálculos é importante referir que o valor da resistência de regulação R_2 não deverá tomar valores muito elevados, a corrente de ajuste é de uma baixa grandeza mas se associada a uma resistência de elevada grandeza irá contribuir para um aumento da tensão de saída, o que poderá torna-la demasiado elevada para os componentes do módulo painel.

$$V_o = 1,25 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{adj} \times R_2 \rightarrow V_o = 5V, I_{adj} = 100\mu A$$

$$5 = 1,25 \times \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) + 100\mu A \times R2 \rightarrow \text{Assumindo, } R1 = 100\Omega$$

$$\text{Resolvendo a equação obtém-se: } R2 = \frac{6250}{21} = 297,6\Omega$$

Com o valor assumido para R1 e calculado para R2 é possível regular a tensão de saída do regulador para 5V, para qualquer que seja a tensão de entrada. Basta apenas verificar a influência causada pelo valor calculado para a resistência R2, se este valor não irá afectar muito a tensão de saída do regulador.

$$R2 = 297,6 \approx 300\Omega \rightarrow \Delta U = R2 \times I_{adj} = 300 \times 100 \times 10^{-6} = 0,03V$$

Como se pode observar pela equação acima, a variação da tensão na saída do regulador causada pelo valor de R2 é de 0,03V. Esta variação é muito pequena, pelo que se pode desprezar e utilizar os valores calculados anteriormente para R1 e R2.

Desta maneira o regulador de tensão será capaz de manter na sua saída os 5V necessários para alimentação do módulo painel, mesmo com variações de tensão na entrada. À excepção de valores de tensão à entrada inferiores a 6V, onde a saída irá variar consoante o valor presente na entrada. No entanto este problema não é grave, visto que para se obter tensões inferiores a 6V do painel solar a luminosidade que este recebe terá de ser muito reduzida (situação quase nocturna), pelo que nesta situação não é preciso aplicar qualquer tipo de controlo de produção. Como a luminosidade é quase nula o sistema não conseguirá produzir valores de potência perigosos sem o controlo de produção.

Outro factor a levar em conta no dimensionamento do regulador de tensão linear é a potência que este é capaz de dissipar, no caso a potência máxima é de 20Watts. Para determinar a potência que o regulador irá dissipar, foi determinada experimentalmente a corrente consumida pelo módulo painel na situação de maior consumo, tendo sido determinada em 100mA. Admitindo a situação mais desfavorável, de maior dissipação por parte do regulador, admite-se a tensão de entrada do regulador como sendo a tensão de circuito aberto do painel solar em utilização ($\approx 50V$)

De seguida serão apresentados os cálculos para determinação da potência dissipada pelo regulador.

$$P_{dissipada} = (U_{entrada} - U_{saída}) \times I = (50 - 5) \times 100 \times 10^{-3} = 4,5W$$

O valor de potência a dissipar será de 4,5W, representando $\frac{1}{4}$ da potência máxima que o regulador pode dissipar. Para que a potência dissipada fosse máxima o painel solar teria de apresentar uma tensão de 205V aos seus terminais.

Tendo em conta que o módulo painel será acondicionado dentro de uma caixa, para protecção contra agentes externos, fará com que o calor gerado pela dissipação de energia não seja dissipado de uma maneira favorável, por isso utilizaram-se dois reguladores em paralelo a fim de distribuir a carga e por consequência a energia dissipada por cada regulador. Usando dois

reguladores a potência dissipada por cada um será de 2,25W, o que permite a instalação do módulo painel em painéis solares com tensões superiores, mantendo os reguladores dentro dos limites de funcionamento. De referir que os reguladores ao longo do dia estarão sujeitos a temperaturas ambientes relativamente altas, o que reduzirá ainda mais a transferência de calor pela caixa do módulo, devido a estes factores decidiu-se sobredimensionar os reguladores.

A outra possibilidade para alimentação do módulo painel parte pela utilização de uma fonte externa que garanta isolamento, tal como foi referido no capítulo 3 (Solução Proposta).

De modo a garantir isolamento e transferência de energia ao mesmo tempo é necessário recorrer à utilização de um transformador. A utilização de um transformador implica utilização de corrente alternada, que não poderá ser utilizada para alimentar o módulo painel nem é utilizada pelo módulo central, o que restringe a transmissão e recepção da energia à corrente contínua.

Para que o transformador funcione, e se consiga alimentar o módulo painel em corrente contínua é preciso utilizar um inversor, que converta a corrente contínua em alternada, alimentando o primário do transformador e pondo o mesmo em funcionamento. Depois do lado do secundário terá de se proceder a uma rectificação, a fim de se obter novamente corrente contínua. Na Figura 64 pode-se visualizar um esquema de funcionamento do que foi acabado de explicar.

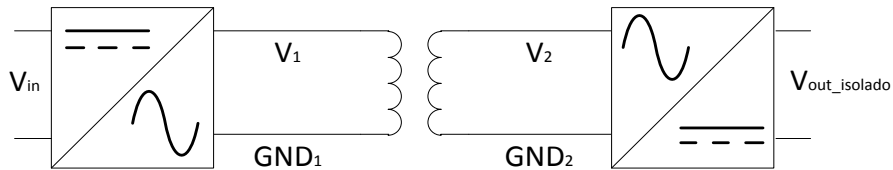


Figura 64 - Ilustração de fonte de alimentação isolada.

Este tipo de isolamento para transferência de energia não necessita de ser implementado com componentes discretos. Vários fabricantes de electrónica disponibilizam fontes isoladas completamente integradas, em que apenas é necessário fornecer alimentação de um dos lados e obter a saída isolada do outro. Poderá ser necessário aplicar condensadores de filtragem na saída e na entrada para redução de *ripple*.

Na Figura 65 pode-se observar a fonte isolada utilizada no módulo painel como método de alimentação alternativo. O modelo apresentado funciona a 5V, dando na sua saída também 5V e no máximo 200mA, sendo mais do que suficiente para alimentação do módulo painel.



Figura 65 - Exemplo fonte isolada. Fonte: [18].

Este método alternativo para alimentação do módulo painel foi implementado como opção secundária, caso a alimentação pelo painel solar se torne inviável durante os testes de campo. Desta maneira evita-se a fabricação de uma nova placa de circuito impresso caso seja necessário alterar o modo de alimentação do módulo painel.

4.2 Módulo Central

Para implementação das funcionalidades presentes no módulo central, foi utilizada uma placa de desenvolvimento da Olimex, designada por *PIC-GSM*. Os periféricos incluídos nesta placa tornam-na uma escolha excelente para desenvolvimento de aplicações que necessitem de controlo e monitorização remotas. Está equipada com um módulo GSM/GPRS para acesso a redes móveis de dados e uma interface *Ethernet* totalmente compatível com outros equipamentos de rede *Ethernet* (como por exemplo: *router*, *switch*, computador). O microcontrolador *PIC18F97J60* tem capacidade suficiente para gestão de alertas SMS, execução de um servidor HTTP e FTP. Dando a possibilidade de utilizar os periféricos GSM e Ethernet para controlo e monitorização remotas. Na Figura 66 pode-se visualizar uma imagem da placa de desenvolvimento referida.

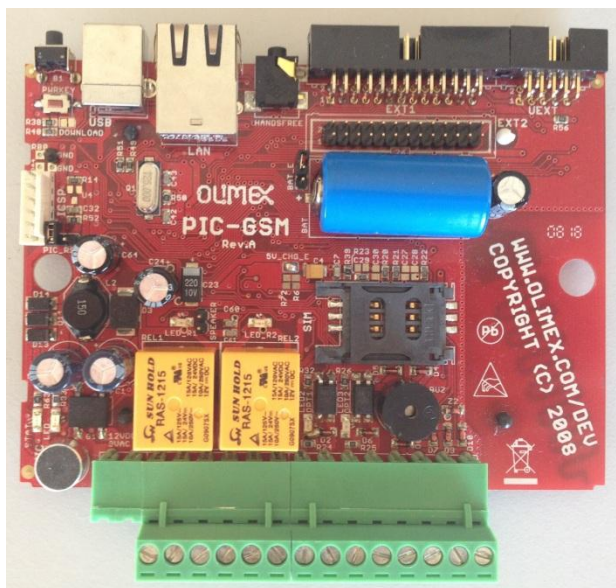


Figura 66 - Placa de desenvolvimento *PIC-GSM*.

Para além das funcionalidades referidas, esta placa de desenvolvimento e microcontrolador, dispõem de uma bateria de lítio capaz de suportar a continuação de funcionamento no caso de uma falha de energia. Isto permite que o controlo de produção não seja posto em risco devido a uma falha de energia na rede eléctrica. Este módulo permanecerá no interior da habitação onde é ligado à rede eléctrica para alimentação e a uma rede de dados.

4.2.1 Descrição Interfaces

A Figura 67 apresenta a placa de desenvolvimento com a descrição das interfaces mais importantes.

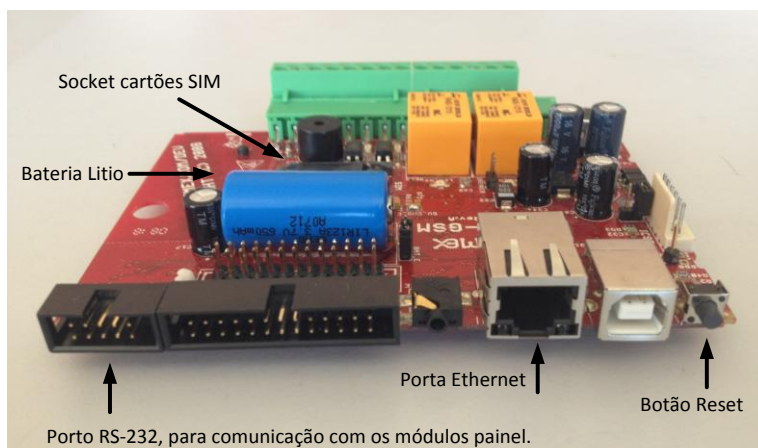


Figura 67 - Descrição interfaces placa de desenvolvimento.

O porto RS-232 permite acesso do módulo central à rede de comunicação que interliga os vários módulos painel, a rede comunicação é do tipo RS-485 pelo que terá de se utilizar um adaptador, este adaptador também foi desenvolvido e será apresentado mais adiante.

