

Mestrado Integrado em Engenharia Química

***Implementação e Estudo de um Colector Solar do
Tipo Termossifão e de um Sistema de Painéis
Fotovoltaicos***

Tese de Mestrado

de

Catarina Isabel Almeida Ferreira

Desenvolvida no âmbito da disciplina de Dissertação

realizado em

NORQUENTE® / Departamento de Engenharia Química



NORQUENTE®



Orientador na FEUP: Prof. Fernão Magalhães

Orientador no DEQ: Eng. Luís Carlos Matos



Departamento de Engenharia Química

Setembro de 2010

Agradecimentos

Terminada esta etapa da minha vida, quero deixar aqui os meus sinceros e profundos agradecimentos a todos os que me acompanharam e apoiaram nesta jornada. Em particular, quero agradecer a quem tornou possível a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Armando e Maria Aida, por todo o seu amor, paciência e compreensão. Ao meu irmão, Luis, pelo apoio, conselhos e discussões. Sem eles, com certeza, não seria o que sou hoje.

Ao meu amigo e orientador empresarial, Luís Carlos, por todo o apoio, carinho e amizade incondicionais, por toda a dedicação, conselhos e conhecimentos transmitidos, que levo para a vida.

Ao meu orientador académico, Prof. Doutor Adélio Mendes, pelos conhecimentos, atenção e incentivo ao longo deste trabalho.

À empresa NORQUENTE® pela oferta do colector solar térmico sobre o qual trabalhei, e em especial ao Dr. António Martins, Eng. Tiago Martins e Sr. José, pela agradável recepção, disponibilidade e atenção prestadas.

Ao meu colega Ilídio, pela grande ajuda e companheirismo nos momentos de maior dificuldade.

Ao Prof. Elmano Margato, professor no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, por toda a atenção e todos os esclarecimentos prestados.

Ao Prof. Rui Castro, professor no Instituto Superior Técnico, pela documentação cedida e pelos esclarecimentos dados.

Resumo

A energia solar é a fonte de energia mais abundante na Terra, sendo uma fonte de energia limpa e inesgotável. Esta energia pode ser convertida em energia térmica através da absorção da radiação, ou em energia eléctrica através do efeito fotovoltaico. Neste contexto, o presente trabalho consistiu na implementação e estudo de um colector solar térmico do tipo termossifão, oferecido pela empresa NORQUENTE[®], e de um sistema de dois painéis fotovoltaicos. Estas unidades experimentais serão usadas nas aulas práticas do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Química.

O colector solar térmico e o sistema de painéis fotovoltaicos foram instrumentados com termopares, caudalímetros e multímetros ligados a um sistema de aquisição e tratamento dos sinais lidos, permitindo o registo de todas as variáveis operatórias relevantes. Relativamente ao sistema de painéis fotovoltaicos, foi ainda projectado e instalado um sistema de suporte que, para além de robusto, permite a rotação dos painéis em inclinação e azimute. O desenvolvimento dos programas informáticos de aquisição de dados e a calibração da instrumentação foram passos intermédios mas cruciais para a realização do trabalho experimental.

Do estudo efectuado ao colector solar térmico, observou-se um aumento da eficiência global com a diminuição da potência da radiação solar e com o aumento do caudal de alimentação de água fria. Verificou-se também que as eficiências térmicas obtidas estavam próximas do valor dado nas especificações do equipamento, 73 %. Relativamente ao sistema de painéis fotovoltaicos, o ângulo de inclinação óptimo não varia tão significativamente com a hora do dia e foi de $(20 \pm 1)^\circ$ no dia 21 de Maio, entre as 11h00 e as 15h00; no entanto, o ângulo de azimute óptimo varia directamente com a hora do dia, entre 100° e 270° no dia 17 de Junho. Observou-se a diminuição da eficiência com o aumento da temperatura dos painéis fotovoltaicos. Por outro lado, verificou-se que a eficiência diminuía com o aumento da potência da radiação solar. Por fim, observou-se um decréscimo na eficiência quando a superfície dos painéis foi coberta com pó de talco.

Abstract

Solar energy is the most abundant energy available on Earth; it is a clean and inexhaustible source of energy. This kind of energy can be converted in to heat through absorption of radiation or into electricity through the photovoltaic effect. The aim of this work was the implementation and study of a thermo solar collector (thermosiphon), kindly offered by NORQUENTE[®], and of a system of two photovoltaic panels. Both experimental setups will be used in the lab classes of the Master in Chemical Engineering.

The solar collector system and photovoltaic panels were equipped with thermocouples, flowmeters and multimeters connected to a data acquisition system and signal treatment, allowing the record of all relevant data. For the system of photovoltaic panels, a robust support was also designed and installed and it allows rotation of the panels concerning inclination and azimuth. The development of data acquisition software and the calibration of the probing instruments were intermediate steps but crucial to the experimental work.

In the thermo solar collector it was observed an increase of the global efficiency with the decrease of the power of solar radiation and with the increase of the flow rate of fresh water. The thermal efficiency obtained experimentally was in agreement with the relevant specifications of the equipment. The optimal inclination of the photovoltaic panels is more stable relative to the time and it was $(20 \pm 1)^\circ$ on May 21st, from 11h00 to 15h00; on the other hand, the azimuth changes directly with the time of day, between 100° and 270° on July 17th. It was observed a decrease of the efficiency with the increase of the temperature of the photovoltaic panels. Moreover, it was concluded that the efficiency decreased with solar power radiation. Finally, it was observed that when the panels' surface was covered with talk powder, the efficiency declined.

Índice

Índice	i
Índice de Tabelas	ii
Índice de Figuras.....	iii
Notação e Glossário	v
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento e Apresentação do Projecto	1
1.2 Contributos do Trabalho.....	3
1.3 Organização da Tese	3
2 Estado da Arte	4
3 Descrição Técnica e Discussão dos Resultados	9
3.1 Colector Solar Térmico	9
3.1.1 Instalação e Sistema de Aquisição	11
3.1.2 Resultados e Discussão	15
3.2 Sistema de Painéis Fotovoltaicos	23
3.2.1 Instalação e Sistema de Aquisição	25
3.2.2 Resultados e Discussão	28
4 Conclusões.....	48
5 Avaliação do trabalho realizado.....	49
5.1 Objectivos Realizados.....	49
5.2 Limitações e Trabalho Futuro	50
5.3 Apreciação final.....	50
Referências	51
Anexo 1 Licença de certificação do colector solar térmico da NORQUENTE®.....	53
Anexo 2 Processo de produção dos colectores solares térmicos da NORQUENTE®	54
Anexo 3 Folha de especificações de um painel fotovoltaico KC85GX-2P da Kyocera® ...	57
Anexo 4 Curvas I-V para a variação do azimute do painel, no dia 17 de Junho de 2010.	59
Anexo 5 Manual de Experiências	62

Índice de Tabelas

Tabela 3.1.1 - Características dadas pelo fornecedor de um módulo do colector solar térmico [16].....	10
Tabela 3.2.1 - Características dadas pelo fornecedor de um módulo.....	24
Tabela 3.2.2 - Características eléctricas nas condições STC, para um módulo e para dois módulos ligados em série.....	32
Tabela 3.2.3 - Parâmetros para as condições referência	33
Tabela 3.2.4 - Potências máximas adquiridas com vários ângulos de inclinação no dia 21 de Maio 11h00.....	37
Tabela 3.2.5 - Resultados experimentais e teoricamente previstos a diferentes horas do dia 17 de Junho de 2010	43
Tabela 3.2.6 - Eficiências experimentais e calculadas pelo modelo obtidas a diferentes potências de radiação solar	46

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Colector solar térmico plano (adaptado de [9]).....	5
Figura 2.2 - Esquema de funcionamento de um CPC (adaptado de [11]).....	5
Figura 2.3 - Esquema de funcionamento de um tubo de vácuo (adaptado de [12])	6
Figura 2.4 - Exemplo de montagem de colectores solares térmicos por: (a) circulação natural (sistema de termossifão) e (b) circulação forçada (adaptado de [13])	7
Figura 2.5 - Esquema de funcionamento de uma célula fotovoltaica	8
Figura 3.1.1 - Colector solar térmico NORQUENTE®	9
Figura 3.1.2 - Esquema da instalação da instrumentação no colector solar térmico.....	11
Figura 3.1.3 - Medidores de caudal das correntes de (a) entrada e (b) saída	12
Figura 3.1.4 - Caixa de instrumentação: (a) placas de aquisição, transmissores, resistências e (b) fonte de alimentação	13
Figura 3.1.5 - Aspecto do programa de aquisição para o colector solar.....	14
Figura 3.1.6 - Radiação solar absorvida, reflectida, transmitida e emitida	15
Figura 3.1.7 - Eficiências globais e potências úteis obtidas para diferentes potências de radiação solar, a um caudal de alimentação de água de $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$	19
Figura 3.1.8 - Eficiências globais e potências úteis obtidas para diferentes potências de radiação solar, a um caudal de alimentação de água de $15 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$	20
Figura 3.1.9 - Eficiências globais e potências úteis obtidas para diferentes potências de radiação solar, a um caudal de alimentação de água de $26 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$	21
Figura 3.1.10 - Eficiências globais obtidas para diferentes irradiâncias médias e para os diferentes caudais de alimentação de água	22
Figura 3.2.1 - Sistema de painéis fotovoltaicos KC85GX-2P da Kyocera®	23
Figura 3.2.2 - Suporte do painel com sistema de rotação em: (a) azimute e (b) inclinação	25
Figura 3.2.3 - Localização dos termopares: (a) temperatura ambiente e (b) superfície	25
Figura 3.2.4 - Esquema das ligações efectuadas.....	26
Figura 3.2.5 - Aspecto do programa de aquisição para o sistema de painéis fotovoltaicos ...	27

Figura 3.2.6 - Circuito eléctrico equivalente aos dois módulos fotovoltaicos que alimentam a carga Z	28
Figura 3.2.7 - Gráfico exemplificativo para determinação da corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto e corrente e tensão máximas.....	32
Figura 3.2.8 - Curvas características I-V e P-V para irradiação solar de $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ e temperatura das células de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, para os dois módulos ligados em série.....	33
Figura 3.2.9 - Curvas I-V para variação da temperatura das células.....	34
Figura 3.2.10 - Curvas I-V com variação da potência da radiação solar, para temperatura das células de $25 \text{ }^\circ\text{C}$	35
Figura 3.2.11 - Ângulo de inclinação solar (adaptado de [27])	36
Figura 3.2.12 - Curvas I-V para a variação da inclinação do painel, para o dia 21 de Maio, por volta das 11h00	37
Figura 3.2.13 - Curvas I-V para a variação da inclinação do painel, para o dia 21 de Maio, por volta das 12h00	38
Figura 3.2.14 - Curvas I-V para a variação da inclinação do painel, para o dia 21 de Maio, por volta das 14h00	39
Figura 3.2.15 - Curvas I-V para variações de 1° na inclinação do painel, para o dia 21 de Maio, por volta das 15h00	40
Figura 3.2.16 - Posição do Sol ao longo do dia, ângulos de azimute e altitude (adaptado de [27])	41
Figura 3.2.17 - Curvas I-V para a variação do azimute do painel, para o dia 17 de Junho, por volta das 10h30	42
Figura 3.2.18 - Curvas I-V experimentais com variação da temperatura de funcionamento das células fotovoltaicas	44
Figura 3.2.19 - Curvas I-V experimentais com variação da potência da radiação solar.....	45
Figura 3.2.20 - Curvas I-V experimentais com e sem sujidade superficial.....	47

Notação e Glossário

A	Área	m^2
$C_{p,f}$	Capacidade calorífica do fluido térmico	$J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
D	Constante	$A \cdot ^\circ C^{-3}$
d_i	Diâmetro interno do tubo	m
G	Irradiância solar	$W \cdot m^{-2}$
H	Ângulo horário	$^\circ$
h_v	Coefficiente de transferência de calor por convecção no ar	$W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$
h_f	Coefficiente de transferência de calor por convecção do fluido térmico	$W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$
I	Corrente eléctrica	A
I_{CC}	Corrente de curto-circuito	A
I_S	Corrente eléctrica produzida pela radiação solar	A
I_D	Corrente eléctrica interna	A
I_0	Corrente inversa máxima de saturação do diodo	A
I_{max}	Corrente eléctrica máxima	A
k	Constante de Boltzmann	$J \cdot K^{-1}$
k_h	Coefficiente de condução de calor no ar húmido	$W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
k_0	Coefficiente de condução de calor do ar seco	$W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
k_f	Condutividade térmica do fluido	$W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
L	Latitude	$^\circ$
m	Factor de idealidade do diodo	
m'	Factor de idealidade equivalente a uma célula	
\dot{m}_f	Caudal mássico de fluido	$kg \cdot s^{-1}$
Nu	Número de Nusselt	
n	Dia juliano	
Pr	Número de Prandtl	
P	Potência	W
P_{max}	Potência máxima	W
Q_p	Potência total perdida	W
Q_c	Potência perdida por convecção	W
Q_e	Potência perdida por emissão	W
Q_t	Potência transmitida pelo vidro	W
Q_s	Potência da radiação solar incidente	W
Q_{ef}	Potência efectiva	W
$Q_{u,f}$	Potência transferida para o fluido térmico	W
q	Carga eléctrica do electrão	C
Re	Número de Reynolds	
R	Resistência	Ω
T	Temperatura das células	K ou $^\circ C$
T_s	Temperatura da superfície	$^\circ C$
T_{amb}	Temperatura ambiente	$^\circ C$
$T_{f,f}$	Temperatura do fluido frio	$^\circ C$
$T_{q,f}$	Temperatura do fluido quente	$^\circ C$
$T_{s,t}$	Temperatura da parede dos tubos de cobre	$^\circ C$

$T_{m,f}$	Temperatura média do fluido	°C
u_{vento}	Velocidade do vento	$m \cdot s^{-1}$
V	Tensão	V
V_{CA}	Tensão de circuito aberto	V
V_T	Potencial térmico	
V_{max}	Tensão máxima	V
x_f	Espessura do filme	m

Letras gregas

α_{ar}	Difusividade térmica do ar	$m^2 \cdot s^{-1}$
α	Ângulo de inclinação do painel	°
β	Ângulo de altitude solar	°
δ_s	Ângulo de inclinação solar	°
ε	Emissividade do vidro	
ε_s	Hiato do silício	eV
η	Eficiência do sistema	%
η_{global}	Eficiência global	%
η_{modelo}	Eficiência do sistema pelo modelo matemático	%
$\eta_{exp.}$	Eficiência do sistema experimental	%
μ_{ar}	Viscosidade do ar	Pa·s
ρ_{ar}	Massa volúmica do ar	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_f	Massa volúmica do fluido térmico	$kg \cdot m^{-3}$
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
ϕ_s	Ângulo de azimute solar	°
ϕ_p	Ângulo de azimute do painel	°
$\phi_{p,modelo}$	Ângulo de azimute do painel pelo modelo matemático	°
$\phi_{p,exp.}$	Ângulo de azimute do painel experimental	°
φ	Fracção de vapor de água	

Índices

i	Número da iteração
r	Referência

Lista de Siglas

AM	<i>Air Mass</i>
CPC	Concentradores Parabólicos Compostos
DEQ	Departamento de Engenharia Química
DEC	Departamento de Engenharia Civil
ESTIF	<i>European Solar Thermal Industry Federation</i>
EPDM	<i>Ethylene-propylene diene monomer</i>
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
LFC	Laboratório de Física das Construções
MIEQ	Mestrado Integrado em Engenharia Química
NI	<i>National Instruments</i>
STC	<i>Standard Test Conditons</i>
TSR	<i>Total Solar Reflectance</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

1 Introdução

1.1 Enquadramento e Apresentação do Projecto

A fonte de energia mais abundante na Terra é a energia solar, sendo uma fonte de energia limpa e inesgotável à escala humana. A radiação solar atinge a atmosfera terrestre com uma irradiância de cerca de $1373 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Uma vez que parte desta energia é reflectida e/ou absorvida pela atmosfera, é possível medir junto à superfície terrestre num plano perpendicular, cerca de $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, num dia de céu limpo. Portugal é um dos países da Europa com maior disponibilidade de radiação solar. Em termos quantitativos, Portugal tem em média entre 2200 e 3000 horas anuais de Sol enquanto que a Alemanha, por exemplo, apresenta uma média entre 1200 e 1700 horas de Sol por ano [1].

A energia solar pode ser convertida em energia térmica mediante processos distintos. Tais processos integram fenómenos de transferência por condução, convecção e radiação, no aquecimento de um elemento quando exposto à radiação solar. Também pode ser convertida em energia eléctrica ou fotovoltaica, envolvendo esta a transferência de fotões da radiação incidente para os electrões da estrutura atómica do material. Segundo a *European Solar Thermal Industry Federation* (ESTIF), em 2008, Portugal tinha $318\,950 \text{ m}^2$ de colectores solares térmicos instalados em funcionamento, o que corresponde a $223,3 \text{ MW}$ de potência [2]. A energia solar térmica tem como principais aplicações a produção de água quente para uso doméstico, industrial, hospitalar, hoteleiro, bem como para o aquecimento de piscinas e outros equipamentos. Quanto à energia solar eléctrica, em 2007 Portugal tinha uma capacidade instalada de $50,3 \text{ MWp}$ [3], sendo principalmente utilizada nas áreas das telecomunicações, sinalização, electrificação rural e bombagem de água para irrigação.

Nos últimos anos em Portugal têm-se criado incentivos à utilização da energia solar. O Governo Português desenvolveu um programa de incentivo à utilização de energias renováveis - Solar Térmico 2009 - em que, até Dezembro de 2009, o Estado comparticipava 50 % do investimento face ao preço de venda ao público; o programa teve um orçamento máximo de 100 milhões de euros. Este serviço considerou a aquisição, instalação, manutenção e garantia do equipamento, asseguradas durante 6 anos [4]. Quanto à energia solar eléctrica, o DL 363/2007, de 2 de Novembro, veio possibilitar o mercado da microgeração, permitindo aos consumidores de baixa tensão vender a energia produzida pelos seus painéis fotovoltaicos, após a obtenção de licença de Micro-produção (Sistema de Registo de Micro-produção). Nestes casos, a potência de ligação tem um limite máximo de 10 MW no ano zero (ano da instalação) e pode ser acrescida em 20 % nos restantes anos. No ano da instalação e nos 5 anos seguintes é garantida a tarifa de referência em vigor na data da instalação ($0,65 \text{ €}\cdot\text{kW h}^{-1}$, em 2008).

Nos 10 anos posteriores a tarifa corresponderá à tarifa referência em vigor a 1 de Janeiro desse ano [5]. A criação de condições adequadas à proliferação e integração deste sector no panorama energético nacional, através do licenciamento de instalações fotovoltaicas em tempo útil e em dimensões adequadas à necessidade do mercado, a criação de um mercado interno, propício e receptivo à tecnologia, à inovação e à qualidade contribuirão certamente para a maximização dos ganhos dos distintos agentes sociais:

- O Governo Português, pela produção de energia eléctrica através de uma fonte limpa e abundante em Portugal;
- Os consumidores de energia eléctrica, que ao mesmo tempo que sustentam o seu consumo, reduzem a pegada ecológica e a sua factura energética;
- Os trabalhadores Portugueses, que poderão ter a oportunidade de um futuro trabalho num sector de actividade de alta tecnologia;
- As Universidades e Politécnicos, pela possibilidade de geração de oportunidades de Investigação em colaboração com as empresas [6].

Este projecto consistiu na instalação e estudo da eficiência de dois sistemas, um colector solar térmico do tipo termossifão e um sistema composto por dois módulos fotovoltaicos ligados em série. Posteriormente, estas instalações serão usadas em aulas laboratoriais do Mestrado Integrado em Engenharia Química (MIEQ), onde os alunos terão a oportunidade de conhecer na prática o funcionamento de cada sistema, testando-os e fazendo a análise e discussão críticas de resultados. Ambos os sistemas foram instalados no terraço, piso 5, do Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), assim como a cabine técnica de controlo onde se encontra toda a instrumentação de aquisição de dados. Estudos prévios indicam que, em ambos os painéis, a variável que mais influencia a eficiência dos sistemas é a intensidade da radiação solar. Esta, por sua vez, depende do dia e hora devido à posição da Terra relativamente ao Sol. A orientação dos painéis também é uma variável importante, sendo que a escolha dos ângulos de inclinação e azimute deve ser feita de modo a que a quantidade de radiação incidente no painel seja a maior possível. Esta variável foi apenas estudada no painel fotovoltaico, ao qual se adaptou um mecanismo de suporte e regulação de ângulos especialmente desenvolvido no âmbito desta tese de mestrado. Contrariamente, o colector do tipo termossifão, dadas as suas especificidades, assume um carácter estático, tendo sido instalado na sua orientação típica pela empresa fornecedora. A intensidade da radiação solar incidente, a temperatura de funcionamento das células fotovoltaicas e a influência da sujidade superficial foram também estudadas no sistema fotovoltaico, enquanto que no colector solar térmico o estudo de eficiência teve em linha de conta variáveis como a radiação solar incidente, vento e humidade para vários caudais de débito de água.

1.2 Contributos do Trabalho

As alterações curriculares no curso de MIEQ que advêm da criação de ramos distintos, um dos quais “Energia e Ambiente”, aliados à necessidade de manutenção do elevado padrão de qualidade da oferta formativa da FEUP, obrigam à reestruturação, desenvolvimento e implementação de unidades experimentais específicas de cada área. Desta forma são criadas condições adequadas para que o aluno adquira competências base que lhe permitam, num futuro próximo, ter uma resposta profissional condigna da sua formação.

A manutenção de relações simbióticas com o tecido empresarial é também um factor determinante no processo formativo. As empresas são os principais integradores dos profissionais formados na FEUP e devem ser elas, em parte, a definir os seus perfis. Para além disso, a inovação, o desenvolvimento de novos produtos e a resolução de problemas específicos resultam do bom relacionamento institucional. Neste âmbito, a empresa NORQUENTE® cedeu e instalou gratuitamente o colector solar térmico estudado neste trabalho, tendo-se mostrado sempre colaborante.

Este trabalho contribuiu para a melhoria da capacidade formativa dos alunos que frequentem o curso de MIEQ, pelo facto de se terem criado e testado duas instalações experimentais que serão usadas nas aulas laboratoriais. Para além disso, os testes efectuados no colector solar cedido pela NORQUENTE® são do interesse da empresa, contribuindo desta forma para a consolidação das relações institucionais.

1.3 Organização da Tese

A presente tese, “Implementação e Estudo de um Colector Solar do Tipo Termossifão e de um Sistema de Painéis Fotovoltaicos”, está organizada em cinco secções distintas. No primeiro capítulo foi feita uma introdução e enquadramento do trabalho em questão.

No capítulo 2 encontra-se o estado da arte onde são apresentadas todas as tecnologias existentes relacionadas com o tema em estudo.

O capítulo 3 apresenta a descrição técnica que envolve a caracterização e a implementação dos dois sistemas, assim como a análise e discussão dos resultados obtidos.

No capítulo 4 encontram-se as conclusões onde são realçados os principais resultados do estudo.

No término desta tese, foi feita uma apreciação global de todo o projecto presente no capítulo 5.

2 Estado da Arte

Com a crescente preocupação acerca dos problemas ambientais e a crescente aposta em meios alternativos aos combustíveis fósseis, muitas empresas investem no desenvolvimento de tecnologias de produção de energia usando recursos inesgotáveis à escala humana, como o Sol. A energia solar pode ser convertida directamente em energia térmica, usando colectores solares térmicos e em energia eléctrica, usando módulos/painéis fotovoltaicos.

Existem vários tipos de colectores solares: colectores não envidraçados, colectores planos, colectores parabólicos e colectores de tubo de vácuo. Os colectores solares não envidraçados têm a sua principal aplicação no aquecimento de água de piscinas, ou pré-aquecimento de água doméstica, uma vez que não são necessárias temperaturas altas. Neste tipo de colector o absorvedor é extremamente simples, constituído por um conjunto de tubos de metal ou plástico, como EPDM (*ethylene-propylene diene monomer*), polipropileno ou polietileno, com revestimento de cor escura, para uma maior absorção de radiação, e sem qualquer cobertura de vidro, dentro dos quais circula a água a aquecer [7].

Os colectores planos são constituídos por uma caixa isoladora, para evitar perdas de calor, dar rigidez e proteger o interior do colector de agentes externos. O material da cobertura mais usual é o vidro temperado, com baixo teor em ferro, uma vez que tem elevado factor de transmissão e baixa reflexão, criando o efeito de estufa dentro do colector. Além disso, é um material com boa estabilidade mecânica e boa capacidade de protecção contra o frio, vento, etc. Dentro da caixa isoladora estão alojados tubos, normalmente de cobre devido à sua boa condutividade térmica, contendo o fluido térmico [8]. O fluido térmico deverá ter baixa viscosidade e elevada capacidade de transferência de calor, além disso, deve minimizar problemas de corrosão associados à sua passagem por tubos metálicos. Esse fluido pode ser a própria água que se pretende aquecer, havendo neste caso o problema de congelamento quando as temperaturas atingem os 0 °C. Um fluido anticongelante, como a mistura de água e propilenoglicol, que irá permutar calor com a água, torna-se assim a melhor opção, uma vez que não é tóxico, é inodoro, e contém inibidores de corrosão. Ligado aos tubos está o absorvedor que deve ser constituído por um material bom condutor de calor (por exemplo, uma folha metálica de cobre ou alumínio) com um revestimento selectivo, geralmente escuro. Esse revestimento obtém-se usualmente por tratamento electroquímico ou por pulverização catódica que confere à placa absorvedora propriedades ópticas que reduzem a emissão de radiação infravermelha, mantendo a sua capacidade de absorção tão boa como a de uma tinta negra. A Figura 2.1 apresenta a constituição de um colector solar térmico plano.

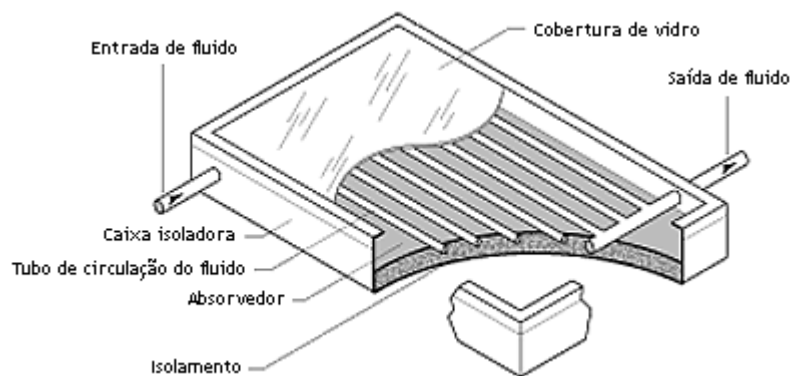


Figura 2.1 - Colector solar térmico plano (adaptado de [9]).

Os colectores parabólicos são sistemas de seguimento do Sol e podem ser de dois tipos, consoante a forma como seguem o seu movimento aparente. Os colectores parabólicos com um eixo de rotação e foco linear acompanham apenas a altura do Sol acima do horizonte. Os colectores com dois eixos de rotação e foco pontual, seguem o Sol em qualquer direcção de maneira a que os raios solares estejam sempre perpendiculares à superfície do coletor. São exemplos deste último tipo de colectores os pratos parabólicos, centrais de torre com helióstatos e fornos solares, e são normalmente utilizados para aplicações que requerem temperaturas acima dos 400 °C [10].

Os colectores parabólicos com um único eixo de rotação mais característicos são os do tipo concentradores parabólicos compostos (CPC) que combinam as características dos colectores planos com a capacidade de produzir temperaturas mais elevadas, sendo que a diferença está na geometria da superfície de absorção. Esta é constituída por uma grelha de alhetas, em forma de acento circunflexo, colocadas por cima de uma superfície reflectora em forma parabólica. A radiação solar é captada em ambas as faces das alhetas, uma vez que, quando o Sol incide na parte superior das alhetas, a radiação que é reflectida acaba por incidir na parte inferior das mesmas, aumentando assim a temperatura e diminuindo as perdas térmicas [1]. A larga aceitação de ângulos de incidência permite-lhes captar radiação directa e difusa. Na Figura 2.2 é apresentada esquematicamente a forma de uma alheta.

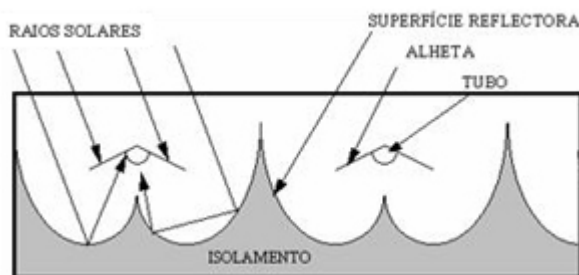


Figura 2.2 - Esquema de funcionamento de um CPC (adaptado de [11]).

Os colectores de tubos de vácuo são constituídos por dois tubos concêntricos entre os quais se estabelece vácuo de maneira a minimizar as perdas de calor por convecção. Ambos os tubos são constituídos por vidro de boro-silicato (resistente a elevadas temperaturas e com estabilidade mecânica). No entanto, dentro do tubo interno, que contém um revestimento selectivo para a máxima absorção da radiação, encontra-se o absorvedor de cobre onde circula o fluido térmico. O fluido térmico, neste caso, pode ser um fluido que evapora a baixas temperaturas (cerca de 25 °C), como é o caso do álcool ou da água em vácuo. Depois de evaporado, o fluido sobe no tubo até à câmara de irradiação, onde transfere calor para a água que se pretende aquecer, ocorrendo a condensação do fluido e tornando-o mais denso. Assim, o fluido condensado desce no tubo de cobre e retoma o ciclo [8]. Com este colector podem atingir-se temperaturas elevadas de cerca de 150 °C. A Figura 2.3 ilustra o funcionamento de um tubo de vácuo.

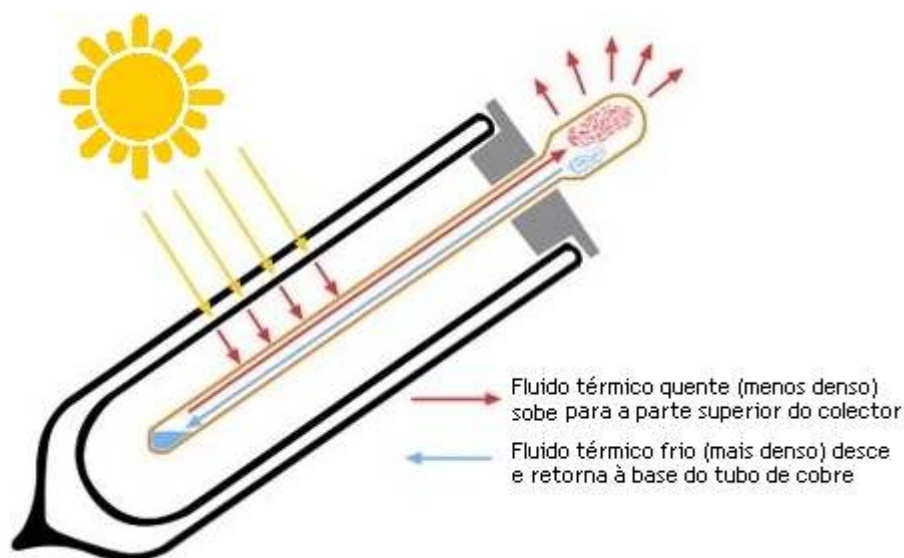


Figura 2.3 - Esquema de funcionamento de um tubo de vácuo (adaptado de [12]).

Associado aos colectores térmicos, existem dois sistemas de circulação de água distintos: circulação natural (sistema de termossifão) e circulação forçada. O sistema de termossifão baseia-se na circulação natural do fluido térmico devido à mudança da sua densidade, consoante a temperatura. Neste sistema, o depósito da água está normalmente colocado acima do colector e à medida que a temperatura aumenta no absorvedor, o fluido térmico torna-se menos denso movendo-se para a parte superior do colector, ou seja, para o depósito, trocando calor com a água nele contida. O sistema de circulação forçada é usado quando a colocação do depósito acima do colector não é viável. Neste caso, é necessária a instalação de uma bomba para fazer circular o fluido de transporte. A Figura 2.4 mostra um exemplo da instalação de um sistema de termossifão e um exemplo da instalação de um sistema de circulação forçada.



Figura 2.4 - Exemplo de montagem de colectores solares térmicos por: (a) circulação natural (sistema de termossifão) e (b) circulação forçada (adaptado de [13]).

A conversão directa da energia solar em energia eléctrica é feita em módulos fotovoltaicos. Um módulo fotovoltaico consiste no conjunto de várias células fotovoltaicas que são constituídas por um material semiconductor, usualmente o silício. Um átomo de silício possui quatro electrões de valência que formam quatro ligações covalentes com átomos vizinhos, fazendo com que a banda de valência fique completamente preenchida com oito electrões, tornando o átomo estável. Para que os electrões possam saltar da banda de valência para a banda de condução, precisam de energia suficiente, que no caso do cristal de silício é de 1,12 eV. Assim, quando a radiação solar atinge um electrão de valência com a energia suficiente, ele move-se para a banda de condução formando uma lacuna (*hole*) que funciona como uma carga positiva e cria-se um par electrão-lacuna. No entanto, o silício puro não produz energia eléctrica porque é necessário que haja um campo eléctrico, ou seja, é necessário que haja diferença de potencial entre duas zonas da célula. Assim, o silício é *dopado* com elementos que vão alterar as suas propriedades eléctricas, formando-se duas camadas na célula: um semiconductor positivo (tipo-p, ou seja, com excesso de cargas positivas), no caso da *dopagem* do silício com boro, gálio, alumínio ou índio, e um semiconductor negativo (tipo-n, isto é, com excesso de cargas negativas), no caso da *dopagem* do silício com fósforo, azoto, arsénio ou antimónio. A junção p-n é o local onde ambos os tipos de semiconductor, positivo e negativo, se encontram. No caso da junção p-n em equilíbrio, os electrões fluem naturalmente para a camada tipo-p, deixando lacunas na camada tipo-n. Da mesma maneira, as lacunas difundem-se para a camada tipo-n. Na interface forma-se então uma camada de depleção, onde vai haver um excesso de cargas negativas na camada tipo-p e um excesso de cargas positivas na camada tipo-n. Quando a radiação solar incide nas células fotovoltaicas, os fótons com energia suficiente são

absorvidos e excitam os electrões que passam para a banda de condução formando-se então pares electrão-lacuna. Quando estas partículas móveis carregadas atingem a vizinhança da junção p-n, o campo eléctrico dessa região vai enviar os electrões para o terminal negativo e as lacunas para o terminal positivo, de acordo com a Figura 2.5.

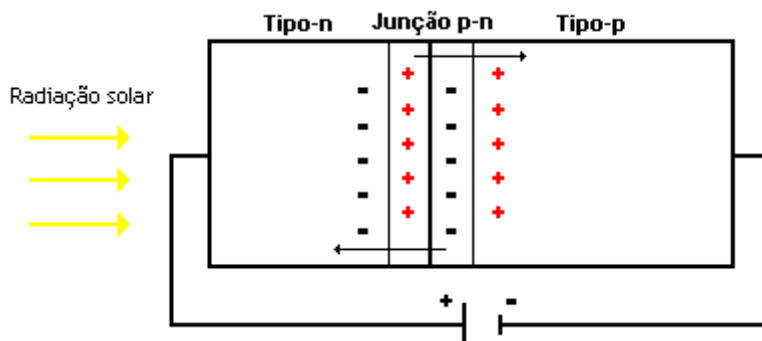


Figura 2.5 - Esquema de funcionamento de uma célula fotovoltaica.

Ligando os terminais do módulo a um circuito que fecha numa carga exterior a este, circulará corrente eléctrica contínua.

A utilização do silício monocristalino atinge cerca de 60 % do mercado e apresenta uma eficiência de cerca de 15 %. O silício policristalino atinge apenas 30 % do mercado e a sua eficiência é de cerca de 12 %. A razão deste abaixamento na eficiência deve-se às descontinuidades existentes na sua estrutura molecular que dificulta o movimento dos electrões e facilita a recombinação com as lacunas, reduzindo a potência de saída [14].