A porta Ethernet permite ligar o módulo a uma rede cablada do tipo Ethernet, onde se poderá aceder externamente à página *WEB* disponível no módulo.

O botão de *Reset* foi introduzido para que seja possível restaurar o módulo central às suas configurações iniciais e limpar todas as configurações inseridas anteriormente. Para isto basta premir prolongadamente o botão até o módulo reiniciar.

Como já foi referido a bateria de lítio permite manter o módulo central em operação mesmo durante uma falha de energia, a bateria será recarregada quando a rede eléctrica voltar ao seu funcionamento normal.

A *socket de cartões SIM* permite ao utilizador introduzir um cartão SIM de qualquer rede móvel, permitindo ao módulo central aceder à rede para envio de mensagens SMS.

4.2.2 Interface WEB

De seguida serão apresentadas algumas imagens relativas as páginas WEB contidas no servidor HTTP do módulo central. A descrição de cada imagem estará disponível por baixo da mesma.



The screenshot shows the ZEnergy login interface. At the top, there is a green sun icon on the left, the ZEnergy logo (with 'by Zeus Corporation' underneath) in the center, and a blue solar panel icon on the right. Below this is a navigation bar with five items: 'Início', 'Informações', 'Configurações', 'Manutenção', and 'Sobre'. The main content area is titled 'Insira Dados Login' and contains two input fields: 'Username:' and 'Password:'. Below the password field is an 'Entrar' button.

Figura 68 - Introdução de dados de acesso.

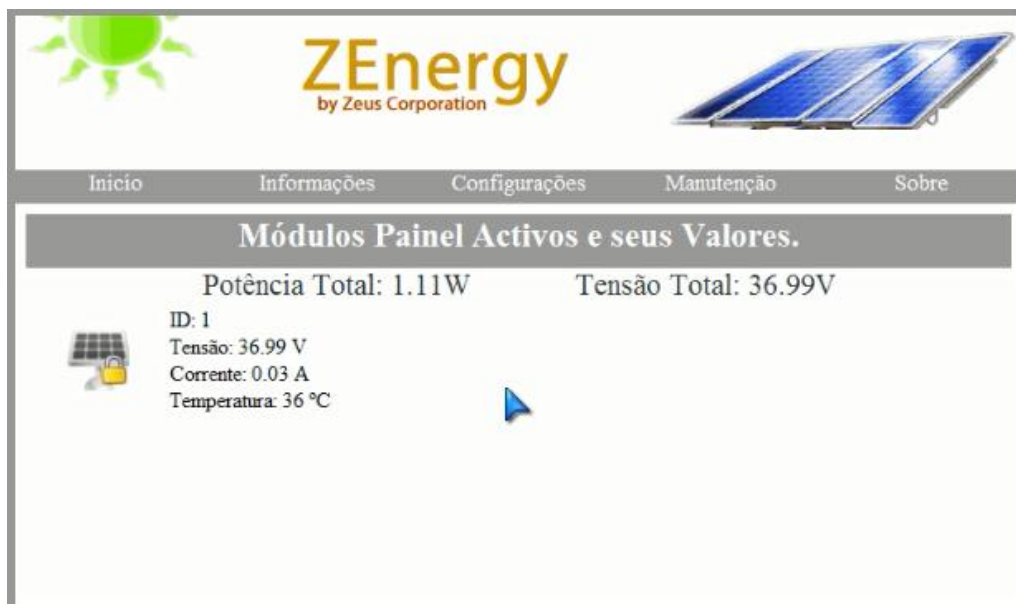


Figura 69 - Monitorização dos painéis solares.

Figura 70 - Introdução de configuração do sistema fotovoltaico.

Na Figura 69 é apresentado ao utilizador o símbolo de um painel solar cinzento com um cadeado, o facto do painel solar ser cinzento significa que não está em produção, enquanto que o símbolo do cadeado significa que por alguma razão o painel solar em causa excedeu o valor da tensão de segurança. Este valor é apresentado na Figura 70 e é referente ao campo “*Tensão Segurança Painel (V)*”. Este valor estipula um limite de tensão para o qual o painel solar deverá ser retirado de produção, isto é útil caso o sistema fotovoltaico se encontre repentinamente sem carga e a tensão do sistema se torne demasiado alta para o inversor.

Caso o símbolo do painel apresente uma cor azul, significa que está dentro dos limites impostos na Figura 70 e que está em produção.

4.3 Comunicação Módulos

Como já foi abordado anteriormente no subcapítulo 3.3(Rede de Comunicação), a rede utilizada para interligar os vários módulos é do tipo barramento e baseada RS-485. Tendo isto em mente, foi necessário desenvolver um adaptador RS232-RS485 para o módulo central conseguir comunicar com a rede, e um outro adaptador para os módulos painel se introduzirem na rede sem interromperem a continuidade do barramento.

4.3.1 Adaptador Módulo Central

O adaptador do módulo central para além de efectuar a conversão dos sinais eléctricos entre RS232 e RS485, também permite a ligação de uma fonte externa para alimentação dos módulos painel, caso se opte pela utilização do método secundário de alimentação (fonte isolada). Na Figura 71 pode-se visualizar o adaptador do módulo central desenvolvido.

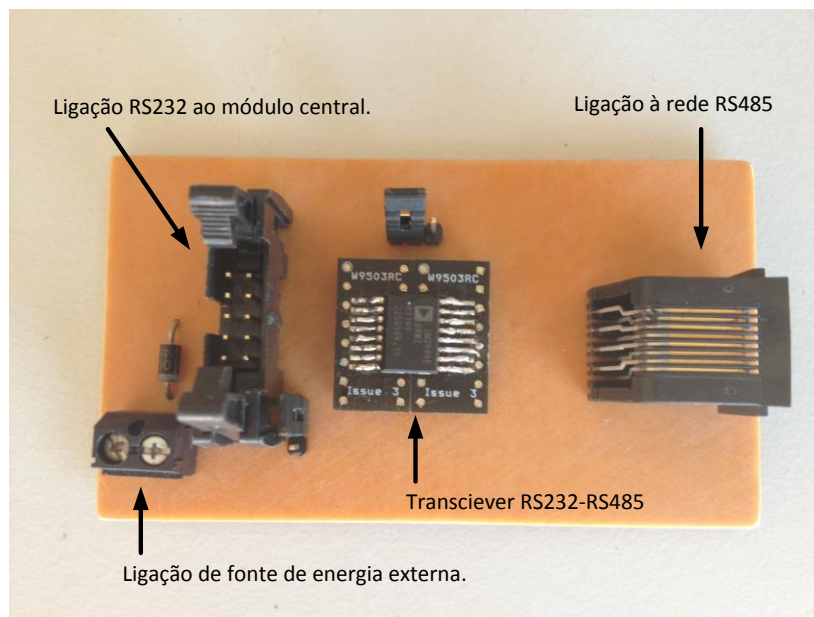


Figura 71 - Adaptador módulo central.

Esta placa como já referido, permite alimentar todos os módulos painel conectados na rede RS485. Para isso utilizou-se uma ficha RJ45 para fácil ligação, transporte das comunicações e alimentação, tudo num cabo Ethernet de quatro pares de cobre. Será apresentado mais adiante o esquema eléctrico utilizado no condutor e fichas RJ45.

A fonte de alimentação externa a ligar a este adaptador não poderá ultrapassar os 6V e terá de ter potência suficiente para alimentar todos os módulos painel (100mA cada) caso se pretenda utilizar o método de alimentação secundário por fonte isolada.

O nível de tensão máximo da fonte está relacionado com o nível de tensão de funcionamento dos módulos painel e dos limites eléctricos do transceiver RS232-RS485 utilizado. O transceiver é o ADM2484 da *Analog Devices*, suporta comunicações *half-duplex* e *full-duplex*, tendo sido utilizado em *full-duplex*. Para mais informação sobre o transceiver consultar [19].

O esquema eléctrico do adaptador do módulo central pode ser consultado no anexo 8.3.

4.3.2 Adaptador Módulo Painel

O adaptador desenvolvido para os módulos painel é bastantes simples, permitindo “pendurar” um módulo painel no barramento e dar continuidade ao mesmo para ligação de outros módulos painel. Na Figura 72 está apresentado o adaptador do módulo painel.

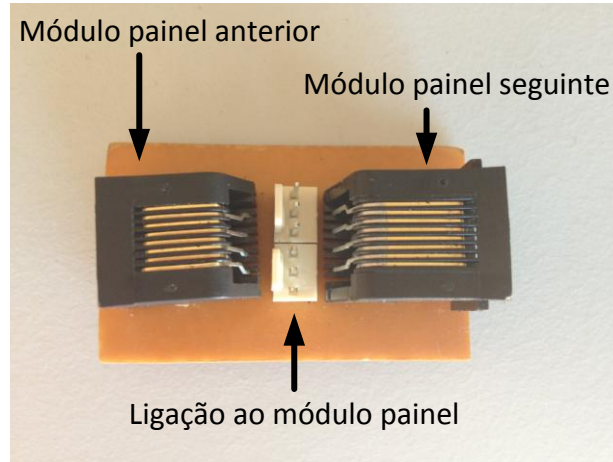


Figura 72 - Adaptador módulo painel.

O esquema eléctrico deste adaptador poderá ser visualizado no anexo 8.4.

4.3.3 Esquema de ligação dos condutores

O transporte de dados na rede de comunicação (RS485) e a alimentação secundária para os módulos painel é feito apenas num único cabo. Para isso foram utilizados cabos *Ethernet* de oito condutores e fichas RJ45.

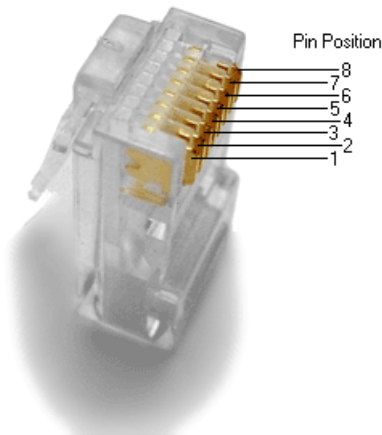


Figura 73 - Ficha RJ45 macho com numeração dos pinos. Fonte: [20].