O silício é um material cuja utilização é consensual, no entanto começa-se a apostar em novos materiais mais baratos e mais eficientes para o fabrico de células fotovoltaicas. Por exemplo, o arsenieto de gálio (GaAs), com uma estrutura cristalina semelhante à do silício, consegue eficiências entre 25 % e 30 %, uma vez que tem uma elevada capacidade de absorver a radiação solar. Para a mesma quantidade de radiação absorvida, as células de silício teriam de ter uma espessura de 200-300 μm enquanto que nas células de GaAs seriam necessários apenas alguns micrómetros de espessura. A desvantagem deste tipo de material é o seu custo. Outro tipo de células fotovoltaicas são as de filme fino, onde uma fina camada de um semiconductor é depositada numa camada de suporte de material de baixo custo, como vidro, plástico ou metal. A vantagem é o seu baixo custo e rapidez do processo de produção, no entanto as eficiências são baixas. Os materiais semicondutores mais usados neste tipo de células são o silício amorfo (a-Si) e o telurídio de cádmio (CdTe), com eficiências a rondar os 7 % [15].

3 Descrição Técnica e Discussão dos Resultados

3.1 Colector Solar Térmico

O colector solar térmico, oferecido pela empresa NORQUENTE[®], é um sistema de circulação do tipo termossifão (Figura 3.1.1).



Figura 3.1.1 - Colector solar térmico NORQUENTE[®].

Este colector é constituído por um depósito de água de 200 litros e por dois módulos colectores. Estes, por sua vez, contêm tubos de cobre nos quais circula o fluido térmico (solução de propilenoglicol em água a 12 % v/v). O sistema de absorção de energia radiante é formado por duas alhetas soldadas aos tubos de cobre. Estas alhetas, também de cobre, são revestidas por um óxido metálico com uma absorvância elevada ao espectro solar. A caixa do colector é de inox, com isolamento térmico em lã de rocha e coberta com vidro temperado. Outras características estruturais dadas pelo fornecedor, através da sua página na internet [16], e pela licença de certificação do colector solar da NORQUENTE[®] que se encontra no Anexo 1, são apresentadas na Tabela 3.1.1.

Tabela 3.1.1 - Características dadas pelo fornecedor de um módulo do colector solar térmico [16].

Comprimento	2013 mm
Largura	1017 mm
Área total	2 m ²
Massa	53 kg
Pressão de funcionamento	8 bar
Pressão de ensaio	6 bar
Temperatura de estagnação	180 °C
Área do absorvedor	1,72 m ²
Absorção	95 %
Emissão	5 %
Eficiência	73 %

Quando a radiação solar atinge a superfície do painel, parte é absorvida, parte é reflectida e a restante é transmitida. A radiação que é reflectida e emitida pelo vidro é perdida, porém, a radiação que é transmitida é na sua maioria absorvida no absorvedor que, consequentemente, origina o aquecimento do fluido térmico. O fluido térmico quando aquecido torna-se menos denso subindo para a parte superior do colector onde se encontra um permutador tubular que aquece a água dentro do depósito. O fluido arrefece e retorna ao painel colector.

No seguimento de uma visita feita à unidade fabril da empresa, conheceu-se e registou-se fotograficamente o processo de produção dos colectores solares térmicos da NORQUENTE®, cuja descrição é feita no Anexo 2.

3.1.1 Instalação e Sistema de Aquisição

O colector solar térmico em estudo foi instalado no terraço do Departamento de Engenharia Química (edifício E) por técnicos da NORQUENTE®. Este colector encontra-se virado a Sul, com uma inclinação de 36°.

No colector instalado foram adicionados um conjunto de caudalímetros e de sensores de temperatura (termopares), de forma a permitir fazer o balanço energético ao sistema. O esquema da instalação efectuada encontra-se na Figura 3.1.2.

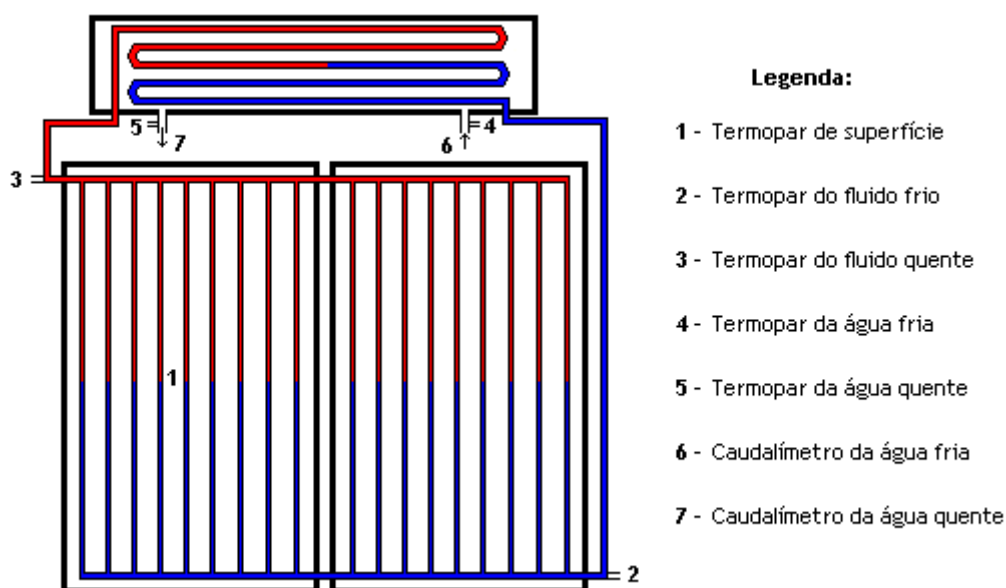


Figura 3.1.2 - Esquema da instalação da instrumentação no colector solar térmico.

Para conhecer o caudal de água de entrada e saída do depósito, foram instalados dois medidores de caudal (marca Parker, modelo Dataflow, com capacidade de $100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$) - Figura 3.1.3. Estes medidores geram um sinal proporcional de 4 a 20 mA, que é convertido em diferença de potencial, pela utilização de uma resistência em série de 240Ω . Assim, obtém-se um sinal de tensão que se encontra entre os limites de leitura ($\pm 10 \text{ V}$) da placa de aquisição de dados da *National Instruments*, modelo NI USB 6008. Posto isto, foi efectuada a calibração dos caudalímetros.

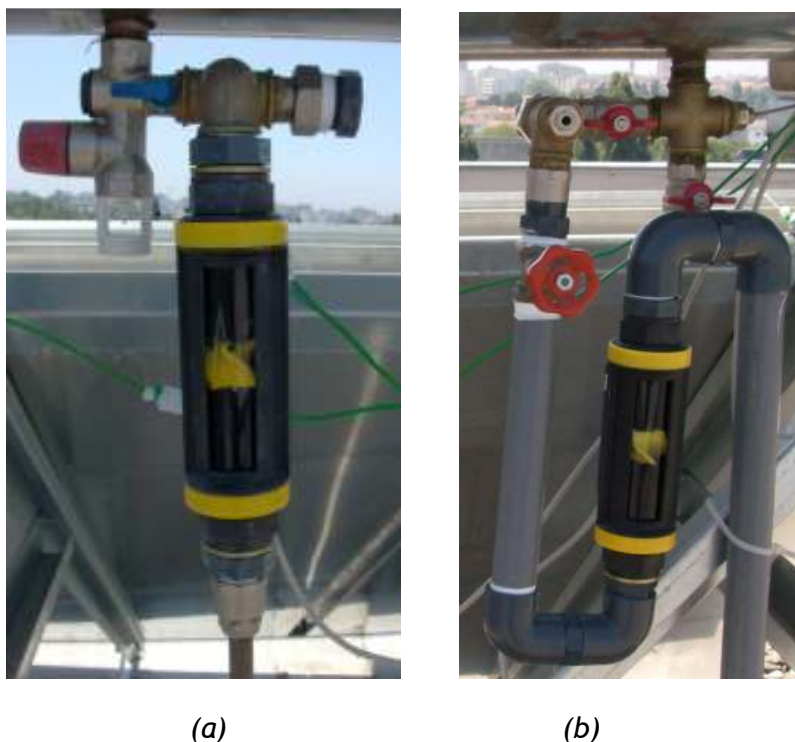


Figura 3.1.3 - Medidores de caudal das correntes de (a) entrada e (b) saída de água.

Além dos medidores de caudal, foram instalados cinco sensores de temperatura (termopares tipo K) para fazer a medição das temperaturas da água de entrada fria e água de saída quente, temperaturas do fluido quente (à entrada do depósito) e do fluido frio (à saída do depósito) e temperatura da superfície do colector. Os cinco termopares foram ligados aos respectivos transmissores (*RS*, modelo 363-0222) e foram colocadas resistências de $240\ \Omega$ em série em cada transmissor, originando um sinal de tensão dentro do limite de leitura da placa. Os termopares também foram calibrados e a relação obtida entre a temperatura e a tensão eléctrica foi introduzida no programa de aquisição, permitindo conhecer as temperaturas ao longo do tempo.

Toda a instrumentação usada para a aquisição dos dados, como transmissores, resistências, placas de aquisição de dados e fonte de alimentação de 24 V da *Traco Power* (à qual estão ligados os medidores de caudal e transmissores), encontra-se organizada em caixas de instrumentação - Figura 3.1.4. A ligação das placas de aquisição ao computador é feita por USB e a leitura de todas as variáveis medidas é efectuada no programa de aquisição elaborado para o efeito em *LabView*, da *National Instruments*.



(a)

(b)

Figura 3.1.4 - Caixa de instrumentação: (a) placas de aquisição, transmissores, resistências e (b) fonte de alimentação.

Como se pode observar na Figura 3.1.5, o programa de aquisição de dados e tratamento de sinal desta instalação experimental compreende dois gráficos que mostram a história das temperaturas lidas e dos caudais. Acima dos gráficos encontram-se representados os valores médios para cada variável medida. Além disto, este programa permite gravar em ficheiro todos os valores obtidos.

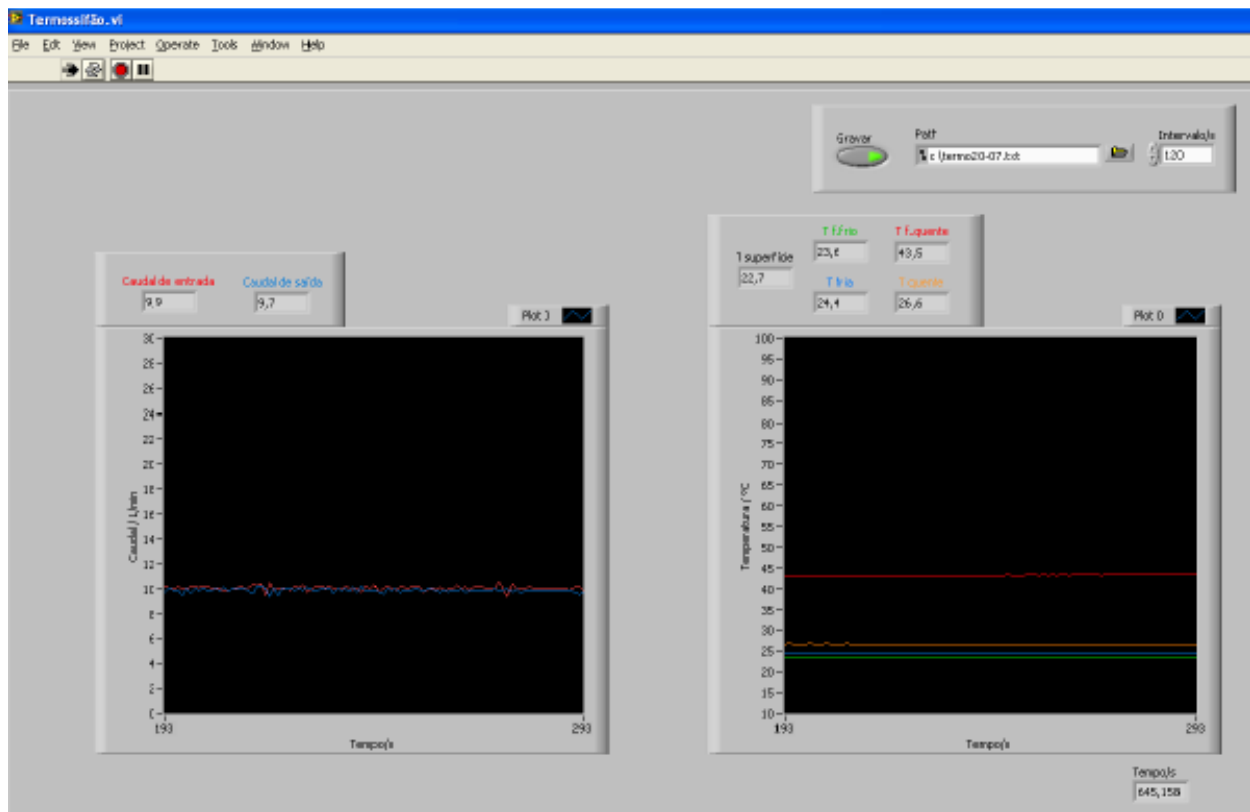


Figura 3.1.5 - Aspecto do programa de aquisição para o colector solar.

Os dados meteorológicos necessários, tais como temperatura ambiente, radiação solar global, velocidade do vento e humidade, foram obtidos através da estação meteorológica do Laboratório de Física das Construções (LFC) situada na parte superior do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da FEUP e cujos dados estão disponíveis em linha [17].

3.1.2 Resultados e Discussão

O funcionamento do colector solar térmico é baseado em fenómenos de transferência de calor, desde a radiação solar até ao aquecimento da água. Quando a radiação solar incide na superfície do painel, parte é absorvida, outra reflectida e a restante transmitida - Figura 3.1.6.

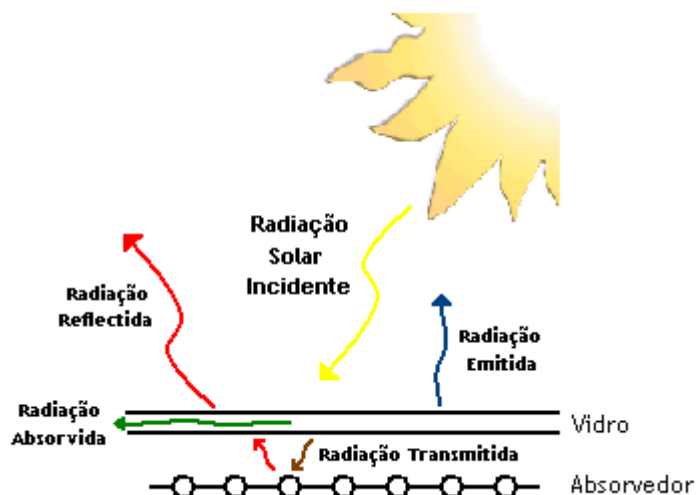


Figura 3.1.6 - Radiação solar absorvida, reflectida, transmitida e emitida.

Em estado estacionário, a radiação absorvida pelo vidro é desprezável face à radiação que é transmitida. No entanto, como em todo o corpo que aquece, há perdas de potência por emissão de radiação, Q_e . Além destas, ocorrem também perdas de potência por convecção no ar, por influência do vento e da humidade, Q_c . Quando a radiação que atravessa o vidro incide no absorvedor de cobre, a maior parte é absorvida devido ao seu revestimento selectivo escuro. No entanto, há uma pequena parte que é reflectida e transmitida pelo vidro para o exterior, Q_t . Assim, o total de perdas fica:

$$Q_p = Q_c + Q_e + Q_t \quad (3.1.1)$$

As perdas de potência por convecção traduzem-se matematicamente pela Equação (3.1.2):

$$Q_c = \frac{k_h}{x_f} A(T_s - T_{amb}) \quad (3.1.2)$$

em que:

- k_h é o coeficiente de condução de calor no ar húmido, em $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$;
- x_f é a espessura da camada limite, em m;
- A é a área de transferência de calor, em m^2 ;
- T_s é a temperatura da superfície do painel, em °C ;
- T_{amb} é a temperatura ambiente, em °C .

O coeficiente de condução de calor no ar húmido relaciona-se com o coeficiente de condução de calor do ar seco, k_0 , e com a fracção de vapor de água no ar, φ , da seguinte forma [18]:

$$k_h = k_0 + 0,0041 \varphi \quad (3.1.3)$$

sendo que o coeficiente de condução de calor do ar seco depende da temperatura ambiente, podendo-se considerar a seguinte relação, para um intervalo de temperaturas entre -40 °C e 120 °C [19]:

$$k_0 = 2,397 \times 10^{-2} + 7,59 \times 10^{-5} T_{amb} \quad \text{em } \text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1} \quad (3.1.4)$$

A espessura da camada limite é determinada usando a correlação de Nusselt-Reynolds-Prandtl para transferência de calor por convecção forçada em superfícies planas [20]:

$$\text{Nu} = 0,332 \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3} \quad (3.1.5)$$

Substituindo os números de Nusselt, Reynolds e Prandtl, vem:

$$\frac{h_v x_f}{k_h} = 0,332 \left(\frac{u_{vento} x_f \rho_{ar}}{\mu_{ar}} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_{ar}}{\mu_{ar} \alpha_{ar}} \right)^{1/3} \quad (3.1.6)$$

O coeficiente de transferência de calor por convecção no ar, h_v , em $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$, depende da velocidade do vento, u_{vento} , de acordo com a seguinte expressão [21]:

$$h_v = 5,7 + 3,8 u_{vento} \quad \text{para } 0 \leq u_{vento} < 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad (3.1.7)$$

A massa volúmica e difusividade térmica do ar, ρ_{ar} e α_{ar} , variam com a temperatura e são determinadas recorrendo às Equações (3.1.8) e (3.1.9), respectivamente, para um intervalo de temperaturas entre -23 °C e 127 °C [22].

$$\rho_{ar} = 1,03 \times 10^{-5} T_{amb}^2 - 4,49 \times 10^{-3} T_{amb} + 1,28 \quad \text{em } \text{kg}\cdot\text{m}^{-3} \quad (3.1.8)$$

$$\alpha_{ar} = 1,33 \times 10^{-7} T_{amb} + 1,86 \times 10^{-5} \quad \text{em } \text{m}^2\cdot\text{s}^{-1} \quad (3.1.9)$$

A viscosidade do ar também depende da temperatura segundo a seguinte relação, aplicável para temperaturas entre -40 °C e 120 °C [19]:

$$\mu_{ar} = 17,19 + 4,29 \times 10^{-2} T_{amb} \quad \text{em Pa}\cdot\text{s} \quad (3.1.10)$$

Além das perdas de calor por convecção, há perdas por emissão de radiação que são traduzidas pela lei de Stefan-Boltzmann [23]:

$$Q_e = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (3.1.11)$$

onde ε é a emissividade do vidro, que tem o valor de 0,94 para a temperatura de 23 °C [24] e σ é a constante de Stefan-Boltzmann, cujo valor é $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$. As temperaturas da superfície e ambiente vêm em kelvin.

Como já foi referido acima, a maior parte da radiação que atravessa o vidro é absorvida pelo absorvedor devido ao seu revestimento selectivo escuro. No entanto, há uma pequena parte que é reflectida e pode ser quantificada através da TSR - *Total Solar Reflectance*. Este parâmetro é uma característica do material e é determinada por espectrofotometria, tratando-se de uma média de valores da reflectividade em determinados comprimentos de onda [25]. Para o absorvedor em causa, o valor de TSR é de 1,4 %. Admitindo então que toda a radiação que é reflectida pelo absorvedor será transmitida pelo vidro para o exterior, o cálculo desta perda é feito da seguinte forma:

$$Q_t = (Q_s - Q_c - Q_e) \cdot \frac{TSR(\%)}{100} \quad (3.1.12)$$

em que Q_s é a potência da radiação solar incidente no painel em W.

É possível então calcular a potência efectiva, subtraindo o total de perdas, Q_p , à potência da radiação solar que incide no painel em determinado instante:

$$Q_{ef} = Q_s - Q_p = G A - Q_p \quad (3.1.13)$$

onde G é a potência da radiação solar por unidade de área e A a área efectiva do painel.

Fazendo o balanço energético ao fluido térmico que passa pelos tubos do colector, pode ser calculada a potência útil, ou seja, a potência transferida para o fluido, $Q_{u,f}$, para uma determinada potência de radiação incidente, através da Equação (3.1.14).

$$Q_{u,f} = \dot{m}_f C_{p,f} (T_{q,f} - T_{f,f}) \quad (3.1.14)$$

em que \dot{m}_f é o caudal mássico do fluido que circula dentro dos tubos, $C_{p,f}$ a sua capacidade calorífica e $T_{f,f}$ e $T_{q,f}$ as temperaturas do fluido à entrada do painel/saída do depósito e à saída do painel/entrada do depósito, respectivamente. O caudal mássico do fluido térmico pode ser calculado a partir da seguinte expressão para escoamento interno em tubos:

$$\ln\left(\frac{T_{s,t} - T_{q,f}}{T_{s,t} - T_{f,f}}\right) = \frac{h_f A}{\dot{m}_f C_{p,f}} \quad (3.1.15)$$

em que $T_{s,t}$ é a temperatura da superfície dos tubos de cobre, h_f é o coeficiente de transferência de calor por convecção do fluido e A a área de transferência de calor. Considerando que o escoamento no interior dos tubos é laminar, o coeficiente convectivo pode ser calculado da seguinte forma [20]:

$$h_f = \frac{\text{Nu} k_f}{d_i} \quad (3.1.16)$$

O número de Nusselt toma o valor de 3,66, para escoamento laminar, a condutividade térmica do fluido, k_f , é próxima da da água e d_i é o diâmetro interno dos tubos.

A capacidade calorífica da mistura depende da sua temperatura média, $T_{m,f}$, e foi obtida por pesquisa bibliográfica, obtendo-se a seguinte relação [26]:

$$C_{p,f} = -3,24 \times 10^{-6} T_{m,f}^2 + 7,36 \times 10^{-4} T_{m,f} + 4,10 \quad \text{em } \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \quad (3.1.17)$$

A eficiência global do colector solar, η_{global} , compreende duas eficiências intermédias: a eficiência da caixa isoladora e a eficiência do absorvedor. A seguinte expressão mostra a relação entre elas:

$$\eta_{global} = \frac{Q_{ef}}{Q_s} \times \frac{Q_{u,f}}{Q_{ef}} \times 100 \quad (3.1.18)$$

Posto isto, foram efectuadas experiências a vários caudais de alimentação de água ao depósito e calculadas as eficiências consoante a potência da radiação solar incidente no mesmo instante. Na Figura 3.1.7 encontra-se representada a eficiência global e a potência útil do colector obtidas para uma determinada potência da radiação solar ao longo do dia 24 de Julho de 2010, para um caudal de água de $5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$.

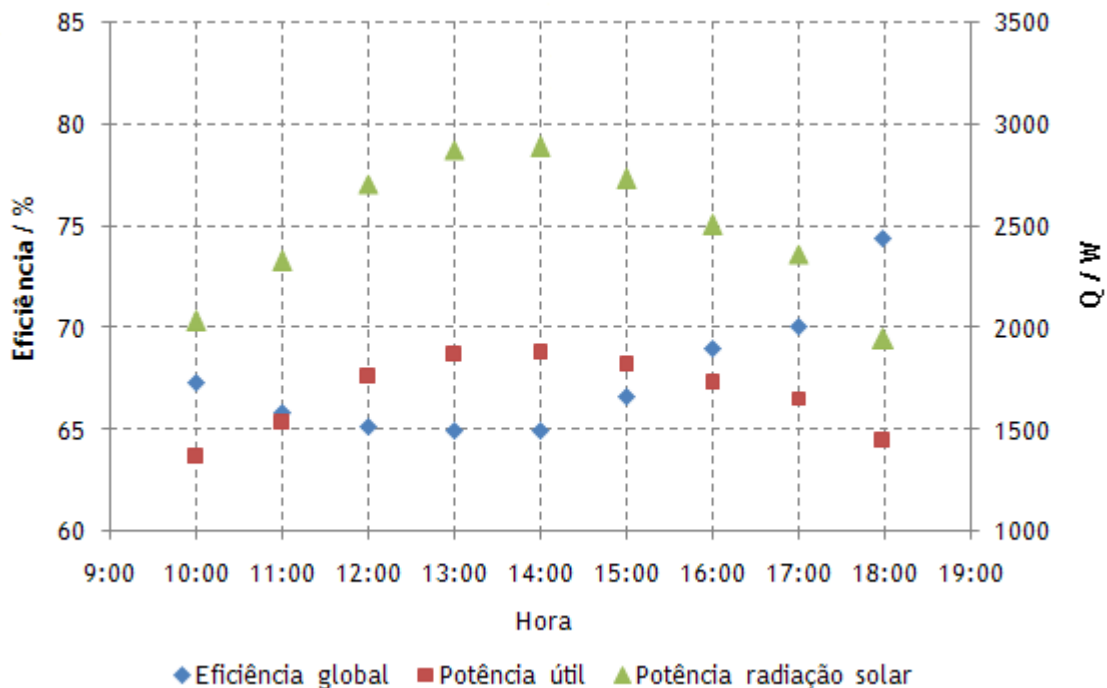


Figura 3.1.7 - Eficiências globais e potências úteis obtidas para diferentes potências de radiação solar, a um caudal de alimentação de água de $5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

Como se pode observar, à medida que a potência da radiação solar se torna maior, a potência útil aumenta, no entanto o seu aumento não é tão acentuado fazendo com que a eficiência global diminua. Os valores de eficiência para este caudal de água situam-se entre os 65 % para potências da radiação solar mais elevadas, e 74 % para potências da radiação menores. Verifica-se que as eficiências obtidas durante a parte da tarde são superiores às eficiências obtidas de manhã para a mesma potência de radiação solar. Isto deve-se ao facto da temperatura da superfície do painel se manter mais elevada durante a tarde, o que faz com que as perdas por emissão sejam maiores e a potência efectiva menor. Por outro lado, o aumento da eficiência do absorvedor é mais significativo que a diminuição da eficiência da caixa isoladora, fazendo com que a eficiência global seja maior.

Na figura seguinte encontra-se o perfil da potência da radiação solar, da potência útil e da eficiência global ao longo do dia 28 de Julho de 2010, neste caso com um caudal de alimentação de água de $15 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

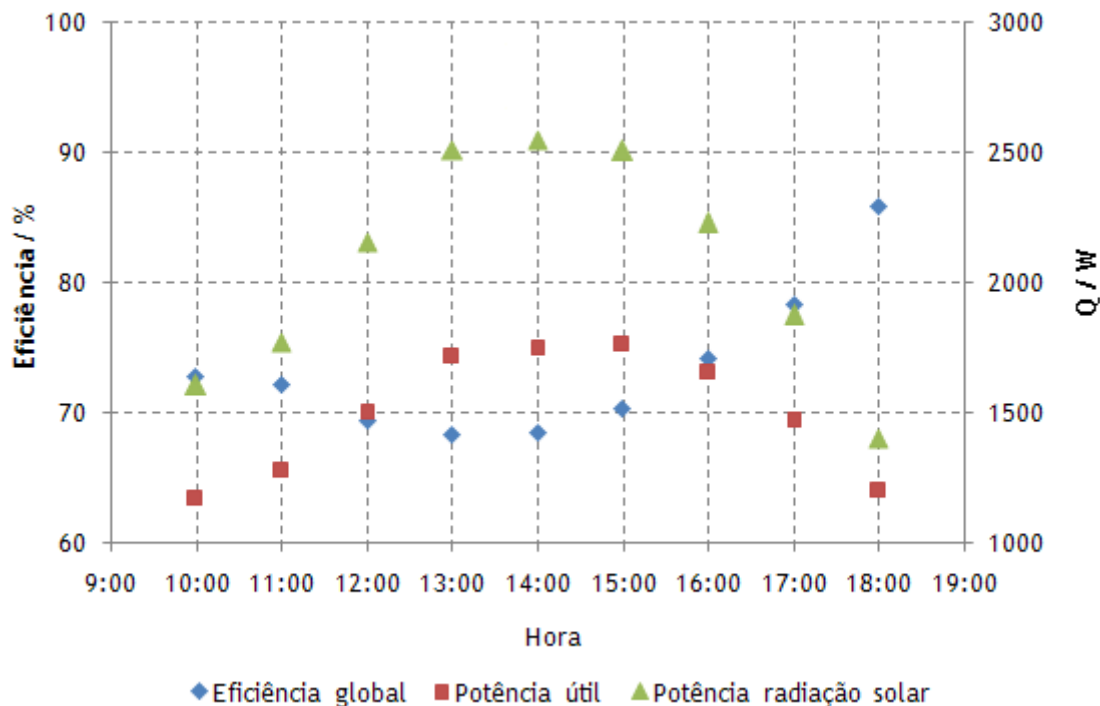


Figura 3.1.8 - Eficiências globais e potências úteis obtidas para diferentes potências de radiação solar, a um caudal de alimentação de água de 15 L·min⁻¹.

Para este caudal as eficiências mostram-se significativamente superiores, ultrapassando os 74 % durante a tarde. No entanto os perfis apresentam o mesmo aspecto da figura anterior. Além do caudal de alimentação de água ser maior, o que faz com que a água dentro do depósito se mantenha a menor temperatura provocando uma diferença maior nas temperaturas do fluido, a potência da radiação solar é menor comparado com o gráfico da Figura 3.1.7. Este facto faz com que a potência útil do painel se aproxime da potência da radiação aumentando a eficiência.

Por fim, para um caudal de água máximo, 26 L·min⁻¹, obtém-se as curvas representadas na Figura 3.1.9, no dia 29 de Julho de 2010.

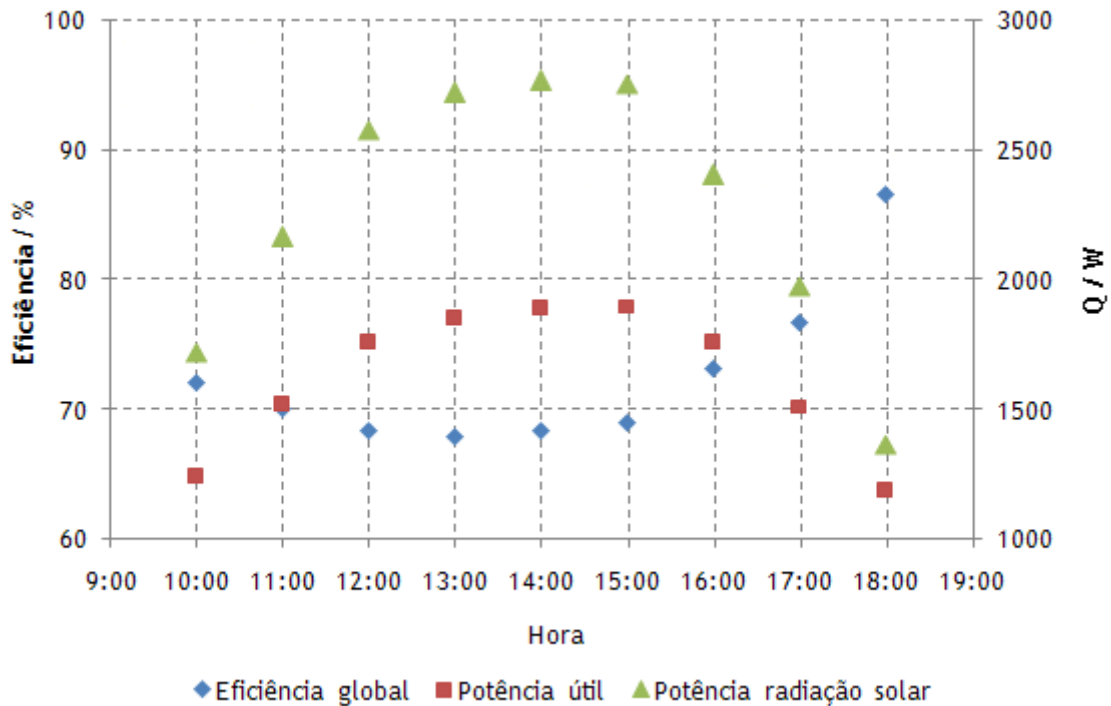


Figura 3.1.9 - Eficiências globais e potências úteis obtidas para diferentes potências de radiação solar, a um caudal de alimentação de água de $26 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

Para o caudal máximo obtém-se eficiências próximas das obtidas para o caudal de $15 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, atingindo os 87 % na potência de radiação mínima desse dia. Verifica-se neste caso que a potência da radiação solar é superior à do ensaio anterior, o que faz com que a eficiência global seja menor. Por outro lado, o caudal de alimentação de água é superior e a diferença entre as temperaturas do fluido são maiores, fazendo com que a eficiência aumente. Comparando os ensaios com caudal de alimentação de água de $5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ e de $26 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, onde as potências de radiação solar são próximas, verificam-se eficiências globais significativamente superiores para o caudal de água máximo.

Na figura seguinte encontram-se as eficiências globais para três irradiâncias distintas e para os três caudais acima descritos.

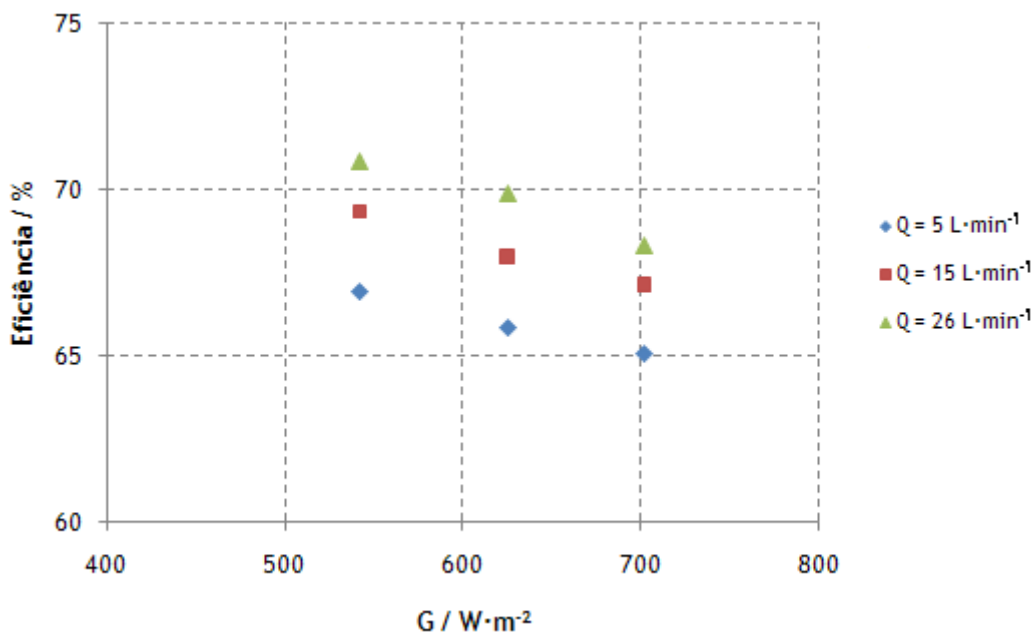


Figura 3.1.10 - Eficiências globais obtidas para diferentes irradiâncias médias e para os diferentes caudais de alimentação de água.

Verifica-se a diminuição da eficiência com o aumento da irradiância para os três caudais. Por outro lado, a eficiência aumenta à medida que o caudal de débito de água aumenta. Como foi referido anteriormente, o aumento do caudal de água faz com que a temperatura no interior do depósito seja menor promovendo uma maior troca de calor que se traduz no abaixamento da temperatura do fluido à saída do depósito. Isto faz com que a diferença entre as temperaturas do fluido seja maior, levando ao aumento da eficiência.

Comparando os resultados obtidos com o valor da eficiência que consta na licença de certificação do colector solar da NORQUENTE®, 73 % para potência de radiação de $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ e temperatura ambiente de $30 \text{ }^\circ\text{C}$, verifica-se que os valores são próximos.

3.2 Sistema de Painéis Fotovoltaicos

O sistema de painéis fotovoltaicos fornecido pela EFACEC é constituído por dois módulos, cada um dos quais com 36 células de silício multicristalino - Figura 3.2.1. Neste trabalho optou-se por ligar os dois módulos em série.



Figura 3.2.1 - Sistema de painéis fotovoltaicos KC85GX-2P da Kyocera®.

As 36 células que constituem um módulo encontram-se acondicionadas dentro de uma caixa protectora com uma cobertura de vidro resistente a condições ambientais adversas. O sobreaquecimento individual das células fotovoltaicas é salvaguardado pela existência de um diódo *by-pass* em cada um dos módulos.