A Figura 73 mostra uma ficha RJ45 (macho) com a correspondente numeração de pinos, cada um dos pinos irá corresponder a um condutor do cabo *Ethernet*. A função atribuída a cada um desses pinos difere da norma EIA-568 (norma que define as ligações eléctricas nos cabos *Ethernet*), tendo sido atribuídas outras funções nesta aplicação.

A comunicação utilizada é RS-485 *full-duplex*, pelo que são necessários quatro condutores para as comunicações, sobrando outros quatro condutores, que foram agrupados aos pares e utilizados para levar alimentação aos módulos painel.

A Tabela 18 apresenta a função atribuída a cada um dos condutores do cabo *Ethernet* para a aplicação em causa.

Nº Pino	Pino 1	Pino 2	Pino 3	Pino 4	Pino 5	Pino 6	Pino 7	Pino 8
Função	Vdd	Vdd	GnD	GnD	A	B	Z	Y

Tabela 18 - Função atribuída aos pinos Ethernet.

5 Análise de Rentabilização do Sistema

A ideia base, que originou o tema desta dissertação, tem como propósito melhorar a produção de energia num sistema fotovoltaico. Anteriormente foi explicado o funcionamento do sistema de modo a obter a melhoria na produção. Resta saber se em termos financeiros este sistema é fiável, se o aumento na produção consegue cobrir os gastos adicionais deste sistema e gerar lucro.

Neste capítulo, será feita uma comparação entre um sistema tradicional de produção fotovoltaica e o sistema apresentado, com as alterações necessárias para implementação do sistema estudado e implementado nesta dissertação. Por sistema tradicional de produção fotovoltaica, pretende-se indicar os sistemas constituídos por painéis solares fixos, que daqui em diante serão tratados por sistemas estáticos, enquanto que um sistema com controlo de produção será tratado por sistema estático melhorado.

Para a comparação dos dois sistemas, foi necessário ter acesso a dados sobre a radiação solar ao longo do dia em Portugal, para que seja possível efectuar uma simulação o mais realista possível, ou pelo menos com dependência de dados reais. A obtenção destes dados foi conseguida através do serviço online SoDa [21].

Este serviço *online*, fornece dados de radiação solar medidos por satélite em todo o globo. Apesar de ser um serviço pago, é disponibilizado gratuitamente dados de radiação solar do globo, relativos ao ano de 2005.

Apesar dos dados serem relativos ao ano de 2005, a comparação dos sistemas continua válida actualmente, e permitem retirar conclusões concretas sobre as diferenças dos dois sistemas, isto porque ambos serão submetidos aos mesmos dados de radiação solar.

Para obtenção de valores, que permitam efectuar a comparação, foram atingidos (de um modo geral) os seguintes tópicos:

1. Obtenção dos dados de radiação solar ao longo do dia.
2. Cálculo da radiação solar média ao longo do dia, referente ao ano de 2005.
3. Simulação da produção com sistema estático.
4. Simulação da produção com o sistema em estudo.
5. Criação de gráficos para caracterização dos dois sistemas.

Devido à experiência passada e facilidade de uso, o *software* comercial Matlab foi utilizado como ferramenta de auxílio em todo o processo de estudo e comparação dos sistemas. Visto proporcionar uma plataforma de desenvolvimento rápido e abstracção de algumas tarefas de programação.

5.1 Condições de Análise

Como foi referido, ambos os sistemas serão submetidos aos mesmos dados de radiação solar, de modo a criar uma comparação justa e coerente. Para cada sistema, foi criado em Matlab uma função capaz de dimensionar e simular o sistema de acordo com os dados da instalação e da radiação solar.

Os dados da instalação são referentes às características eléctricas dos painéis solares utilizados, preços e potência de produção. De modo a criar uma simulação o mais realista possível, foram utilizadas as características eléctricas de um painel solar comercializado pela *Cuquantum Solar*, estas podem ser visualizadas na Tabela 19.

Características eléctricas (modelo Sunport 72M)	
Tipo de Silício:	Monocristalino
Tensão Máxima:	35,89 V
Corrente Máxima:	7,81 A
Potência Máxima:	280 W
Rendimento:	14%
Área Painel:	2 m ²

Tabela 19 - Características eléctricas Painel Solar.

Os preços são utilizados na simulação para calcular o investimento inicial e o tempo necessário para retornar o investimento. Foram considerados o preço individual do painel solar e o preço médio adicional por painel, proveniente da aplicação do sistema de controlo de produção. Preços referentes à manutenção, mão-de-obra, instalação e outros equipamentos (ex.: inversor) necessários à constituição de um sistema de produção fotovoltaico, não foram considerados. Estes custos apesar de não entrarem na simulação, foram considerados constantes e iguais para os dois sistemas. Visto a única alteração de um sistema para o outro ser apenas a aplicação do sistema de controlo de produção e a adição de painéis solares extra. O preço atribuído a cada painel foi de 520€, este valor não é exacto para o painel em questão, mas representa um valor real para a generalidade dos vários painéis solares com as características mencionadas na Tabela 19. Em relação ao custo adicional causado pela utilização do sistema de controlo da produção, o valor estipulado foi de 30€ por painel solar, este valor é uma previsão do preço final para um produto acabado e não o preço do protótipo, que é mais elevado. O preço referente à remuneração, pela venda da energia, depende da legislação em vigor e foi exposto no capítulo 2.2 (Microgeração).

Em relação à potência de produção, apenas é possível introduzir no simulador o limite máximo de potência a produzir. Este poderá estar relacionado com a capacidade do inversor ou, caso este esteja sobredimensionado, o valor da potência máxima contratada para injectar na rede.

Para finalizar, é de referir que os dados de radiação solar que foram utilizados para a simulação dos dois sistemas, é uma média dos 365 dias do ano de 2005. Obtendo-se a variação da irradiação solar média ao longo de um dia (período de 24 horas com valores medidos de hora a hora). Na Figura 74 está representada a curva da irradiação solar média ao longo do dia, proveniente dos dados obtidos no serviço *online* SoDa, e utilizada na simulação dos dois sistemas.

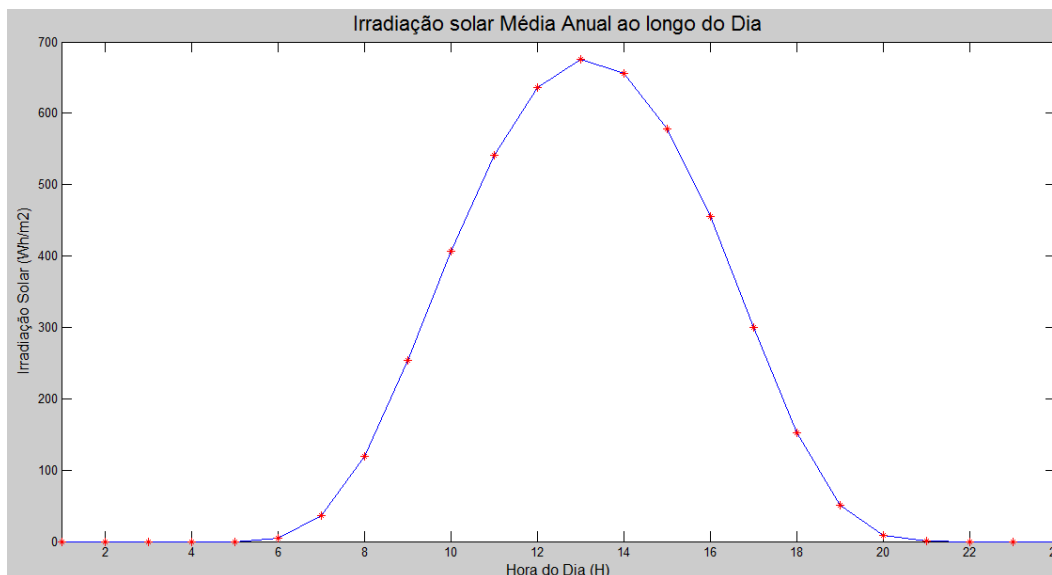


Figura 74 - Irradiação solar média ao longo do dia (ano 2005).

5.2 Análise do Sistema Estático

Para análise do sistema estático é necessário em primeiro lugar efectuar o seu dimensionamento, ou seja, calcular o número de painéis mais indicado para uma determinada instalação. Como os sistemas estáticos não possuem nenhum tipo de controlo/regulação da produção é preciso levar em conta que todos os painéis solares estarão sempre em produção, oscilando esta apenas com às variações de radiação solar ao longo do dia. Tendo isto em conta e que os valores de radiação solar são variáveis ao longo do ano, é fácil perceber que atribuir painéis solares em demasia poderá causar um excesso de produção. Isto poderá levar a exceder a potência contratada para injectar na rede e sobrecarregar o inversor, ou até mesmo a sua destruição.

Para evitar este tipo de problema, os sistemas estáticos de produção fotovoltaica são normalmente dimensionados com base em valores de radiação solar máximos para uma determinada região. Os valores de radiação solar máximos em Portugal, são observados durante o solstício de verão, em que o sol se encontra mais perto da superfície terrestre. No hemisfério norte o solstício de verão observa-se por volta de 21 de Junho.

A partir dos dados de radiação solar, correspondentes com o solstício de verão, o simulador efectua o dimensionamento (nº de painéis) do sistema estático, garantindo que na situação de maior radiação solar não se excede o valor limite de potência. Assim consegue-se garantir a segurança do inversor e o limite de potência.

Esta é a única maneira de garantir uma produção dentro dos limites para um sistema estático, mas considerando outras alturas do ano em que a radiação solar é inferior, pode-se deduzir que a potência que se produz nessas alturas não é ideal e inferior ao limite máximo, pelo

que não se estará a aproveitar todo o potencial solar nessas alturas do ano, devido a uma carência de painéis solares.

No dimensionamento do sistema estático foi usada a seguinte equação:

$$P_{m\acute{a}xima}(W) = R_{Solar} \left(\frac{W}{m^2} \right) \times \eta_{Painel} \times A_{Painel}(m^2) \times N_{Pain\acute{e}is} \leftrightarrow$$

$$\leftrightarrow N_{Pain\acute{e}is} = \frac{P_{m\acute{a}xima}(W)}{R_{Solar} \left(\frac{W}{m^2} \right) \times \eta_{Painel} \times A_{Painel}(m^2)}$$

Sabendo o limite de potência a produzir ($P_{m\acute{a}xima}$), a radiação solar no solstício de verão (R_{Solar}), o rendimento do painel (η_{Painel}) e a sua área (A_{Painel}), é possível determinar directamente o número de painéis solares necessários.