De acordo com as especificações do fornecedor, as células que constituem o painel são de alto desempenho e permitem atingir valores de eficiência acima dos 16 %. Na Tabela 3.2.1 apresentam-se algumas características eléctricas e estruturais relevantes, sendo que no Anexo 3 apresenta-se a folha de especificações completa.

Tabela 3.2.1 - Características dadas pelo fornecedor de um módulo.

Características eléctricas a 1000 W·m⁻² (STC¹)	
Potência máxima	87 W
Tensão do sistema máxima	750 V
Tensão de potência máxima	17,4 V
Corrente de potência máxima	5,02 A
Tensão de circuito aberto (V_{CA})	21,7 V
Corrente de curto-circuito (I_{CC})	5,34 A
Dimensões	
Comprimento	(1007 ± 2,5) mm
Largura	(652 ± 2,5) mm
Massa	8,3 kg
Número de células em série	36

Tendo em consideração as características eléctricas acima referidas é possível obter as curvas características corrente vs tensão (curvas I-V) e potência vs tensão (curvas P-V) para as condições de referência.

¹ *Standard Test Conditions* - Valores nas condições de teste referência: potência de radiação de 1000 W·m⁻², AM 1,5 e temperatura das células de 25 °C.

3.2.1 Instalação e Sistema de Aquisição

De forma a alcançar os objectivos propostos, nomeadamente a obtenção das curvas características para diferentes graus de inclinação e azimute, foi necessário construir o sistema de suporte dos painéis fotovoltaicos - Figura 3.2.2. Este sistema, para além de permitir uma rotação mínima de 1° em ambos os eixos, é suficientemente robusto para resistir a condições ambientais adversas, concretamente ventos fortes.



Figura 3.2.2 - Suporte dos painéis com sistema de rotação em: (a) azimute e (b) inclinação.

Os ângulos de azimute e inclinação são determinados com uma bússola digital (marca *Bresser*) e um inclinómetro (marca *RS*), respectivamente.

A unidade experimental, instalada no terraço do DEQ, dispõe de dois sensores de temperatura (termopares do tipo K), um de superfície que permite medir a temperatura superficial dos módulos e outro que permite medir a temperatura ambiente - Figura 3.2.3.

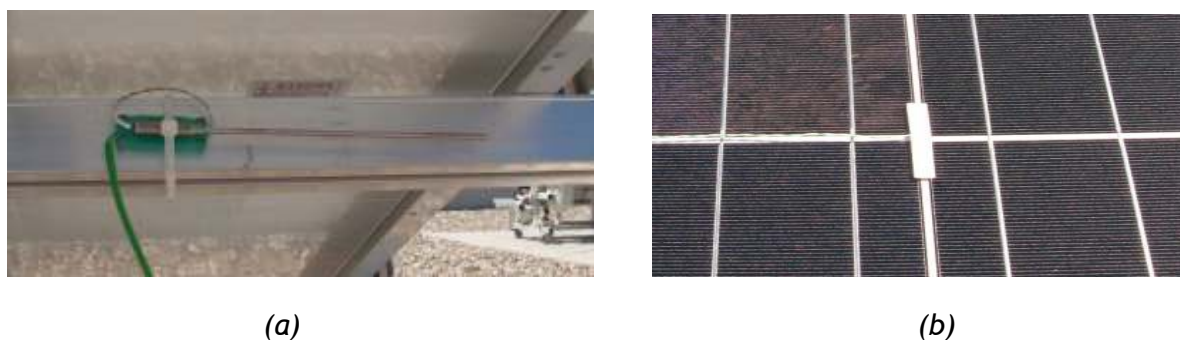


Figura 3.2.3 - Localização dos termopares: (a) temperatura ambiente e (b) superfície.

Ambos os termopares foram ligados a transmissores da marca *RS*, modelo 363-0222, de modo a ampliar o sinal. Dado que as placas de aquisição utilizadas neste trabalho, da marca *National Instruments*, modelo NI USB 6008, apenas permitem fazer medições em tensão, instalaram-se resistências de $240\ \Omega$ em cada transmissor, originando um sinal de tensão dentro do limite de leitura da placa ($\pm 10\ \text{V}$). Os termopares foram calibrados e as respectivas equações da recta obtidas foram inseridas no programa de aquisição construído em linguagem *Labview*.

As medições da tensão e da intensidade da corrente eléctrica, foram efectuadas em paralelo e em série, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 3.2.4.

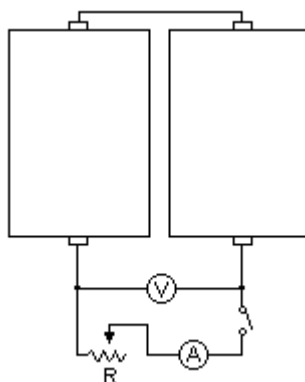


Figura 3.2.4 - Esquema das ligações efectuadas.

A corrente e a tensão são medidas em dois multímetros distintos. A corrente é lida em série através de um multímetro *Protek 506*, com ligação RS-232 ao computador de aquisição. A tensão é lida em paralelo usando um multímetro da marca *Range RE64*. Este multímetro será futuramente substituído por outro com ligação porta de série, para que o registo seja automático. Dada a ordem de grandeza dos valores de tensão gerados pelo sistema ($40\ \text{V}$) a ligação à placa de aquisição de dados não foi efectuada uma vez que os valores de tensão obtidos são superiores aos valores limite ($\pm 10\ \text{V}$). Desta forma, os valores de tensão foram lidos e anotados pelo operador.

Para simular a carga no sistema, que vai permitir obter os dados para as curvas características corrente vs tensão (curvas I-V), usou-se uma resistência variável, R . A resistência variável usada nesta instalação consiste na ligação em série de três reóstatos da marca *Metrel*, dois deles de $33\ \Omega$ de resistência e $3,1\ \text{A}$ de corrente e o terceiro de $100\ \Omega$ e $1,8\ \text{A}$. De notar que a resistência variável manual poderia ser substituída por uma carga automática controlada pelo programa de aquisição. No entanto, dado o seu preço elevado, optou-se por usar este sistema, ficando esta observação para futuras melhorias da instalação. O interruptor representado no esquema é usado apenas para segurança, aquando da manipulação do reóstato.

Os dados das temperaturas e intensidade da corrente são recolhidos, ao longo do tempo, e podem ser gravados pelo programa de aquisição, cujo aspecto está representado na Figura 3.2.5. No primeiro gráfico, são monitorizadas as temperaturas ambiente e de superfície e, no segundo, a intensidade da corrente. A opção “gravar” permite o registo dos valores experimentais no directório a definir pelo operador com um determinado intervalo de tempo de gravação.

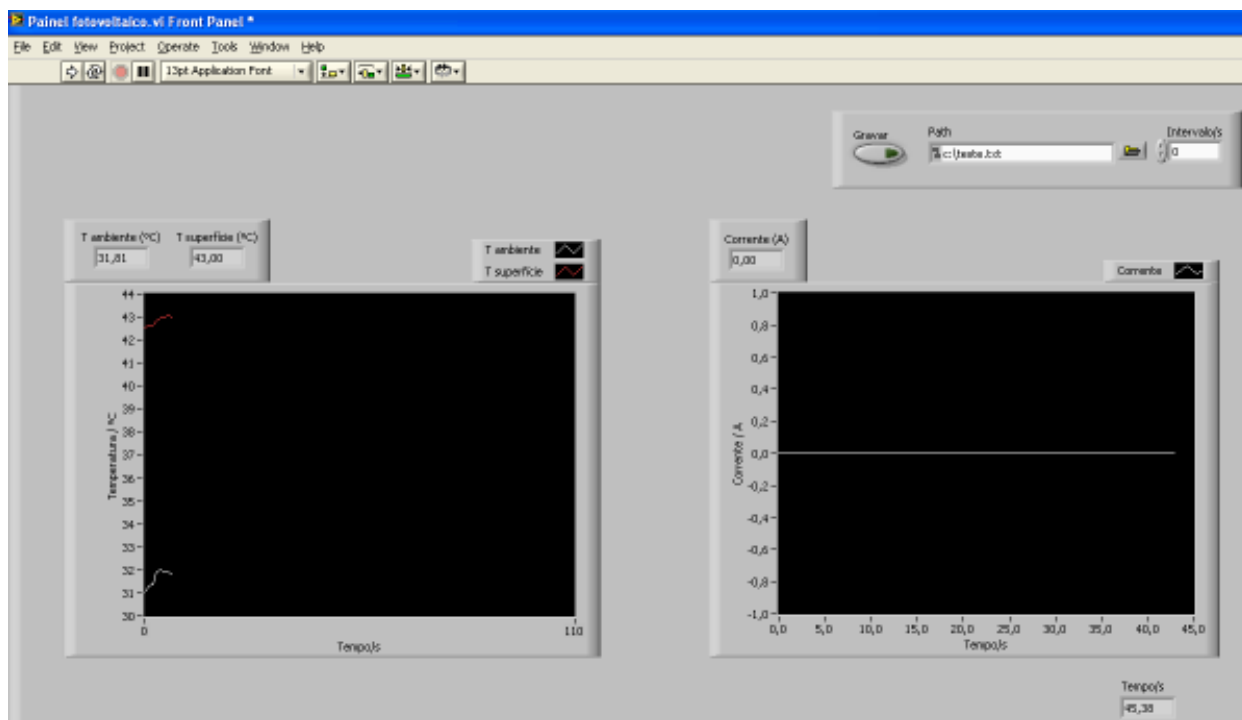


Figura 3.2.5 - Aspecto do programa de aquisição para o sistema de painéis fotovoltaicos.

Tal como para o colector solar térmico, também se recorreu à estação meteorológica situada no DEC, para obtenção de dados meteorológicos, mais propriamente da radiação solar global.

3.2.2 Resultados e Discussão

Existem dois modelos a considerar relativamente aos painéis fotovoltaicos. O primeiro é um modelo simples que considera que a queda de tensão do sistema fotovoltaico é ajustada a uma resistência em série. O segundo é um modelo complexo que, para além da resistência em série a representar a queda de tensão no circuito, admite também uma resistência em paralelo que representa as correntes de fuga.

Neste trabalho foi utilizado o modelo simplificado, pressupondo-se que o sistema fotovoltaico tem uma fonte de corrente dependente em paralelo com um díodo e que a resistência associada à queda de tensão é nula - Figura 3.2.6 [14].

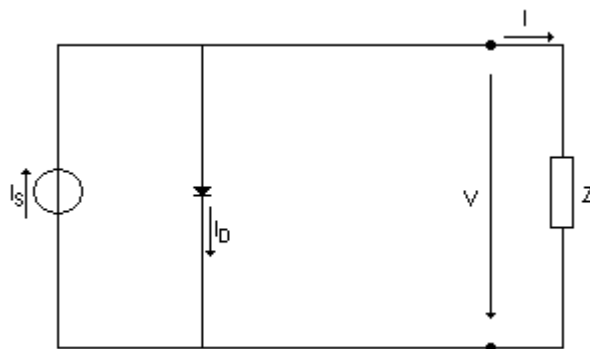


Figura 3.2.6 - Circuito eléctrico equivalente aos dois módulos fotovoltaicos que alimentam a carga Z.

A fonte de corrente I_s corresponde à corrente eléctrica produzida quando a radiação solar atinge a superfície das células. Essa corrente eléctrica depende da intensidade da radiação incidente. O díodo representa a junção p-n das células fotovoltaicas e é atravessado por uma corrente interna I_D que depende da tensão nos terminais dos painéis, V . Essa corrente interna unidireccional é dada pela seguinte expressão [14]:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \quad (3.2.1)$$

onde I_0 é a corrente inversa máxima de saturação do díodo que depende das características do material e da temperatura; m o factor de idealidade do díodo e V_T o potencial térmico:

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (3.2.2)$$

em que:

- k é a constante de Boltzmann ($1,3806 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$);
- T é a temperatura absoluta das células, em kelvin;
- q é a carga eléctrica do electrão ($1,6022 \times 10^{-19} \text{ C}$).

Sendo assim, a corrente I que atravessa a carga é:

$$I = I_S - I_D = I_S - I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \quad (3.2.3)$$

Existem dois pontos de operação limite a considerar no painel fotovoltaico: a corrente de curto-circuito e a tensão em circuito aberto. A corrente de curto-circuito, I_{CC} , é o valor máximo da corrente de carga, gerado por efeito fotovoltaico, quando a tensão e a corrente que atravessam o díodo são nulas. Neste caso, a corrente I fica:

$$I = I_S = I_{CC} \quad (3.2.4)$$

A tensão em circuito aberto, V_{CA} , é o valor de tensão máxima que se obtém nos terminais do painel, que ocorre quando a corrente é nula. Da Equação (3.2.3) obtém então:

$$V_{CA} = mV_T \ln \left(1 + \frac{I_S}{I_0} \right) \quad (3.2.5)$$

Estes dois valores limite são característicos do painel e são fornecidos pelo fabricante em condições de operação de referência. Além destes, os valores de potência, tensão de potência e corrente de potência máximos também são dados pelo fornecedor, para as condições de operação de referência, Tabela 3.2.1.

Aplicando a Equação (3.2.3) às condições de referência, para os casos de circuito aberto, curto-circuito e potência máxima, respectivamente, obtém-se:

$$0 = I_{S,r} - I_{0,r} \left(e^{\frac{V_{CA,r}}{mV_{T,r}}} - 1 \right) \quad (3.2.6)$$

$$I_{CC,r} = I_{S,r} \quad (3.2.7)$$

$$I_{\max,r} = I_{S,r} - I_{0,r} \left(e^{\frac{V_{\max,r}}{mV_{T,r}}} - 1 \right) \quad (3.2.8)$$

Da Equação (3.2.8) é possível determinar o factor de idealidade do díodo, da seguinte forma:

$$m = \frac{V_{\max,r} - V_{CA,r}}{V_T \ln \left(1 - \frac{I_{\max,r}}{I_{CC,r}} \right)} \quad (3.2.9)$$

Calculado o factor de idealidade do díodo, reúnem-se todas as condições para calcular o último parâmetro, a corrente inversa máxima de saturação nas condições de referência, através da seguinte expressão, deduzida a partir da Equação (3.2.6):

$$I_{0,r} = \frac{I_{S,r}}{\frac{V_{CA,r}}{e^{mV_{T,r}} - 1}} \quad (3.2.10)$$

sendo que $I_{S,r}$ é igual a $I_{CC,r}$, no ponto de curto-circuito, como referido na Equação (3.2.7).

Este conjunto de expressões permite obter as curvas características I-V. No entanto, o comportamento das curvas I-V varia com a alteração das condições de temperatura de funcionamento das células, T , e da potência da radiação incidente, G . As Equações (3.2.11) e (3.2.12) relacionam I_0 e I_S , respectivamente, com os valores referência, obtidos a partir dos dados do fabricante.

$$\frac{I_0}{I_{0,r}} = \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \quad (3.2.11)$$

$$\frac{I_S}{I_{S,r}} = \frac{G}{G_r} \quad (3.2.12)$$

A potência eléctrica do sistema pode ser calculada da seguinte forma:

$$P = VI = V \left(I_{CC} - I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \right) \quad (3.2.13)$$

O valor de potência máxima obtém-se quando $\frac{dP}{dV} = 0$, ou seja, quando:

$$\frac{dP}{dV} = I_{CC} + I_0 \left(1 - e^{\frac{V}{mV_T}} - \frac{V}{mV_T} e^{\frac{V}{mV_T}} \right) = 0 \quad (3.2.14)$$

em que, nesta situação, V corresponde ao V_{\max} . Como se trata de uma equação não-linear, terá de ser resolvido por um método iterativo, como o método de Newton, cuja expressão é a seguinte:

$$V_{m\acute{a}x}^{(i+1)} = V_{m\acute{a}x}^{(i)} - \frac{I_{CC} + I_0 \left(1 - e^{-\frac{V_{m\acute{a}x}^{(i)}}{mV_T}} - \frac{V_{m\acute{a}x}^{(i)}}{mV_T} e^{-\frac{V_{m\acute{a}x}^{(i)}}{mV_T}} \right)}{-\frac{I_0}{mV_T} e^{-\frac{V_{m\acute{a}x}^{(i)}}{mV_T}} \left(2 + \frac{V_{m\acute{a}x}^{(i)}}{mV_T} \right)} \quad (3.2.15)$$

Partindo de um valor de $V_{m\acute{a}x}^0$ arbitrado, calcula-se $V_{m\acute{a}x}^1$ e substitui-se na Equação (3.2.14). Este processo é repetido e o método converge quando o valor de $V_{m\acute{a}x}^{(i+1)}$ obtido iguala a Equação (3.2.14) a zero.

Assim, a corrente máxima fica:

$$I_{m\acute{a}x} = I_{CC} - I_0 \left(e^{\frac{V_{m\acute{a}x}}{mV_T}} - 1 \right) \quad (3.2.16)$$

A eficiência é então dada pela seguinte expressão:

$$\eta(\%) = \frac{P_{m\acute{a}x}}{GA} \times 100 = \frac{I_{m\acute{a}x} V_{m\acute{a}x}}{GA} \times 100 \quad (3.2.17)$$

Graficamente, através das curvas I-V e P-V, podem ser determinadas a corrente de curto-circuito, tensão em circuito aberto, corrente e tensão máximas. Como mostra a Figura 3.2.7, a corrente de curto-circuito é o ponto em que a tensão é nula. A tensão em circuito aberto corresponde ao ponto em que a corrente se anula. A corrente e tensão máximas são determinadas através da curva I-V, correspondendo ao máximo da curva P-V, que é o ponto de potência máxima.

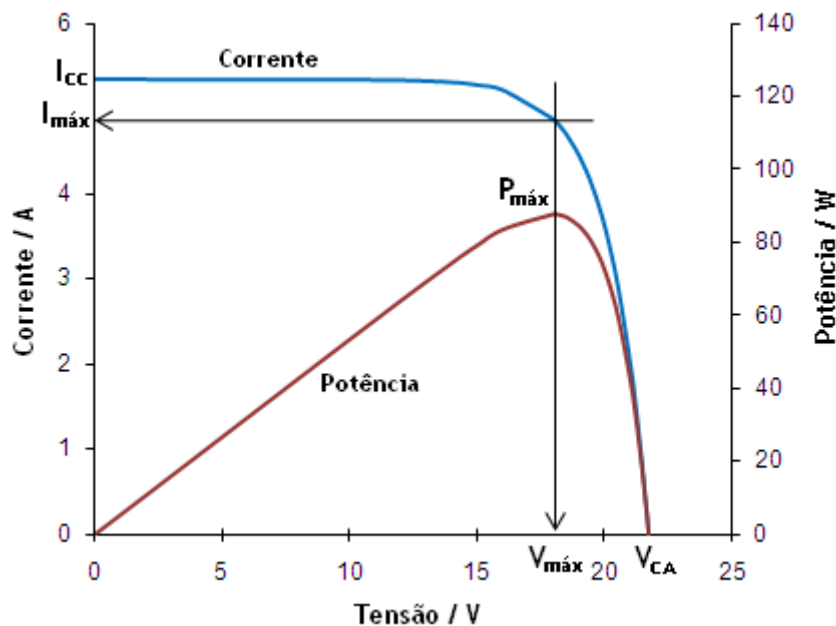


Figura 3.2.7 - Gráfico exemplificativo para determinação da corrente de curto-circuito, tensão em circuito aberto e corrente e tensão máximas.

Com o objectivo de comparar os resultados experimentais com os valores típicos para este sistema, foram determinadas as curvas características I-V dos dois módulos fotovoltaicos ligados em série, através dos dados fornecidos pelo fabricante - Tabela 3.2.2.

Tabela 3.2.2 - Características eléctricas nas condições STC, para um módulo e para dois módulos ligados em série.

	Um módulo	Dois módulos em série
Potência máxima - $P_{máx}$ (W)	87	175
Tensão de potência máxima - $V_{máx}$ (V)	17,4	34,8
Corrente de potência máxima - $I_{máx}$ (A)	5,02	5,02
Tensão em circuito aberto - V_{CA} (V)	21,7	43,4
Corrente de curto-circuito - I_{CC} (A)	5,34	5,34

No Anexo 3 é apresentada a folha de especificação que contém as curvas I-V para apenas um módulo fotovoltaico, a várias temperaturas das células e vários níveis de irradiação solar.

Recorrendo às expressões acima descritas, foram calculados os parâmetros $V_{T,r}$, m , $I_{S,r}$ e $I_{0,r}$, para os dois módulos colocados em série, utilizando os valores de referência apresentados na Tabela 3.2.2. Para as condições de referência, obtêm-se então os seguintes valores:

Tabela 3.2.3 - Parâmetros para as condições de referência.

$V_{T,r}$	$2,57 \times 10^{-2} \text{ V}$
m	119
$I_{S,r}$	5,34 A
$I_{0,r}$	$3,62 \times 10^{-6} \text{ A}$

Com esses parâmetros e recorrendo às Equações (3.2.3) e (3.2.13) é possível traçar os gráficos I-V e P-V, respectivamente, para as condições de referência - Figura 3.2.8.

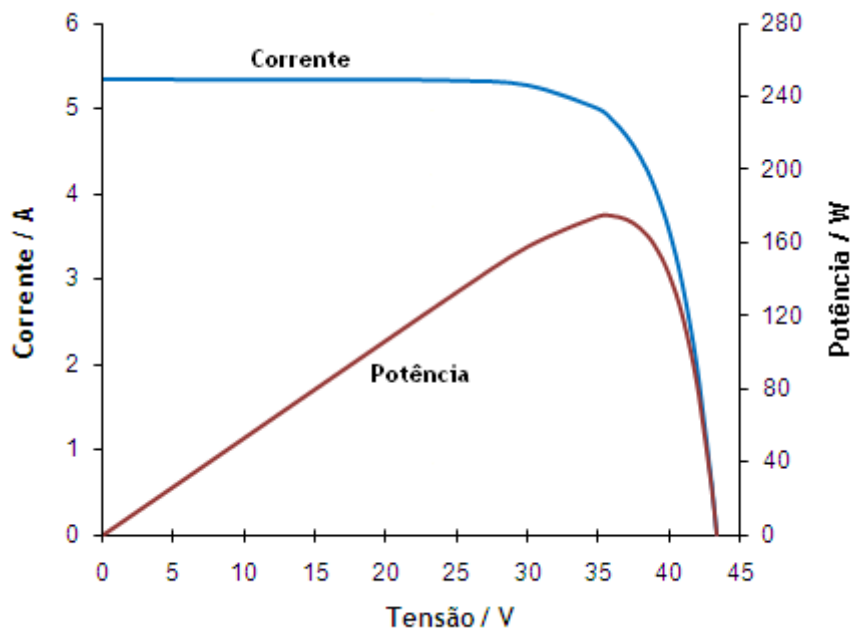


Figura 3.2.8 - Curvas características I-V e P-V para irradiância solar de $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ e temperatura das células de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, para os dois módulos ligados em série.

A área efectiva de células fotovoltaicas existentes nos dois módulos é $1,16 \text{ m}^2$, sendo que a potência máxima é 175 W . Recorrendo à Equação (3.2.17) sabe-se que, para estas condições, a eficiência do painel é de 15% .

Conforme se referiu anteriormente, o perfil das curvas I-V depende da variação da temperatura de funcionamento das células fotovoltaicas e da potência da radiação solar. Aplicando a Equação (3.2.11), é feita a correcção do parâmetro I_0 , em relação aos valores de referência, para qualquer temperatura das células. Na Figura 3.2.9 estão apresentadas as curvas para três temperaturas distintas, 25 °C, 50 °C e 75 °C, e 1000 W·m⁻² de irradiância solar.

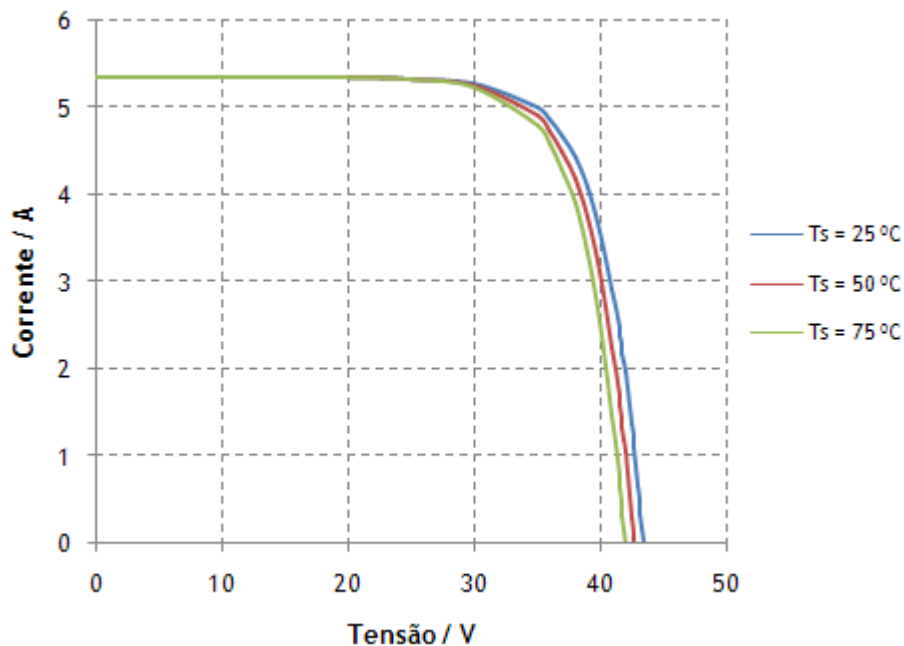


Figura 3.2.9 - Curvas I-V para variação da temperatura das células.

Como se pode verificar, a variação da corrente de curto-circuito é quase nula e desta forma, nos cálculos onde intervém, a sua variação é desprezada. Por outro lado, a tensão em circuito aberto é afectada, diminuindo com o aumento da temperatura das células, o que faz com que a potência de saída do painel seja menor. Esta variação deve-se ao facto da corrente inversa de saturação, I_0 , depender das características do material da célula e da sua temperatura. Essa dependência é traduzida matematicamente através da seguinte expressão [14]:

$$I_0 = DT^3 e^{\frac{\varepsilon_s}{m'V_T}} \quad (3.2.18)$$

em que D é uma constante, ε_s é o hiato do silício (1,12 eV), m' é o factor de idealidade equivalente a uma célula e T a temperatura das células. Assim, o valor de I_0 aumenta com o

aumento da temperatura, fazendo com que a tensão em circuito aberto diminua, segundo a Equação (3.2.5).

Quando a potência da radiação solar varia, as curvas apresentam um comportamento distinto que pode ser observado na Figura 3.2.10.

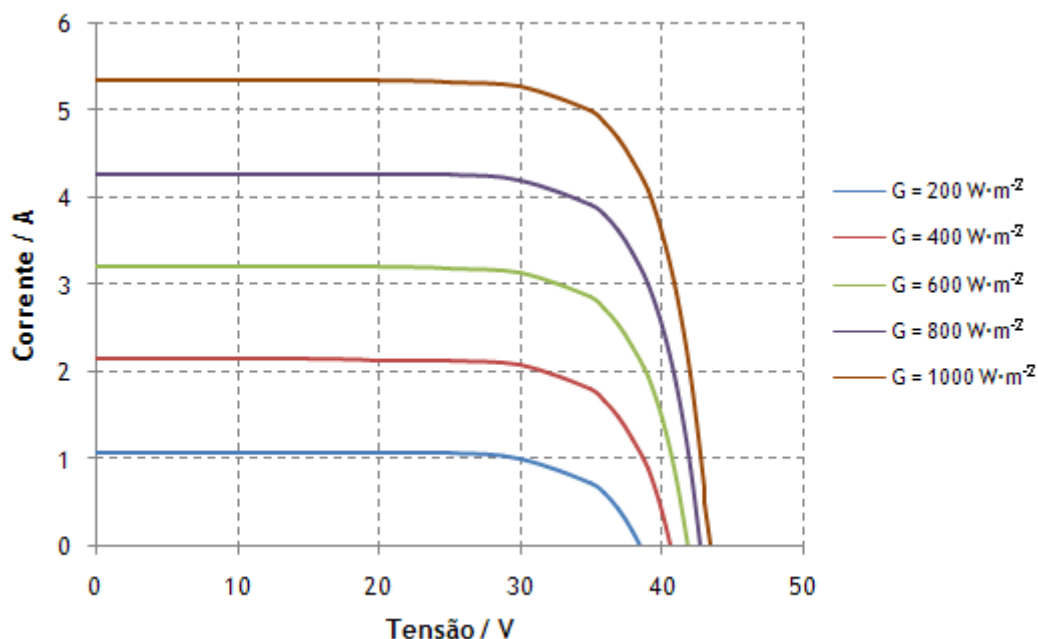


Figura 3.2.10 - Curvas I-V com variação da potência da radiação solar, para temperatura das células de 25 °C.

O aumento da potência da radiação provoca um aumento significativo na corrente de curto-circuito e um pequeno aumento na tensão em circuito aberto, fazendo com que a potência de saída também aumente.

Neste trabalho estudou-se a influência do ângulo de inclinação e azimute, da temperatura das células e da potência da radiação solar na eficiência dos módulos fotovoltaicos. Verificou-se também a influência da existência de sujidade superficial, simulada por pó de talco, no perfil de variação das curvas características.

✓ Ângulos de inclinação e azimute

Os ângulos óptimos de inclinação e azimute de um painel variam consoante o dia do ano e hora do dia, uma vez que, devido à inclinação da Terra, a radiação solar não atinge a sua superfície sempre com a mesma inclinação. Assim, o ângulo entre o plano do equador e a recta definida entre os centros do Sol e da Terra, δ_s , varia entre $-23,45^\circ$, no solstício de Inverno (21 de Dezembro), e $23,45^\circ$ no solstício de Verão (21 de Junho), sendo nulo nos equinócios de Primavera (21 de Março) e Outono (21 de Setembro) - Figura 3.2.11.

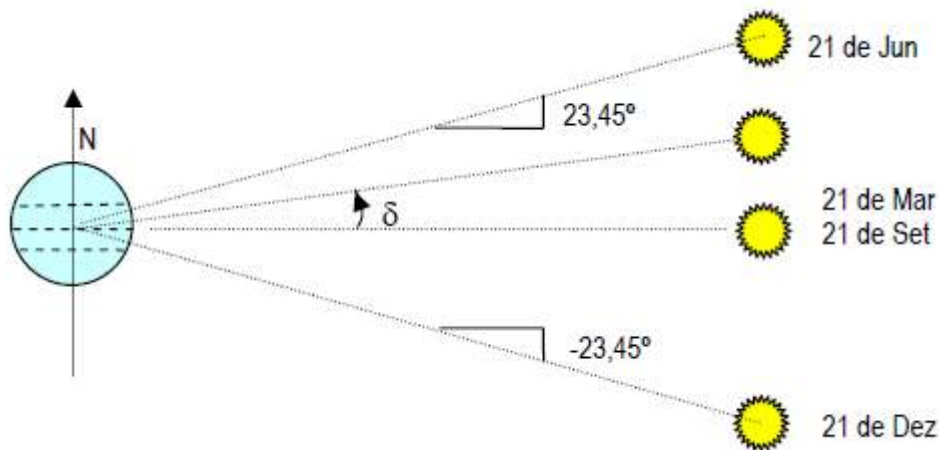


Figura 3.2.11 - Ângulo de inclinação solar (adaptado de [27]).

Este ângulo pode ser calculado matematicamente através da Equação (3.2.19) e depende do dia juliano, n , que toma o valor 1 para o dia 1 de Janeiro.

$$\delta_s = 23,45 \operatorname{sen} \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right] \quad (3.2.19)$$

O conhecimento deste valor permite ter a noção do melhor ângulo de inclinação do painel, α , de maneira a maximizar o seu rendimento. Isto é, sabendo a latitude do local e subtraindo-lhe o ângulo de inclinação solar, o resultado será o ângulo de inclinação a que o painel deve estar para que a recta que passa no centro do Sol forme um ângulo com o painel o mais próximo possível de 90° . Assim, para o hemisfério Norte, o melhor ângulo de inclinação do painel durante o Verão será menor que a latitude do local, durante o Inverno será maior e durante a Primavera e Outono, aproximadamente igual à latitude do local. O local onde o painel fotovoltaico está instalado, FEUP, tem latitude, L , $41^\circ 10' N$ e longitude $8^\circ 35' W$.

Experimentalmente, fixou-se a orientação de azimute para conhecer o ângulo de inclinação ao qual o painel tem melhor eficiência. No hemisfério Norte, os painéis têm melhor eficiência quando orientados para Sul. Assim, no dia 21 de Maio, a diferentes horas do dia

(horas de maior irradiância solar) e para um ângulo de azimute de 180° em relação a Norte (Norte - 0°) realizaram-se ensaios variando a inclinação do painel. Para este dia, dia juliano 141, o ângulo de inclinação óptimo “teórico” seria 21°. Na Figura 3.2.12 encontram-se as curvas I-V para ângulos de inclinação do painel entre 3° e 90°, tendo os ensaios sido realizados pelas 11h00, altura esta em que se verificava uma potência de radiação solar de cerca de 660 W·m⁻².

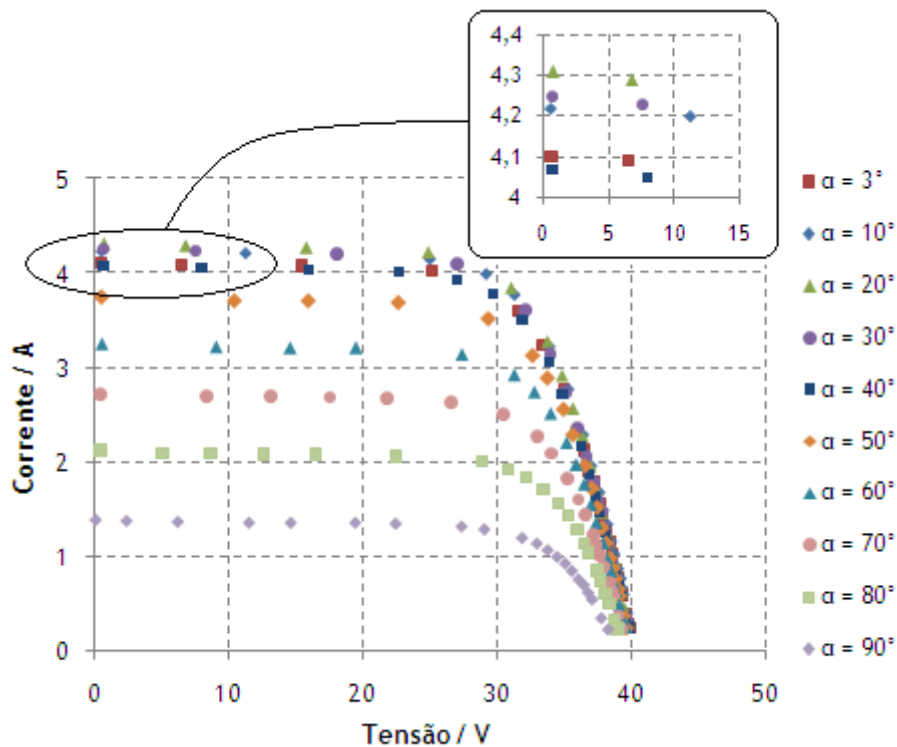


Figura 3.2.12 - Curvas I-V para a variação da inclinação do painel, para o dia 21 de Maio, por volta das 11h00.

Como se pode verificar, tendo em consideração apenas a corrente de curto-circuito, o melhor ângulo de inclinação neste dia e hora é 20°, com uma corrente gerada de 4,31 A. Analisando as potências máximas de cada curva, através do método gráfico (Figura 3.2.7), obtém-se os seguintes valores para cada ângulo de inclinação.

Tabela 3.2.4 - Potências máximas adquiridas com vários ângulos de inclinação no dia 21 de Maio 11h00.

α °	3	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$P_{m\acute{a}x}$ (W)	114	116	123	115	113	104	93	75	59	38

Como seria de esperar, a potência máxima é maior para o ângulo de inclinação de 20° , correspondendo a uma eficiência igualmente superior de 16 %.

A mesma análise foi ainda efectuada por volta das 12h00 e 14h00. Os resultados obtidos encontram-se representados nas Figuras 3.2.13 e 3.2.14, respectivamente.