Com o dimensionamento do sistema estático, e garantia de que a potência máxima não é excedida em nenhuma ocasião, pode-se calcular a energia (em kWh) produzida ao longo do dia, custo inicial do sistema e lucro anual gerado pelo sistema. A energia gerada ao longo do dia é calculada de acordo com a seguinte equação:

$$E_{m\acute{a}xima} = \frac{R_{Solar} \left(\frac{W}{m^2} \right) \times \eta_{Painel} \times A_{Painel}(m^2) \times N_{Pain\acute{e}is}}{1000}$$

A manipulação desta equação foi utilizada anteriormente para calcular o número de painéis solares, e agora a sua forma original é utilizada para calcular a energia produzida ao longo do dia. A única variável nesta equação será a radiação solar (R_{Solar}), que foi medida de hora a hora, pelo que a unidade resultante desta equação será kWh.

Finalizando, o simulador efectua o cálculo do investimento inicial, com base no dimensionamento do sistema estático e no preço do painel solar, e retorno gerado anualmente, com base na potência produzida ao longo do dia e preço de venda da energia eléctrica.

Por uma questão de exemplificação e apresentação de valores para comparação, os dados da Tabela 20 foram introduzidos no simulador, para dimensionamento e cálculo do sistema estático. Os dados deste exemplo também serão utilizados posteriormente na simulação do sistema estático melhorado.

Potência Limite	3000W
Potência Pannel	280W
Rendimento Pannel	14%
Área Pannel	2m ²
Custo Pannel	520€
Custo Médio Adicional	30€
Preço Energia	8 Anos – 0,326€ 7 Anos – 0,185€

Tabela 20 - Dados exemplo para introdução no simulador.

A Figura 75 mostra os resultados obtidos pelo simulador para o sistema estático, de acordo com os dados inseridos (ver Tabela 20).

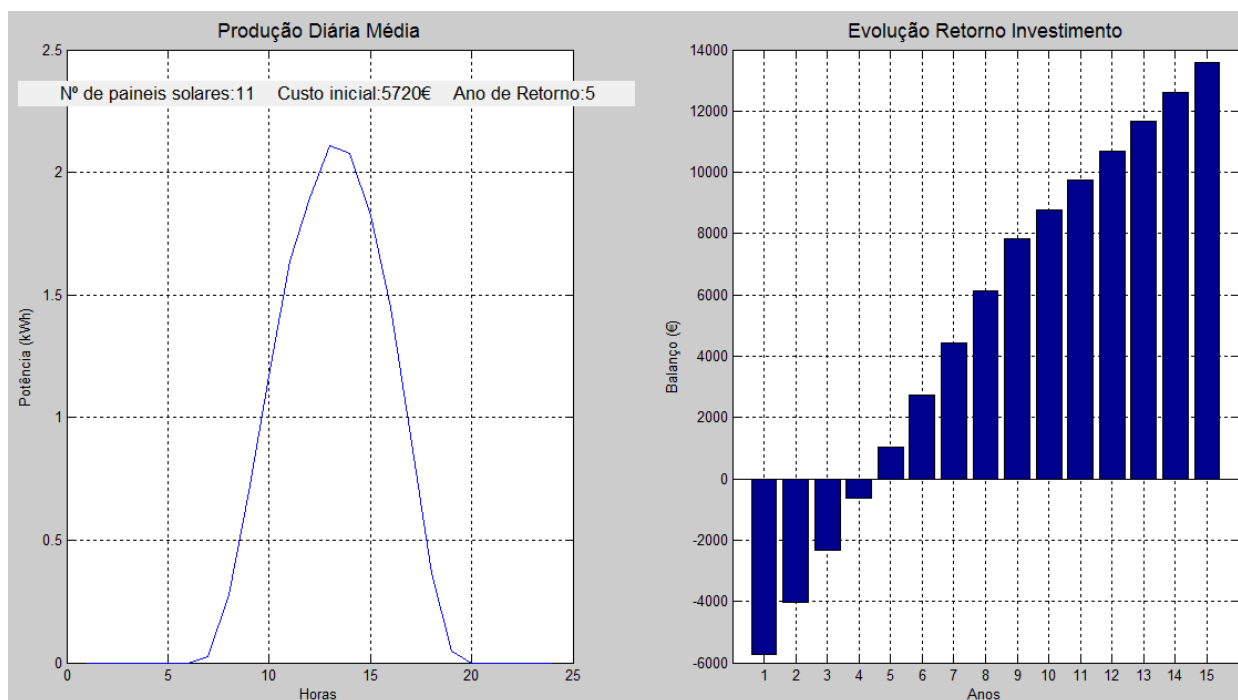


Figura 75- Resultados do dimensionamento e simulação do sistema estático.

O sistema estático dimensionado pelo simulador, e de acordo com os dados de radiação solar, terá um máximo de 11 painéis solares. Representando um investimento de 5720€, levando em conta as condições apresentadas posteriormente, o microprodutor irá ver o seu investimento retornado no quinto ano de produção.

O gráfico da esquerda representa a produção diária média que o sistema dimensionado irá apresentar. Como se pode ver, a forma do gráfico da produção é muito semelhante ao da Figura 74, demonstrando a dependência da radiação solar. Esta é uma representação dos valores diários médios, pelo que factores como nebulosidade em certos dias ou sujidade dos painéis não são visíveis. Esta é uma consideração menos realista levada a cabo na simulação.

À direita da Figura 75 é apresentada a evolução do investimento, no primeiro ano o valor apresentado é relativo ao investimento inicial, o qual será abatido ao longo dos anos pelo rendimento do sistema estático.

Esta simulação teve como objectivo, apresentar as características de produção e rendimento de um sistema estático, sendo útil mais a frente para comparação com o sistema estático melhorado.

5.3 Análise do Sistema Estático Melhorado

A análise do sistema estático melhorado tem como base a introdução do sistema de controlo de produção, ao sistema estático anterior. A ideia proposta nesta dissertação baseia-se na adição de painéis solares extra, aos dimensionados anteriormente, e aplicação do sistema de controlo de produção (discutido em 3 (Solução Proposta)).

No sistema estático era possível determinar o número de painéis inicialmente, e a partir daí efectuar os restantes cálculos. Neste caso, sistema estático melhorado, não é possível determinar inicialmente quantos painéis extra são necessários. Pelo que o simulador do sistema estático melhorado, necessita de um dado extra para dimensionar e simular o sistema, esse dado é a atribuição de limites ao número de painéis extra.

O simulador irá efectuar os cálculos para todos os números de painéis extra, contidos entre o limite superior e inferior. Como o sistema estático melhorado necessita sempre de painéis extra, o limite inferior foi considerado o número de painéis do sistema estático, enquanto o limite superior foi considerado o dobro do inferior (mas podendo tomar qualquer outro valor). Desta maneira é possível visualizar a evolução do comportamento do sistema estático melhorado, com a adição de painéis extra, até que o total de painéis represente 200% do sistema estático.

A Figura 76 apresenta três gráficos resultantes da simulação do sistema estático melhorado, de acordo com os dados da Tabela 20 e os limites impostos para o número de painéis adicionais.

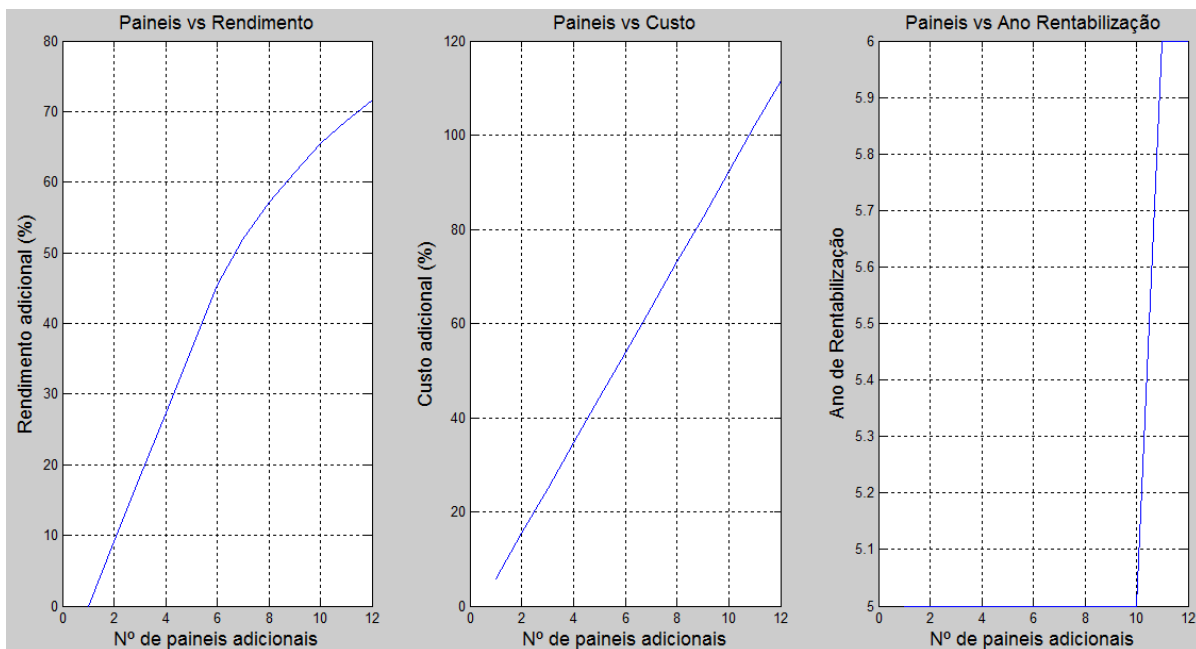


Figura 76 - Resultados do dimensionamento e simulação do sistema estático melhorado.

Como se pode observar pelo gráfico da esquerda, a adição de painéis solares e o sistema de controlo da produção, conseguem efectivamente aumentar a produção relativamente ao sistema estático. A adição de painéis, teoricamente não tem limite, mas como se pode observar a partir da adição do oitavo painel extra o ganho de rendimento por painel vai reduzindo. E como adicionar painéis extra vai aumentar o investimento inicial, é necessário criar um balanço, entre o ganho de rendimento e os custos adicionais. É aí que entra a análise do gráfico central, onde se pode observar o custo adicional pela adição de mais painéis. Como era de esperar, o gráfico apresenta uma recta, que significa que o custo adicional é linear com o aumento de painéis. O que faz sentido tendo em conta que o preço unitário do painel, e o preço médio do sistema de controlo por painel é sempre igual.

O gráfico da direita representa o ano em que microprodutor consegue rentabilizar o seu sistema, de acordo com o número de painéis extra (e o custo associado). Com a adição do décimo primeiro painel, o custo inicial é tão elevado que mesmo com o sistema de controlo de produção é necessário mais um ano para rentabilizar a instalação, relativamente ao sistema estático. Isto acontece devido à adição excessiva de painéis, que para além de aumentarem o custo da instalação excessivamente, não trazem um ganho de rendimento assim tão significativo.

Voltando novamente ao gráfico da esquerda, é possível concluir que quanto maior for a inclinação da curva maior será o rendimento adicional por painel, pelo que a partir do momento em que a curva começa a perder inclinação a adição de painéis não é tão rentável. O microprodutor querará aumentar o rendimento do seu sistema, mas dentro de um preço razoável e uma adição de painéis não muito grande.

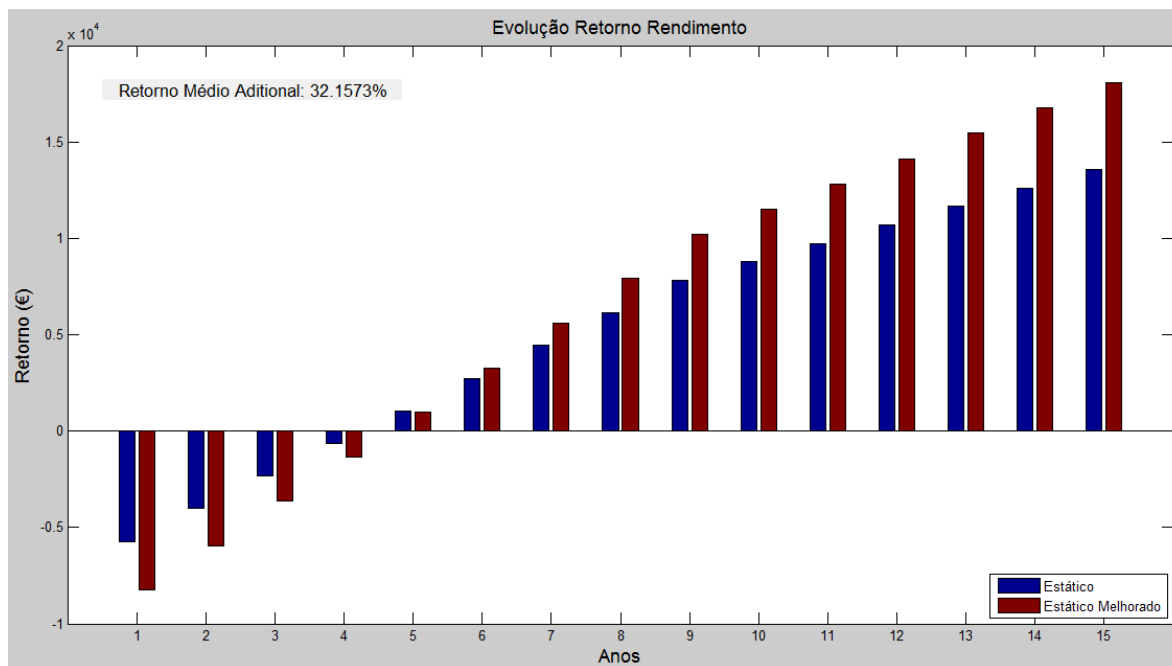


Figura 77 - Comparação do retorno de investimento, entre sistema estático e sistema estático melhorado.

A Figura 77 apresenta a evolução do retorno do investimento dos dois sistemas, como se pode observar, o sistema estático melhorado apesar de apresentar um custo inicial superior consegue retornar mais investimento que o sistema estático a partir do sexto ano. O valor adicional de retorno, criado pelo sistema de controlo de produção e adição de painéis, ronda os 32%.

Sendo assim e pelos gráficos da Figura 76 e Figura 77 pode-se afirmar, que investindo em mais 50% de painéis é possível aumentar a produção em cerca de 38% e o retorno de investimento em cerca de 32%.

Em suma, neste capítulo foi possível apresentar os dois sistemas de produção, o sistema estático e o sistema estático melhorado. Ambos foram dimensionados e simulados, sendo possível a sua comparação. Conseguiu-se assim apresentar os ganhos inerentes à utilização do sistema de controlo de produção baseado na ideia/oportunidade desta dissertação.

6 Conclusões

Após o devido estudo e análise dos requisitos impostos para controlar a produção de um sistema de microprodução fotovoltaico, implementou-se um protótipo funcional, capaz de reproduzir um comportamento dinâmico e adequado ao controlo da potência gerada para as diferentes situações de luminosidade. O sistema de controlo implementado, ainda numa fase de protótipo, apresenta grande potencial para implementação de outras funcionalidades futuras, tais como:

- Implementação de um algoritmo, que com o devido tempo, consiga determinar a existência de um ou mais painéis solares com problemas de produção. Estes problemas podem ser derivados de sujidade acumulada na parte frontal do painel ou até ficar sombreado (por exemplo por uma árvore) durante algumas partes do dia.
- Adicionar capacidades para gestão de sistemas de microprodução fotovoltaica com mais do que uma *string*.
- Criar possibilidade para aproveitamento da energia que não pode ser utilizada, por ser excessiva para uma determinada situação de luminosidade solar. Criando uma *string* secundária e paralela à primária, onde se poderiam ligar outras cargas de modo a aproveitar a energia produzida pelos painéis solares “removidos” da produção. Por exemplo para aquecimento de água ou para acumular em baterias. Desta maneira aumentando o rendimento geral desta solução.

Até à data da escrita deste trabalho, a solução implementada tinha sido apenas testada em laboratório, tanto num único painel solar como numa fonte de alimentação para simulação das variações de luminosidade. Esta solução continuará a ser desenvolvida e melhorada numa parceria entre a Universidade de Aveiro e a empresa Voltec. Nessa altura serão efectuados testes no terreno, numa instalação de microprodução real, onde se poderá avaliar mais concretamente o desempenho da solução.

Os testes reais não foram possíveis de realizar, pelo que se efectuou uma comparação entre as simulações de um sistema de microprodução tradicional e um com a solução apresentada neste trabalho. Os resultados obtidos foram bastante positivos, obtendo-se um incremento de 38% na produção de energia eléctrica com a adição extra de 50% de painéis solares, comparativamente ao sistema de microprodução tradicional. Em termos monetários, apesar do custo inicial ser mais elevado, devido à compra de 50% extra de painéis solares, a solução apresentada consegue rentabilizar o investimento no mesmo número de anos que o sistema tradicional, apresentando um aumento médio de 32% de retorno de investimento nos anos seguintes.

7 Bibliografia

- [1] Direcção Geral de Energia e Geologia, “Página inicial » Factura Energética » 2011,” [Online]. Available: <http://www.dgeg.pt/>. [Acedido em 16 Janeiro 2012].
- [2] Direcção Geral de Energia e Geologia, “Página inicial » Áreas Sectoriais » Energias Renováveis » Apresentações Energias Renováveis,” [Online]. Available: <http://www.dgeg.pt/>. [Acedido em 16 Janeiro 2012].
- [3] Direcção Geral de Energia e Geologia, “Página Inicial » Renováveis - Estatísticas Rápidas-junho 2012,” [Online]. Available: <http://www.dgeg.pt/>. [Acedido em 16 Janeiro 2012].
- [4] Earthscan, Photovoltaic Systems - Planning and Installing, UK and USA: Earthscan, 2008.
- [5] L. C. C. Marques, “Portal - Estatísticas,” [Online]. Available: http://www.renovaveisnagora.pt/c/document_library/get_file?uuid=84501fc8-4c8e-46c9-b874-35bce5ecc5c&groupId=13360. [Acedido em 6 Fevereiro 2012].
- [6] d. I. e. d. D. Ministério da Economia, “Decreto-Lei nº363_2007,” *Diário da República*, p. 7, 2 Novembro 2007.
- [7] E. F. Mapota, “Módulo fotovoltaico com seguimento da posição solar,” 2009.
- [8] J. S. M. J. L. A. Manuel Trindade, Desenvolvimento de um sistema para optimização da extracção de energia de painéis solares fotovoltaicos, Braga: Universidade do Minho - Departamento de Electrónica Industrial, 2005.
- [9] D. A. Pritchard, “Sun Tracking by Peak Power Positioning for Photovoltaic Concentrator Arrays,” Albuquerque, Novo México, 1983.
- [10] S. C. C. J. Q. S. W. L. Cui Yan, “Sun Smart Tracking Methods Based on Image Processing,” 2011.
- [11] V. Fthenakis, Third Generation Photovoltaics, Croácia: InTech, 2012.
- [12] Vishay, “Vishay - Optocouplers/Isolators,” [Online]. Available: <http://www.vishay.com/docs/83622/il300.pdf>. [Acedido em 24 Março 2012].
- [13] Microchip, [Online]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39931d.pdf>. [Acedido em 18 Novembro 2011].