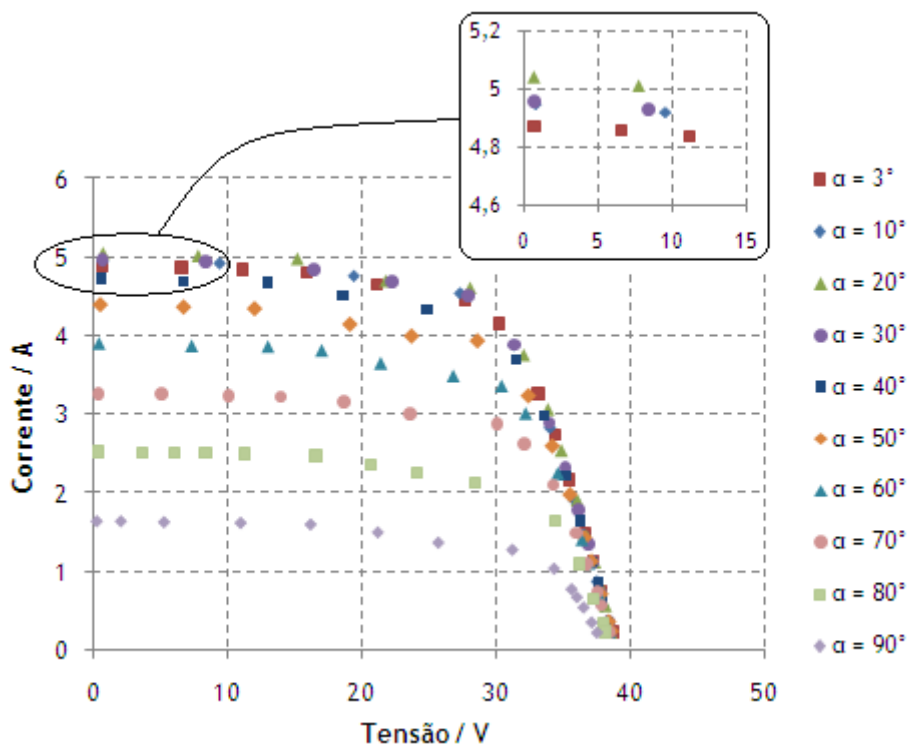


Figura 3.2.13 - Curvas I-V para a variação da inclinação do painel, para o dia 21 de Maio, por volta das 12h00.

Observando os resultados obtidos a esta hora, em que a potência da radiação solar incidente era de cerca de $740 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, verifica-se que o ângulo de 20° continua a ser o que origina melhores valores, com uma corrente de curto-circuito de 5,04 A, uma potência máxima de 133 W e uma eficiência de 16 %.

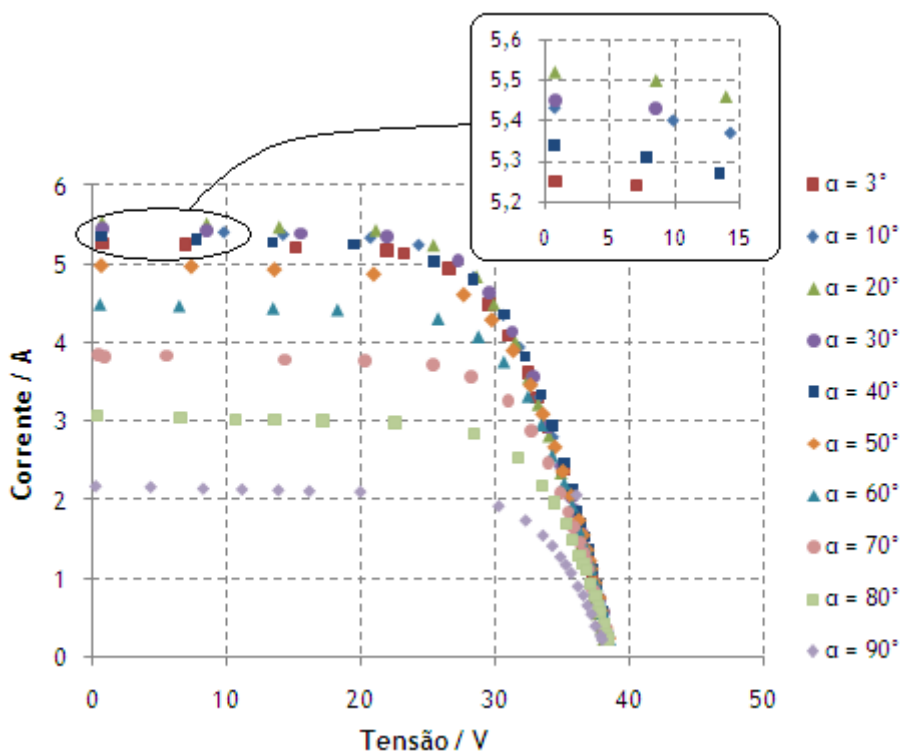


Figura 3.2.14 - Curvas I-V para a variação da inclinação do painel, para o dia 21 de Maio, por volta das 14h00.

Às 14h00 do mesmo dia, com uma irradiância de $800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, o ângulo de inclinação do painel que origina melhores resultados é de 20° . A corrente de curto-circuito é de 5,52 A, a potência máxima de é 139 W obtendo-se uma eficiência de 15 %.

Com o objectivo de verificar a influência de uma pequena variação da inclinação do painel nos perfis de variação das curvas características, fez-se a mesma análise variando apenas 1° na inclinação, entre 15° e 24° . Na Figura 3.2.15 apresenta-se os resultados deste ensaio efectuado no mesmo dia, 21 de Maio, por volta das 15h00, com uma potência de radiação solar de $770 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

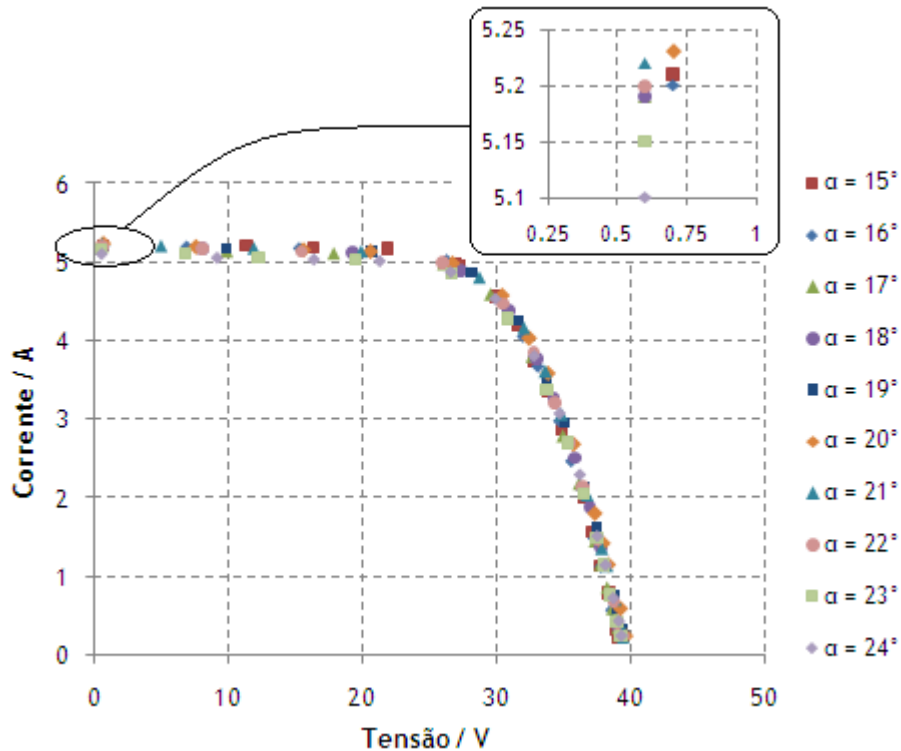


Figura 3.2.15 - Curvas I-V para variações de 1° na inclinação do painel, para o dia 21 de Maio, por volta das 15h00.

Como se pode verificar, a variação de 1° na inclinação do painel não é significativa, originando pouca variabilidade nos perfis e uma grande proximidade entre os pontos experimentais. A corrente de curto-circuito varia entre 5,10 A para inclinação de 24° e 5,23 A para inclinação de 20°, reforçando mais uma vez que este último é o melhor valor de inclinação do painel. Para estas condições verifica-se uma potência máxima de 138 W e uma eficiência de 15 %.

Conclui-se que a inclinação para a qual o painel é mais eficiente é a inclinação de $(20 \pm 1)^\circ$, para qualquer hora do dia, sendo este valor bastante próximo do valor previsto pelas equações, 21°.

Uma vez determinado o melhor ângulo de inclinação do painel fotovoltaico, fez-se o estudo do melhor ângulo de azimute. Esta variável depende do ângulo de azimute solar, ϕ_s , que, além de variar com o dia do ano, varia principalmente com a hora do dia, podendo ser calculado a partir da seguinte expressão [27]:

$$\text{sen } \phi_s = \frac{\cos \delta_s \text{ sen } H}{\cos \beta} \quad (3.2.20)$$

em que:

- δ_s é o ângulo de inclinação solar, calculado pela Equação (3.2.19);
- H é o ângulo horário, que é o grau que a Terra tem de girar até chegar ao meio-dia, ou seja, $H = 15^\circ \times$ número de horas até chegar ao meio-dia ($H > 0^\circ$ antes do meio-dia e $H < 0^\circ$ depois do meio-dia);
- β é o ângulo de altitude solar, determinado pela seguinte equação:

$$\text{sen}\beta = \text{cos}L \cdot \text{cos}\delta_s \cdot \text{cos}H + \text{sen}L \cdot \text{sen}\delta_s \quad (3.2.21)$$

Na seguinte figura encontra-se representado o esquema da posição do Sol ao longo do dia, mostrando os ângulos de azimute e altitude relativamente ao ponto onde se situa um painel.

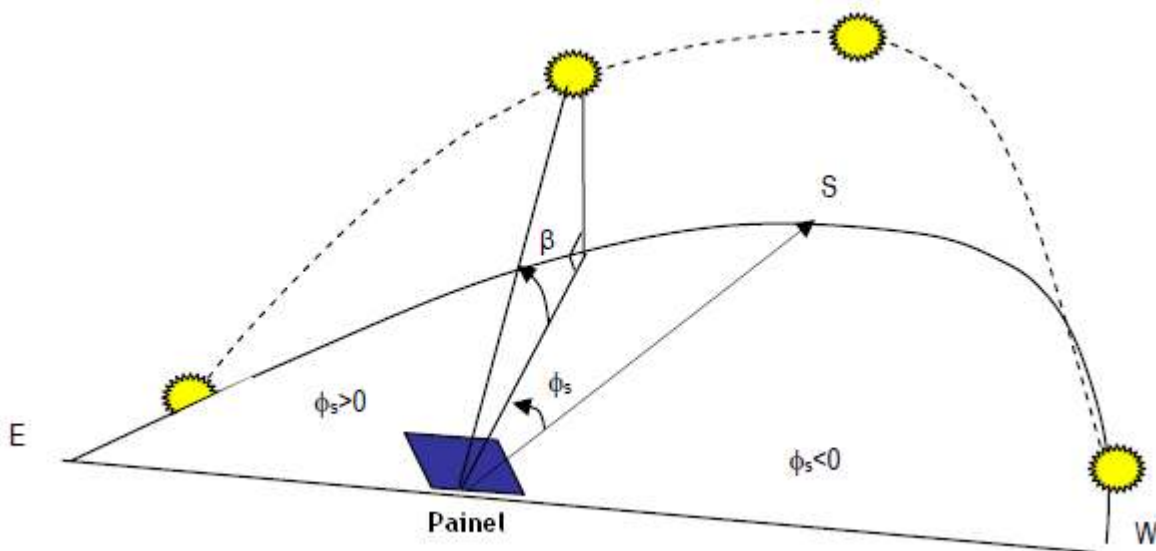


Figura 3.2.16 - Posição do sol ao longo do dia, ângulos de azimute e altitude (adaptado de [27]).

Assim, teoricamente, para se obter uma maior eficiência no painel fotovoltaico, o ângulo de azimute do painel, ϕ_p , deveria corresponder ao ângulo de azimute solar. Como na prática o ângulo de azimute do painel é controlado fazendo uso de uma bússola digital, onde 0° corresponde a Norte e 180° corresponde a Sul, o ângulo óptimo numa determinada hora do dia é dado por:

$$\phi_p = 180^\circ - \phi_s \quad (3.2.22)$$

No dia 17 de Junho de 2010 efectuaram-se ensaios onde, com um ângulo de inclinação de 20° (considerado o melhor no ensaios anteriormente realizados), fez-se variar o ângulo de azimute do painel a diferentes horas do dia. Foram determinados os ângulos de azimute que melhor eficiência apresentavam com variação de 1 hora, entre as 10h30 e as 16h30. Esta análise é semelhante à efectuada para a inclinação do painel, representando-se na Figura 3.2.17 as curvas I-V para as 10h30 desse dia, período em que se verificava uma irradiância de cerca de $580 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

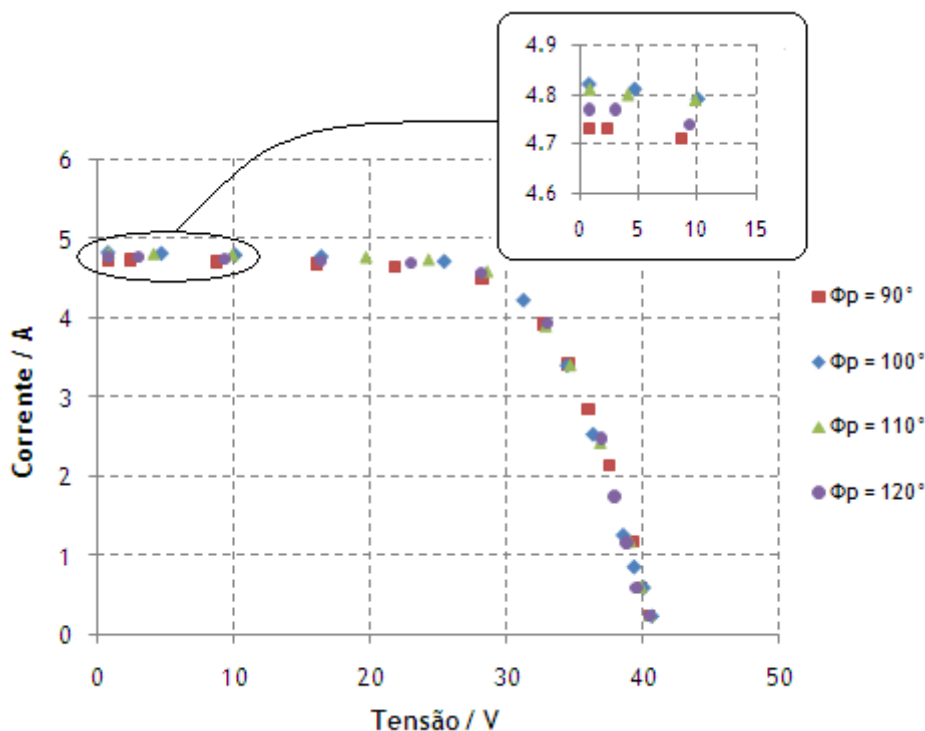


Figura 3.2.17 - Curvas I-V para a variação do azimute do painel, para o dia 17 de Junho, por volta das 10h30.

Como se pode verificar pela corrente de curto-circuito, o melhor ângulo de azimute do painel corresponde a 100° para esta hora com potência máxima de 130 W e uma eficiência de 19 %. Neste caso, estando a cerca de 1,5 horas do meio-dia, o azimute solar, ϕ_s , é cerca de 54° , sendo que teoricamente o ângulo de azimute ideal seria cerca de 126° em relação a Norte.

Para as restantes horas efectuou-se a mesma análise, apresentando-se na Tabela 3.2.5 os valores dos ângulos de azimute teóricos esperados, os melhores ângulos de azimute obtidos experimentalmente, a potência da radiação solar a essa hora, a potência máxima obtida pelo sistema de painéis e a sua eficiência. No Anexo 4 encontram-se as curvas I-V da variação do ângulo de azimute do painel, para as restantes horas deste dia.

Tabela 3.2.5 - Resultados experimentais e teoricamente previstos a diferentes horas do dia 17 de Junho de 2010.

Hora	$\phi_{p, \text{modelo}} \text{ } ^\circ$	$\phi_{p, \text{exp.}} \text{ } ^\circ$	$G \text{ (W}\cdot\text{m}^{-2}\text{)}$	$P_{\text{máx}} \text{ (W)}$	$\eta \text{ (\%)}$
10h30	126	100	582	130	19
11h30	158	120	700	140	17
12h30	202	150	778	140	16
13h30	234	170	796	141	15
14h30	252	235	792	146	16
15h30	265	260	724	142	17
16h30	265	270	631	130	18

Como se pode verificar, o ângulo de azimute óptimo varia ao longo do dia, uma vez que o ângulo de azimute solar também varia. Comparando os resultados dos ângulos obtidos teórica e experimentalmente, verifica-se uma maior diferença entre os valores às 12h30 e 13h30 com um erro de 26 % e 27 %, respectivamente. Os restantes valores mostram-se relativamente próximos. Na presente tabela verifica-se também uma diminuição da eficiência quando a potência da radiação solar aumenta. Esta situação poder-se-á dever ao aumento da temperatura das células fotovoltaicas, cuja influência será analisada no ponto seguinte.