- [14] Olimex, "Olimex LTD," [Online]. Available: <https://www.olimex.com/>. [Acedido em 3 8 2012].
- [15] Olimex, "PIC-P26J50-schematic," [Online]. Available: <https://www.olimex.com/Products/PIC/Proto/PIC-P26J50/resources/PIC-P26J50-schematic.pdf>. [Acedido em 22 5 2012].
- [16] T. Electronics, "T7CS5D-05 Product Details," [Online]. Available: www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7F1308242_T7C%7F0411%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_1308242_T7C_0411.pdf%7F1-1393190-8. [Acedido em 15 10 2011].
- [17] F. Semiconductors, "LM317AHV," [Online]. Available: <http://www.fairchildsemi.com/ds/LM/LM317AHV.pdf>. [Acedido em 5 11 2011].
- [18] T. Power, "TRA 1," [Online]. Available: <http://www.tracopower.com/products/tra1.pdf>. [Acedido em 19 1 2012].
- [19] A. Devices, "ADM2484E: 5 kV Signal Isolated, ESD Protected, 500 kbps, Full/Half Duplex RS-485 Transceiver," [Online]. Available: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADM2484E.pdf. [Acedido em 18 4 2012].
- [20] Wikipedia, "TIA/EIA-568," [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/TIA/EIA-568>. [Acedido em 3 10 2012].
- [21] SODA, "Solar Radiation Data," [Online]. Available: <http://www.soda-is.com>. [Acedido em 1 4 2012].
- [22] E. P. Carço, "Instalações Fotovoltaicas," CERTIEL, 2012.
- [23] Projecto "GREENPRO", Energia Fotovoltaica - Manual sobre Tecnologias, Trojecto e Instalação, ALTENER, 2004.
- [24] P. U. B. d. A. Daniel Thomazini, Sensores Industriais - Fundamentos e Aplicações, Érica, 2005.
- [25] d. I. e. d. D. Ministério da Economia, "Decreto-Lei nº118-A_2010," *Diário da República*, p. 16, 25 Outubro 2010.
- [26] M. d. E. e. d. Emprego, "Despacho DGEG de 27 de Março de 2012," *Diário da República*, p. 2, 27 Março 2012.
- [27] M. d. E. e. d. Emprego, "Despacho DGEG de 26 de Dezembro de 2011," *Diário da República*, p. 2, 26 Dezembro 2011.

-
- [28] d. l. e. d. D. Ministério da Economia, “Portaria nº1185_2010,” *Diário da República*, p. 1, 17 Novembro 2010.
- [29] d. l. e. d. D. Ministério da Economia, “Portaria nº1278_2010,” *Diário da República*, p. 2, 16 Dezembro 2010.
- [30] SoDa, “SoDa Service - Knowledge in Solar Radiation,” [Online]. Available: <http://www.soda-is.com/eng/index.html>. [Acedido em 8 Maio 2012].
- [31] Texas Instruments, “RS-422 and RS-485 Standards Overview and System Configurations,” [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/an/slla070d/slla070d.pdf>. [Acedido em 27 1 2012].

8 Anexos

8.1 Fabricação de Células Solares

Para o processo de fabrico de uma célula solar, e como foi referido anteriormente, é necessário silício. O silício encontra-se em quantidades abundantes no nosso planeta, só que encontra-se no seu estado impuro. Na sua forma impura pode ser encontrado sob a forma de areia ou quartzo, estes materiais são origem de reacções químicas que se deram na natureza, entre o silício e o oxigénio. Para que seja possível fabricar células solares, é necessário atingir um elevado grau de pureza, superior ao encontrado em componentes de electrónica.

De modo a atingir a pureza necessária o quartzo ou a areia são sujeitos a dois processos de purificação. A purificação é principalmente a remoção do oxigénio que se encontra ligado com os átomos do silício. No primeiro processo, a areia ou o quartzo são introduzidos num forno de arco eléctrico juntamente com carbono. Esta mistura é então aquecida até cerca de 1800°C. O resultado deste processo é dióxido de carbono e silício com cerca de 98% de pureza. Este nível de pureza ainda não é suficiente para a produção de células solares.

O silício obtido no primeiro processo de purificação é sujeito a um segundo processo, chamado de *Processo Siemens*. É um processo iterativo de destilação do silício e que permite obter silício com um elevado grau de pureza. Neste processo o silício é finamente moído e misturado com cloreto de hidrogénio, a reacção destes dois materiais dá origem a hidrogénio e triclorosilano. Estes dois gases são então ventilados para o interior de um reactor, onde se encontram finas hastes de silício muito puro, e aquecidos a uma temperatura de cerca de 1200°C. Ao longo deste processo o silício proveniente do triclorosilano vai-se depositando nas hastes do reactor, em forma de pequenos cristais, formando assim o polissilício. O polissilício já é uma forma do silício suficientemente pura ($\approx 99,99\%$) para a fabricação de células solares.

Após a obtenção de silício puro é necessário processá-lo de modo a criar um bloco único de silício, de onde serão cortadas as células solares, através de uma serra de fio. Consoante se pretende fabricar células monocristalinas ou policristalinas o processo de criação do bloco irá variar. Para a produção das primeiras é utilizado o método de *Czochralski*, que permite cristalizar o polissilício num único cristal. Neste método o polissilício é introduzido num depósito e fundido a cerca de 1400°C. Assim que o polissilício estiver totalmente fundido é introduzida uma “semente” na fundição. A “semente” ao estar inserida na fundição começa a girar e a efectuar um movimento de ascensão, para fora da fundição. No final do processo obtém-se um único cristal de silício, daí o nome das células produzidas por este processo serem chamadas de monocristalinas. A “semente” que é utilizada neste processo não é mais que um pequeno cristal de polissilício. Na Figura 78

pode-se observar uma ilustração representativa das etapas deste processo.

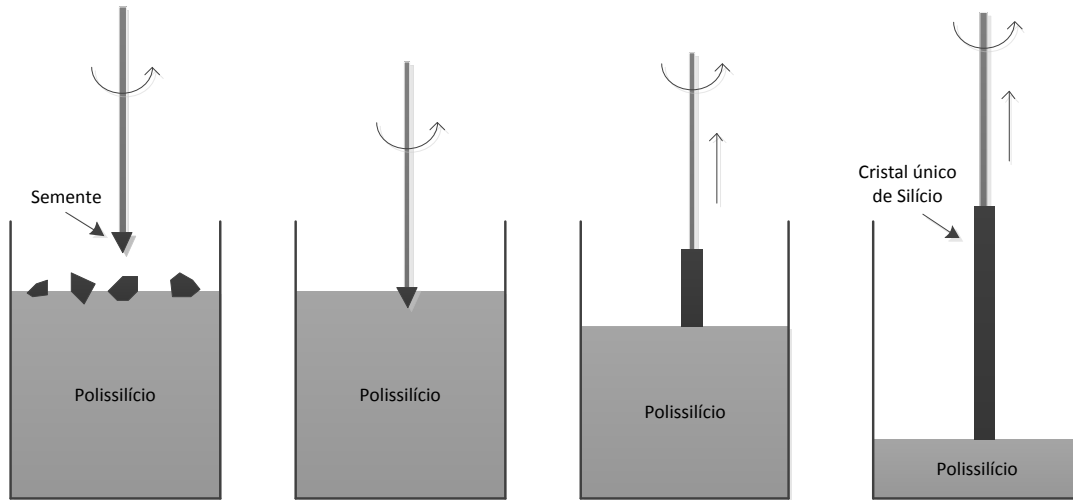


Figura 78 - Ilustração método Czochralski.

Cortadas as células solares do cristal, estas são limpas e quimicamente desbastadas. De seguida dá-se início ao processo de dopagem do silício. O processo de dopagem não é mais que a adição de impurezas ao silício. A dopagem irá criar uma junção P-N, que é o coração de uma célula solar, esta junção ao ser submetida a luz solar irá gerar uma corrente e por sua vez energia.

As células solares inicialmente já se encontram dopadas positivamente (P), isto ocorreu durante o processo de formação do cristal. O boro é a impureza utilizada na criação desta camada. O *layer* correspondente à dopagem negativa (N) é feito posteriormente através de uma difusão de fósforo. A célula é introduzida num forno de difusão a cerca de 900°C com o respectivo gás de fósforo, isto irá dopar a superfície superior da célula negativamente.

Agora que a junção P-N já está completamente formada é necessário criar as ligações eléctricas. Na parte frontal da célula são impressas as linhas que vão receber a corrente gerada, estas linhas prolongam-se até à parte posterior da célula onde serão ligadas a contactos eléctricos, de modo a facilitar a ligação a outras células solares. As linhas tendem a ser o mais finas possível, de modo a não bloquearem uma área muito grande de recepção solar. O material utilizado pode ser cobre, alumínio ou níquel.



Figura 79 – Pormenor de linhas de ligação da célula solar (mais finas) a barramento (mais grosso).

Após a produção da célula, esta tem um índice de reflexão muito elevado, o que iria reflectir uma grande parte da luminosidade solar, prejudicando a produção. De modo a reduzir a reflexão é aplicada uma camada de dióxido de titânio ou óxido de silício na face posterior da célula. Isto aumenta a concentração da luminosidade solar, reduzindo a reflexão.

Para finalizar a célula solar é encapsulada em borracha de silicone ou acetato de vinilo etileno para a proteger dos agentes ambientais, como a humidade e poeiras.

Até aqui foi explicado o processo de produção de uma célula solar monocristalina, o processo é bastante idêntico para outro tipo de células. No caso das células policristalinas, a única diferença reside na criação do bloco de cristal. Em vez do método de Czochralski, o polissilício é fundido num depósito, normalmente de forma quadrada, onde será arrefecido uniformemente num determinado sentido. O bloco ao ser arrefecido faz com que o polissilício comece a cristalizar, só que ao invés do método de Czochralski serão formados vários cristais ligados entre si, daí o nome policristalinas. Na Figura 80 do lado esquerdo, pode-se observar o processo de formação do bloco de cristal para fabrico de células policristalinas.

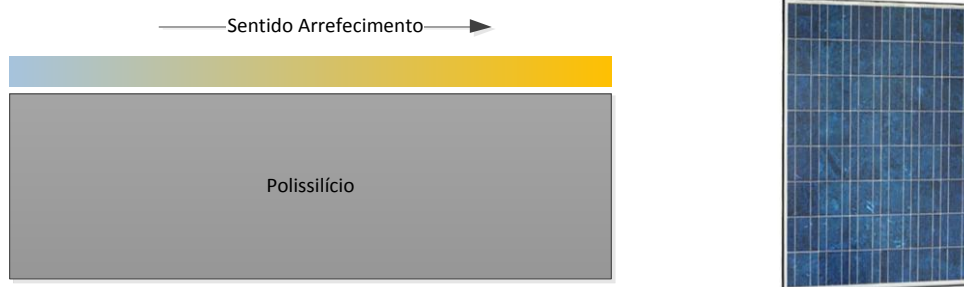
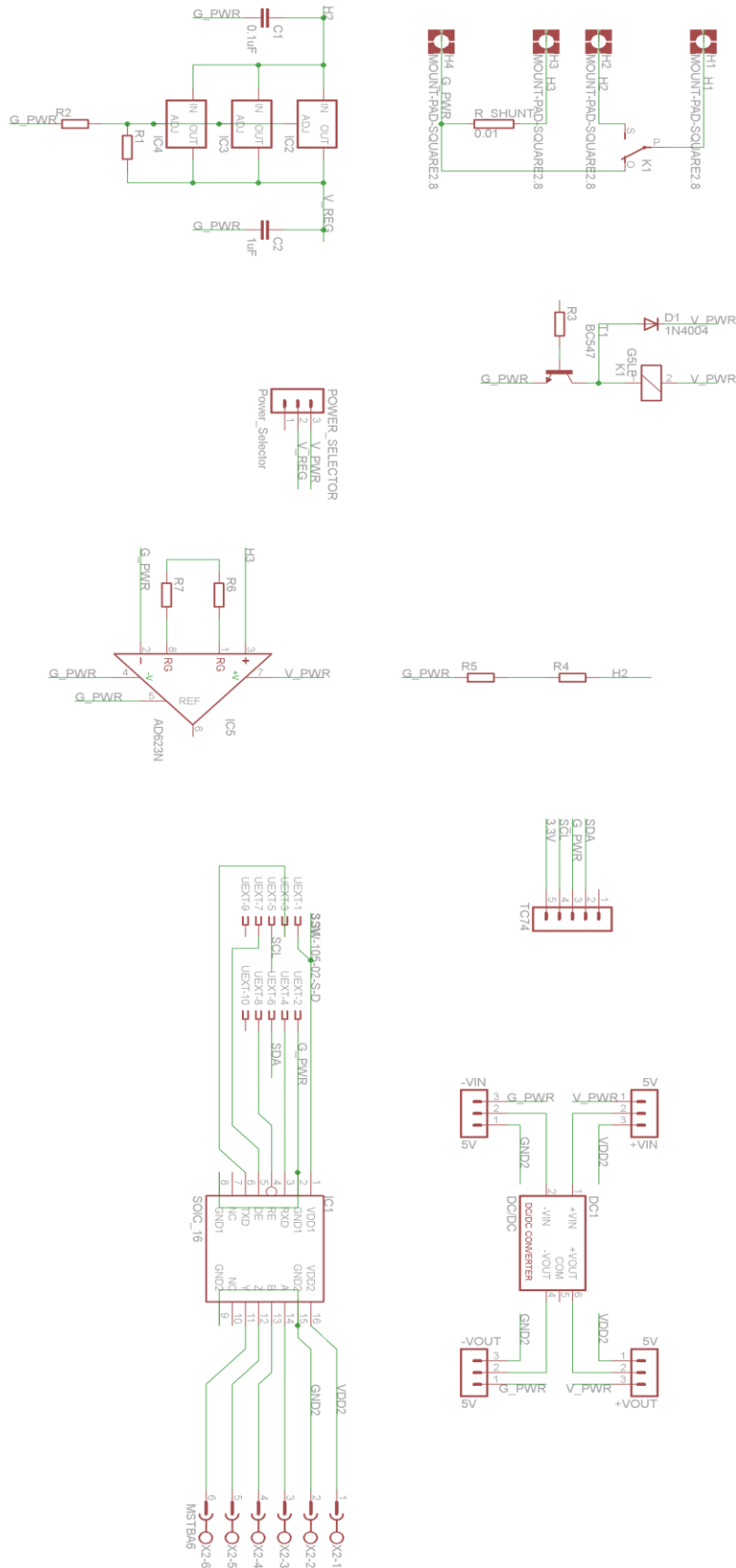
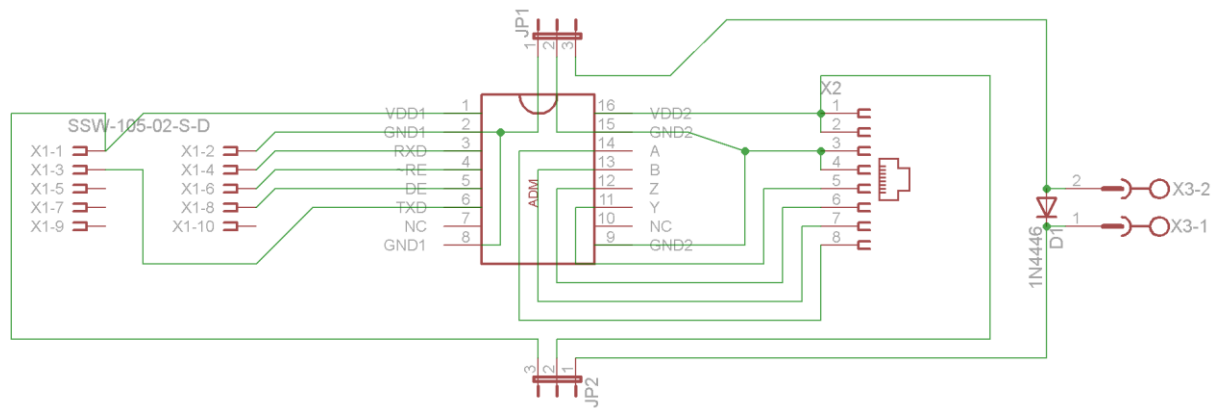


Figura 80 - Processo de formação do cristal para célula policristalina (esquerda) e aspecto de uma célula policristalina (direita).

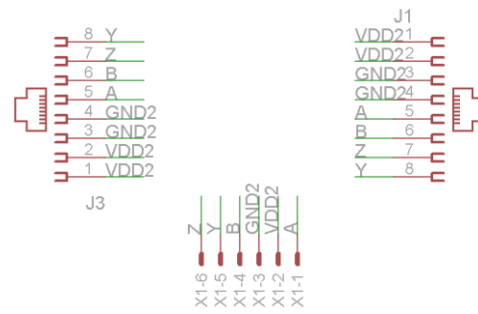
8.2 Esquema Eléctrico Módulo Painel



8.3 Esquema Eléctrico Adaptador Módulo Central



8.4 Esquema Eléctrico Adaptador Módulo Painel



8.5 Mensagens da Comunicação

Este anexo tem como propósito aprofundar um pouco mais a análise das comunicações implementadas. A implementação física, topologia e gestão já foi apresentada no corpo principal da dissertação, sendo que aqui será detalhado o conteúdo das várias mensagens implementadas, e que são trocadas entre o módulo central (Master) e os módulos painel (Slaves).

As comunicações implementadas são em modo confirmado, o que implica uma resposta por parte do Slave a uma pergunta do Master, ficando este último informado do sucesso (ou não) da mensagem enviada. A resposta não só indica a sua aquisição pelo Slave, como transporta informação indicando ao Master que o conteúdo da pergunta foi bem interpretado e também se o comando indicado na pergunta foi aplicado com sucesso.

Nas comunicações implementadas, a mensagem do Master (ou pergunta) terá sempre o mesmo comprimento, só a mensagem do Slave (ou resposta) terá um comprimento variável consoante o pedido do Master. Na Tabela 21 está a composição da pergunta enviada pelo Master, em que todos os campos são considerados de 8bits (1byte), exceptuando os casos indicados na tabela.

Pergunta Master									
0xFF	0xFF	Master ID	Slave ID	Comando	Valor Comando H (2bytes)	Valor Comando L (2bytes)	CRC16 (2bytes)	0xFE	0xFE

Tabela 21 - Estrutura mensagem da pergunta Master.

Consoante o comando os Slaves saberão como processar a mensagem, e se devem adquirir os valores *High* e *Low* do comando, isto após a verificação do remetente (Master ID), destinatário (Slave ID) e CRC16. Na Tabela 22 é possível observar a utilidade dos valores comando, consoante o número do comando e o significado dado aos valores.

Lista de Comandos	
0	Leitura de valores Painel (Valores do Comando são ignorados)
1	Actuação Estado Relé (Valor Comando L = 0, remove painel da produção; Valor Comando L = 1, adiciona painel à produção)
2	Configuração da Tensão de Segurança do Painel (Valor Comando H = Tensão de Segurança, byte mais significativo = parte inteira do valor, byte menos significativo = parte decimal do valor)
3	Sinalização do Painel (Valor Comando L = 1, activa sinalização)
4	Modo Manual para Controlo do Relé (Valor Comando L = 0, para relé aberto)

Tabela 22 - Consideração dos campos "Valor Comando" e seu significado consoante o comando.

De seguida serão apresentadas as respostas do Slave consoante o comando enviado pelo Master.

Resposta do Slave ao Comando "0"											
0xFF	0xFF	Master ID	Slave ID	Comando	Valor Tensão (2bytes)	Valor Corrente (2bytes)	Temperatura	Estado Produção	CRC16 (2bytes)	0xFE	0xFE

Tabela 23 - Campos da mensagem de resposta do Slave ao comando "0".

Resposta do Slave ao Comando "1" e "4"									
0xFF	0xFF	Master ID	Slave ID	Comando	OK + Estado Produção (3bytes)	CRC16 (2bytes)	0xFE	0xFE	

Tabela 24 - Campos da mensagem de resposta do Slave ao comando "1" e "4".

Resposta do Slave ao Comando "2" e "3"									
0xFF	0xFF	Master ID	Slave ID	Comando	OK (2bytes)	CRC16 (2bytes)	0xFE	0xFE	

Tabela 25 - Campos da mensagem de resposta do Slave ao comando "2" e "3".

8.6 Datasheet Inversor SunnyBoy 700-US



SUNNY BOY 700-US



SB 700U 150 VDC / SB 700U 200 VDC / SB 700U 250 VDC



<p>UL Certified</p> <ul style="list-style-type: none"> For countries that require UL certification (UL 1741/IEEE 1547) 	<p>Safe</p> <ul style="list-style-type: none"> Galvanic isolation due to integrated transformer 	<p>Simple</p> <ul style="list-style-type: none"> Simple installation thanks to three-point mounting assembly 	<p>Flexible</p> <ul style="list-style-type: none"> Three different input voltage ranges Modular addition for all applications
--	---	--	--

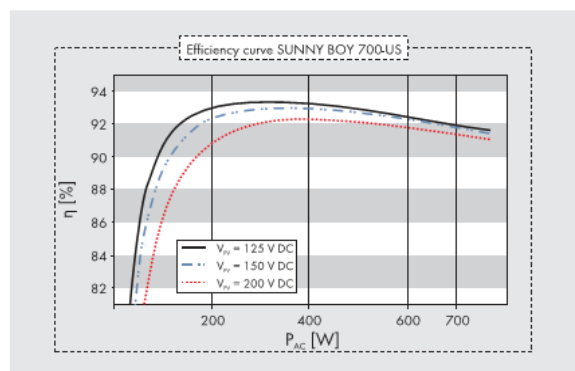
SUNNY BOY 700-US

The versatile choice for any system configuration

The SMA Sunny Boy 700-US was SMA's first mass-produced string inverter and it continues to enjoy immense popularity in today's solar market. Its compact size and economical price make it ideal for starter or demonstration systems. It is also perfectly suited for adding a bit more power to an existing solar system. Its modular design makes expansion to almost any size easy. Three different configurable input voltage ranges make the Sunny Boy 700-US a versatile choice, whatever your system configuration.

Technical data	SB700-US	SB700-US	SB700-US
	150 V DC	200 V DC	250 V DC
Input (DC)			
Max. recommended PV power (@ module STC)	575 W	750 W	875 W
Max. DC power (@ cos φ = 1)	510 W	670 W	780 W
Max. DC voltage	150 V	200 V	250 V
DC nominal voltage	95 V	125 V	150 V
MPP voltage range	77 V - 120 V	100 V - 160 V	125 V - 200 V
Min. DC voltage / start voltage	75 V / 95 V	100 V / 125 V	125 V / 150 V
Max. input current / per string		7 A / 7 A	
Number of MPP trackers / strings per MPP tracker		1 / 2	
Output (AC)			
AC nominal power	460 W	600 W	700 W
Max. AC apparent power	460 VA	600 VA	700 VA
Nominal AC voltage / adjustable		120 V / -	
AC voltage range		106 V - 132 V	
AC grid frequency; range		60 Hz; 59.3 - 60.5 Hz	
Max. output current	4.4 A	5.7 A	6.6 A
Power factor (cos φ)	1	1	1
Phase conductors / connection phases	1 / 1	1 / 1	1 / 1
Harmonics	< 3%	< 3%	< 3%
Efficiency			
Max. efficiency	92.4%	93.3%	93.6%
CEC efficiency	91.5%	91.5%	91.5%
Protection devices			
DC reverse-polarity protection	●	●	●
AC short circuit protection	●	●	●
Galvanically isolated / all-pole sensitive monitoring unit	●/-	●/-	●/-
Protection class / overvoltage category	I / III	I / III	I / III
General data			
Dimensions (W / H / D) in mm (in)		322 / 290 / 180 (13 / 11 / 7)	
DC disconnect dimensions (W / H / D) in mm (in)		-	
Packing dimensions (W / H / D) in mm (in)		390 / 390 / 230 (15 / 15 / 9)	
DC disconnect packing dimensions (W / H / D) in mm (in)		-	
Weight / DC disconnect weight		23 kg (51 lb) / -	
Packing weight / DC disconnect packing weight		26 kg (57 lb) / -	
Operating temperature range (full power)		-25 °C ... +45 °C (-13 °F ... +113 °F)	
Noise emission (typical)	-	-	-
Internal consumption at night	0.1 W	0.1 W	0.1 W
Topology	LF transformer	LF transformer	LF transformer
Cooling concept	convection	convection	convection
Electronics protection rating / connection area	NEMA 3X / NEMA 3X	NEMA 3X / NEMA 3X	NEMA 3X / NEMA 3X
Features			
Display: text line / graphic	●/-	●/-	●/-
Interfaces: RS485 / Bluetooth	○/-	○/-	○/-
Warranty: 10 / 15 / 20 years	●/○/○	●/○/○	●/○/○
Certificates and permits (more available on request)	UL1741, UL1998, IEEC 1547, FCC Part 15 (Class A & B), CSA C22.2 No. 107.1-2001		
Data at nominal conditions			
● Standard features ○ Optional features - Not available			
Type designation	SB 700U 150 VDC	SB 700U 200 VDC	SB 700U 250 VDC

SUNNYBOY/7000US103917 - Sunny Boy and SMA are registered trademarks of SMA Solar Technology AG. Text and figures comply with the state of the art applicable when printing. Subject to technical changes. We accept no liability for typographical and other errors. Printed on chlorinated paper.



Accessories

RS485 interface
485USPB-NR

Toll Free +1 888 4 SMA USA
www.SMA-America.com

SMA America, LLC

8.7 Datasheet SUNPORT 72M



CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Máxima potencia de salida:

- 72 células de silicio monocristalino de 156 x 156 mm con 16,6% de eficiencia, conexión serie asegurando la máxima potencia en cualquier situación. Eficiencia final del módulo: 14%.
- Soldadura automática por infrarrojo.

Robustez constructiva:

- Marco de aluminio anodizado de 50 mm.
- Vidrio templado de 4 mm.
- Encapsulante EVA (Etil Vinil Acetato).
- Aislante eléctrico posterior en Pet/Pet/Primer.

Calidad:

Todos los módulos son verificados y testados eléctricamente incorporando su hoja de datos individual.

DESIGN FEATURES

Maximized power output:

- 72 monocrystalline cells of 156 x 156 mm. with 16,6% efficiency give highest output power even in low conditions. 14% of module efficiency.
- Automatic infrared welding system.

Robust and reliable construction:

- Extra thick 50mm anodized aluminium frame.
- High transmission tempered glass of 4 mm.
- EVA encapsulant (Ethylene Vinyl Acetate).
- Backsheet with Pet/Pet/Primer.

Quality:

Every module is tested electrically, attaching his own data sheet.

CERTIFICACIÓN

- Módulo diseñado y fabricado según UNE-EN 61215 (IEC-61215).
- Certificado nº A98/000003, emitido por AENOR IEC-61215:97
- Certificado por Cener.
- Certificado CE.

CERTIFICATION

- Module designed and made as UNE-EN 61215 (IEC-61215).
- Certified nº A98/000003, emitted by AENOR IEC-61215:97
- Certified by Cener.
- Conformity certificate CE.

SUNPORT 72M

MODULO SOLAR MONOCRISTALINO

280Wp

FABRICADO EN ESPAÑA / MADE IN SPAIN





CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

Potencia máxima ($\pm 3\%$)	Pmpp	280 [W]
Tensión punto de máxima potencia	Vmpp	35,89 [V]
Corriente punto máxima potencia	Impp	7,81 [A]
Tensión de circuito abierto	Voc	46,98 [V]
Corriente de cortocircuito	Isc	8,36 [A]

*Valores referidos a condiciones estándar de ensayo (STC): Radiación de 1000 W/m² con espectro AM 1.5 y temperatura de célula de 25°C.

Temperatura normal de operación	NOCT	47°±2 [°C]
---------------------------------	------	------------

*NOCT: Temperatura de célula normal de operación; Radiación de 800 W/m², temperatura ambiente de 20° C, velocidad del viento 1m/s.

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

Peak Power ($\pm 3\%$)	Pmpp	280 [W]
Voltage at maximum power	Vmpp	35,89 [V]
Current at maximum power	Impp	7,81 [A]
Open circuit voltage	Voc	46,98 [V]
Short circuit current	Isc	8,36 [A]

*The electrical specifications are under test conditions of irradiance of 1000W/m², spectrum of 1.5, air mass and cell temperature of 25°C.

Nominal operation cell temperature	NOCT	47°±2 [°C]
------------------------------------	------	------------

*NOCT Nominal operation cell temperature. Radiation at 800W/m², 20°C

COEFICIENTES DE TEMPERATURA / TEMPERATURE COEFFICIENTS

Coef. Temp. Pot. Tk (Pn)	-0,44 %/°C
Coef. Temp. tensión circuito abierto. Tk (Voc)	-149,2 mV/°C
Coef. Temp. corriente de cortocircuito. Tk (Isc)	2,1 mA/°C

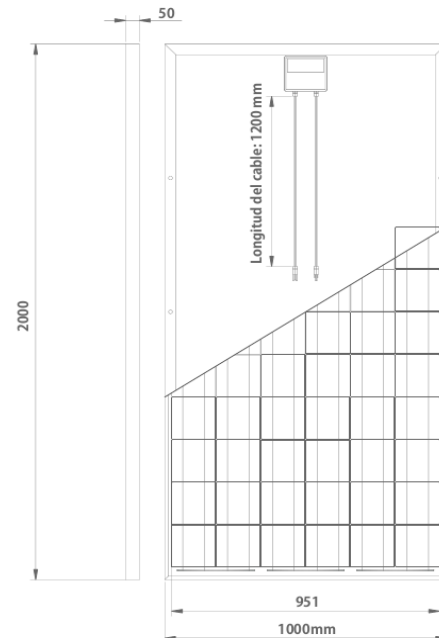
GARANTÍA

5 años de garantía en materiales o defectos de fabricación.
Garantía de producción del 90% a 10 años y del 80% a 25 años.

WARRANTY

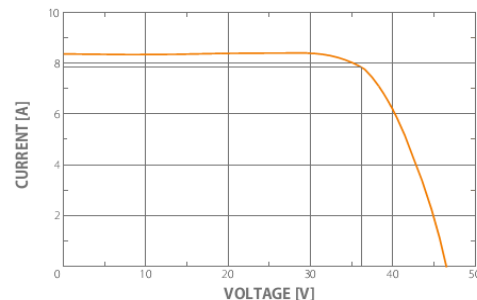
5 years limited warranty on material and workmanship.
Guarantee of production of 90% to 10 years and of 80% to 25 years.

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS / MECHANICAL DATA



	Ancho/Width	Largo/Length	Prof./Depth
Dimensiones / Dimensions	1000mm.	2000mm.	50mm.
Peso / Weight	25kg		
Conexiones	Caja y conectores tipo TYCO IP65; Longitud del cable 1200 mm x 4mm (Certificado TÜV)		
Connections	TYCO Junction box and cable; Cable length 1200 mm x 4 mm (TÜV Certificate)		

CURVA V - I / V - I CURVE



El diseño y las especificaciones técnicas pueden modificarse sin previo aviso. La presente hoja de datos sustituye a las anteriores.
Design and specifications are subject to change without notice.

Rev. 06/04/2009

Quantum Solar, S. L.
www.cuantumsolar.com

info@cuantumsolar.com

C/ Río Rudrón nº 6 / nave 8
cp. 09195 Villariego (Burgos) - SPAIN
T: +34 947 29 14 29 F: +34 947 29 14 30