✓ Temperatura de funcionamento das células fotovoltaicas

Como foi verificado e discutido anteriormente, a temperatura de funcionamento das células tem influência determinante no perfil de variação das curvas I-V e, conseqüentemente, na eficiência dos painéis fotovoltaicos. Na Figura 3.2.18 encontram-se três curvas obtidas para três temperaturas de funcionamento das células, 35 °C, 41 °C e 47 °C, e irradiância solar de cerca de $744 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

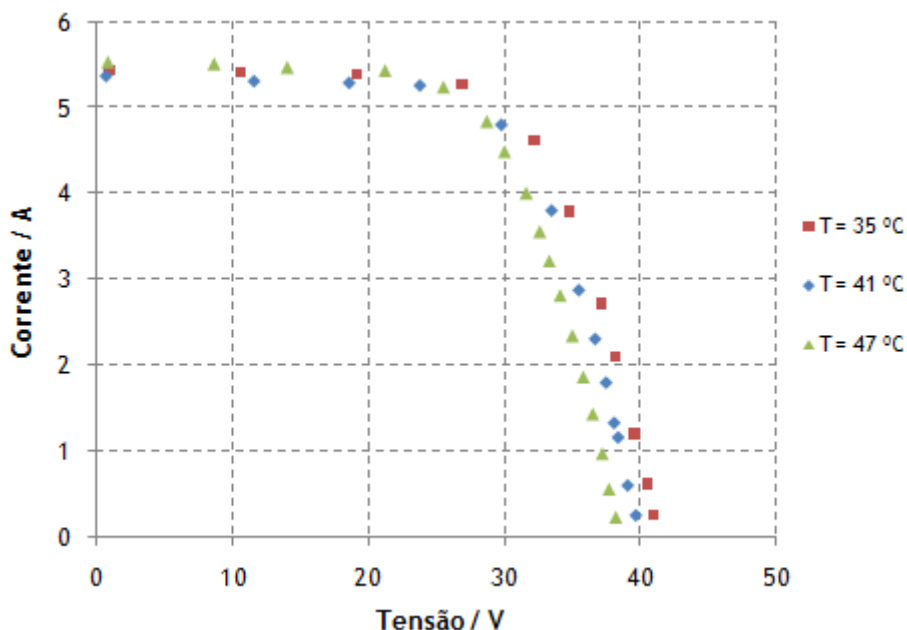


Figura 3.2.18 - Curvas I-V experimentais com variação da temperatura de funcionamento das células fotovoltaicas.

É nítida a diminuição da tensão em circuito aberto quando a temperatura das células aumenta, enquanto que a corrente de curto-circuito é bastante próxima para as três temperaturas. Estes resultados confirmam o modelo matemático cujos perfis se apresentam na Figura 3.2.9 e é verificada a aplicabilidade da Equação (3.2.18) na previsão da corrente inversa de saturação quando dependente da temperatura das células fotovoltaicas.

Uma vez que a corrente inversa de saturação é afectada com a variação da temperatura das células, a potência máxima de saída do sistema de painéis fotovoltaicos varia e, com isto, a eficiência também é afectada. Para a temperatura de 35 °C obtém-se uma eficiência de 16,7 %, para as temperaturas de 41 °C e 47 °C a eficiência é de 15,9 % e 15,6 %, respectivamente.

✓ Potência da radiação solar

Conforme descrito anteriormente, a potência da radiação solar é um factor determinante na eficiência dos painéis fotovoltaicos. De maneira a verificar o comportamento das curvas I-V a diferentes potências de radiação, foram efectuadas experiências em diversas horas do dia e em vários dias. Apresenta-se na Figura 3.2.19 as curvas obtidas para potências de radiação entre cerca de $400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ e $900 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

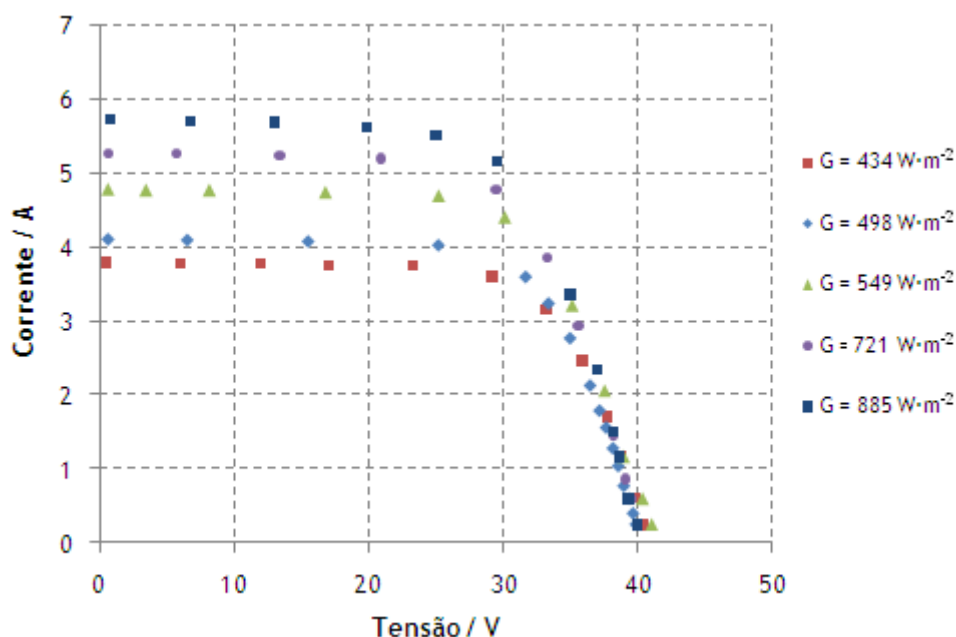


Figura 3.2.19 - Curvas I-V experimentais com variação da potência da radiação solar.

Como se pode verificar, os valores de corrente de curto-circuito variam entre os 3,79 A e os 5,72 A para as potências de radiação de $434 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ e $885 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, respectivamente. Como era de esperar, o valor de corrente de curto-circuito diminui com a diminuição da irradiância solar. Quanto ao valor de tensão em circuito aberto, verificam-se variações entre os 39 V e 41 V. A Figura 3.2.10 mostra que a tensão em circuito aberto diminui com a diminuição do G , no entanto, essa diminuição mostra-se mais significativa para valores baixos de radiação. No caso em estudo, Figura 3.2.19, as diferenças entre os valores de tensão em circuito aberto não apresentam essa coerência, o que se poderá dever à diferente temperatura de funcionamento das células em cada ensaio.

Comparando estes resultados com os resultados obtidos aplicando o modelo matemático acima descrito, verificam-se diferenças significativas na potência máxima e, consequentemente, na eficiência dos painéis para algumas potências de radiação solar incidente. Na Tabela 3.2.6 encontram-se os valores de eficiência teoricamente previstos e obtidos experimentalmente para diferentes potências de radiação solar e diferentes temperaturas de funcionamento das células.

Tabela 3.2.6 - Eficiências obtidas pelo modelo e obtidas experimentalmente a diferentes potências de radiação solar.

G ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)	T_s ($^{\circ}\text{C}$)	η_{modelo} (%)	$\eta_{\text{exp.}}$ (%)
434	33	14	21
498	35	14	20
549	34	14	21
721	37	15	17
885	39	15	15

Como se pode observar, para potências de radiação baixas, o modelo afasta-se dos valores experimentais. No entanto, à medida que a irradiância aumenta, a eficiência experimental aproxima-se da eficiência obtida pelo modelo matemático, 15 %, eficiência nominal dos painéis. Ao contrário do que se verifica através do modelo, a eficiência experimental diminui com o aumento da potência da radiação solar. Este facto poder-se-á dever ao aumento da resistência eléctrica provocado pelo aumento da temperatura das células fotovoltaicas. Existem estudos que mostram que a eficiência relativa das células de silício aumenta até um determinado valor de irradiância, cerca de $400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, começando posteriormente a diminuir, devido ao aquecimento das células fotovoltaicas [28]. A eficiência experimental para $498 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ de irradiância foi ligeiramente inferior à obtida para $434 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ e $549 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, o que poderá dever-se à influência da temperatura de funcionamento das células.

✓ Sujidade superficial

Para conhecer a influência que a sujidade na superfície dos painéis fotovoltaicos tem no perfil de variação das curvas I-V, foi usado pó de talco. Este simula a sujidade provocada por pó. Na Figura 3.2.20 encontram-se as curvas I-V para o sistema de painéis limpos, sem qualquer sujidade, e com o pó, obtidas à mesma hora, com uma potência de radiação de $743 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, nas mesmas condições de inclinação e azimute.

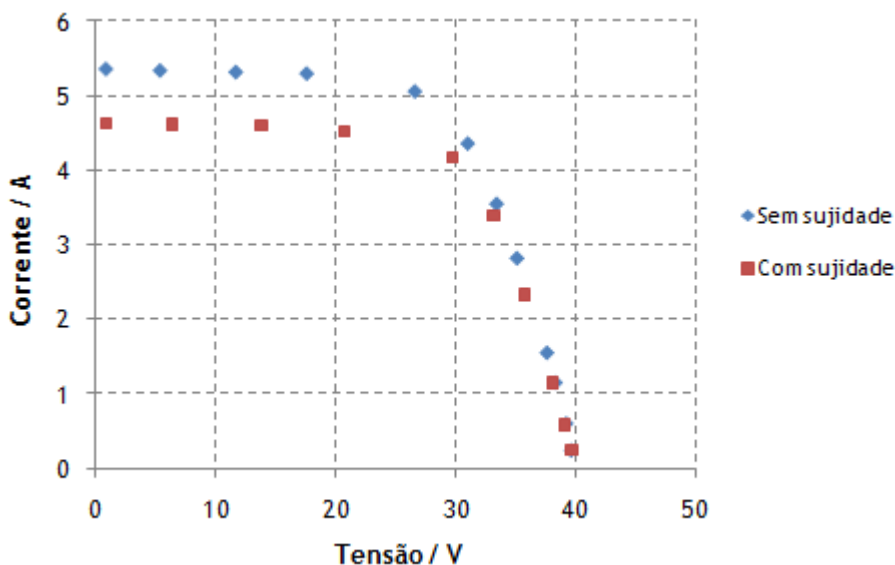


Figura 3.2.20 - Curvas I-V experimentais com e sem sujidade superficial.

Verifica-se um abaixamento significativo da corrente de curto-circuito de 5,35 A para 4,63 A, quando colocado o pó de talco na superfície dos painéis. Esta diminuição da corrente traduz-se igualmente numa diminuição da potência máxima de saída do sistema fotovoltaico e na eficiência. Enquanto que para os painéis limpos obtém-se uma eficiência de 16 %, para os painéis com pó obtém-se 15 %.

No Anexo 5 encontram-se os manuais de experiências para ambos os sistemas de aproveitamento solar que poderão ser usados nas aulas práticas do MIEQ.

4 Conclusões

A primeira parte deste trabalho incidiu na instalação do colector solar do tipo termossifão e do sistema de dois painéis fotovoltaicos no terraço do DEQ. O primeiro foi instalado por técnicos da empresa produtora, a NORQUENTE[®], já relativamente ao segundo foi necessária a construção de um suporte que permitisse a rotação dos painéis em azimute e inclinação com uma precisão de $\pm 1^\circ$. Uma vez implementados, juntamente com os respectivos sistemas de aquisição de dados, iniciou-se o estudo da eficiência de cada um dos sistemas.

O estudo do colector solar do tipo termossifão incidiu na determinação da eficiência do painel colector. Verificou-se o aumento da eficiência global do colector com a diminuição da potência da radiação solar e com o aumento do caudal de alimentação de água. Verificaram-se valores de eficiência próximos do valor que consta na licença de acreditação do colector solar da NORQUENTE[®], 73 %, para potências de radiação próximas de $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ e temperatura ambiente de $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Quanto ao sistema de painéis fotovoltaicos, foi analisada a eficiência destes sob várias condições de: ângulo de inclinação e azimute, temperatura de funcionamento das células, potência da radiação solar e sujidade superficial. Da análise feita à influência do ângulo de inclinação, concluiu-se que este não mostra diferenças significativas relativamente à hora do dia. Variando o ângulo de inclinação de forma incremental, desde 0° a 90° , verificou-se que o ângulo de $(20\pm 1)^\circ$ era o óptimo para o dia 21 de Maio entre as 11h00 e as 15h00, obtendo-se uma eficiência de cerca de 16 %. Comparando com o ângulo previsto teoricamente, 21° , o resultado obtido é bastante próximo. Uma vez determinado o ângulo óptimo de inclinação, fez-se o estudo da variação do ângulo de azimute, verificando-se que este varia consideravelmente com a hora do dia. Pela análise efectuada à temperatura de funcionamento das células, confirmou-se a diminuição da tensão em circuito aberto com o aumento da sua temperatura, de acordo com o descrito pelo modelo matemático usado. Assim, verificou-se também uma diminuição da eficiência dos painéis de 16,7 % para 15,6 %, para as temperaturas de $35 \text{ }^\circ\text{C}$ e $47 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente. Do estudo realizado à influência da potência da radiação solar comprovou-se a diminuição da corrente de curto-circuito com a diminuição da irradiância solar. No entanto, ao contrário do que se obteve a partir do modelo matemático, a eficiência obtida experimentalmente diminuiu com o aumento da potência da radiação solar, de 21 % para 15 %, para potências de $434 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ e $885 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, respectivamente. Por fim, foi analisada a influência que a sujidade superficial dos painéis tem na eficiência do sistema e concluiu-se que esta origina uma diminuição da eficiência de 16 % para 15 %.

5 Avaliação do Trabalho Realizado

5.1 Objectivos Realizados

Este trabalho teve como objectivo a implementação e estudo de dois sistemas de produção de energia a partir da energia solar: um colector solar térmico do tipo termossifão e um sistema de dois painéis fotovoltaicos.

O colector solar térmico foi instalado no terraço do DEQ por técnicos da empresa NORQUENTE[®], tendo sido posteriormente equipado com toda a instrumentação, termopares e caudalímetros, necessária para a aquisição dos dados. A construção do programa de aquisição de dados, ligação e calibração de instrumentação foram passos intermédios cuja complexidade justificam a referência. O principal objectivo do trabalho realizado neste sistema foi a determinação da eficiência a diferentes caudais de alimentação de água.

O sistema de painéis fotovoltaicos foi igualmente instalado no terraço do DEQ. Dadas as condições ambientais adversas que poderão ocorrer e de forma a salvaguardar todas as questões de segurança, foi projectado e implementado um sistema de suporte que, para além de robusto, permite a rotação dos painéis em inclinação e azimute. Posto isto, foram efectuadas todas as ligações eléctricas, instalados sensores de temperatura e construído o programa de aquisição de dados correspondente. O estudo deste sistema de painéis fotovoltaicos baseou-se na obtenção das curvas I-V sobre a influência de diferentes ângulos de inclinação e azimute, temperaturas de funcionamento das células, potências de radiação solar e estado de sujidade superficial.

Todos os objectivos propostos foram concretizados com sucesso e obtidos resultados satisfatórios.

5.2 Limitações e Trabalho Futuro

Uma vez que este trabalho se baseia no aproveitamento da energia solar para produção de energia térmica e eléctrica, as maiores limitações são as condições atmosféricas. A necessidade de radiação solar directa para realização dos trabalhos sugere que estas instalações sejam usadas como actividades experimentais nas aulas práticas do MIEQ durante o segundo semestre.

Sugere-se a substituição do multímetro que lê a tensão por outro com porta de série, que permita a comunicação com o computador de forma a adquirir todos os resultados no programa de aquisição. Os três reóstatos em série, que simulam a carga do sistema de painéis fotovoltaicos, poderão também ser substituídos por uma única carga electrónica que permita o controlo automático.

A existência de uma estação meteorológica no terraço do DEQ, próxima dos sistemas em questão, seria também uma mais valia ao seguimento deste trabalho, pois permitiria obter resultados mais fidedignos.

5.3 Apreciação final

Este trabalho mostrou-se bastante interessante, não só pelo tema promissor e aliciante que são as energias renováveis, mas principalmente pelos novos conhecimentos adquiridos. Toda a base prática que esteve presente na implementação dos dois sistemas, a programação em *Labview* e os conceitos associados ao sistema fotovoltaico, foram noções enriquecedoras tanto a nível intelectual como na prática de resolução de problemas.

Quanto aos objectivos do trabalho proposto, foram cumpridos com êxito, tendo-se criado uma boa base para os alunos que trabalharão com estas instalações.

Referências

- [1] - <http://energiasrenovaveis.com>, acessido a 15 de Março de 2010.
- [2] - http://www.estif.org/statistics/st_markets_in_europe_2008/, acessido a 15 de Março de 2010.
- [3] - <http://www.energy.eu/#renewable>, acessido a 15 de Março de 2010.
- [4] - http://www.portugal.gov.pt/pt/GC17/Noticias/Pages/20090922_Not_Eficiencia_Energetica.aspx, acessido a 7 de Julho de 2010.
- [5] - <http://www.renovaveisnora.pt/>, acessido a 7 de Julho de 2010.
- [6] - http://energia2020.fc.ul.pt/energia2020/apresentacoes/Rui_Lobo_Energia2020.pdf, acessido a 26 de Junho de 2010.
- [7] - <http://www.solarserver.com/knowledge/basic-knowledge/solar-collectors.html>, acessido a 16 de Março de 2010.
- [8] - The German Solar Society, *Planning and Installing Solar Thermal Systems - A Guide for Installers, Architects and Engineers*, Earthscan, 2005.
- [9] - <http://enerquest.ca/technologies.php>, acessido a 16 de Março de 2010.
- [10] - <http://www.aguaquentesolar.com/publicacoes/10/AQSIndustria.pdf>, acessido a 16 de Março de 2010.
- [11] - http://www.hotseason.pt/funcionamento_esolar.html, acessido a 21 de Junho de 2010.
- [12] - <http://www.enat.pt>, acessido a 23 de Agosto de 2010.
- [13] - <http://www.climatizacao.pt/edicoes/expresso---st-09/tema-de-capa.aspx>, acessido a 21 de Junho de 2010.
- [14] - Castro, R., *Introdução à Energia Fotovoltaica*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2009.
- [15] - Mah, O., *Fundamentals of Photovoltaic Materials*, National Solar Power Research Institute, Inc., 1998.
- [16] - www.norquente.pt, acessido a 1 de Junho de 2010.
- [17] - <http://experimenta.fe.up.pt/meteorologicalstation/Estacao.htm>, acessido durante Junho e Julho de 2010.
- [18] - Irvine, T., Hartnett, J., *Advances in Heat Transfer*, Volume 1, Elsevier, 2006, 135.

- [19] - Becker, B., Misra A., Fricke B., *Bulk Refrigeration of Fruits and Vegetables, Part I: Theoretical Considerations of Heat*, University of Missouri-Kansas City, 1995.
- [20] - Holman, J., *Heat Transfer*, McGraw Hill, 6th edition, 1986.
- [21] - Hussein, H., Mohamada, M., Asfour, A., Transient investigation of a thermosyphon flat-plate solar collector, *Applied Thermal Engineering*, 19, 789-800, 1999.
- [22] - www.hbcnetbase.com, acessado a 10 de Junho de 2010.
- [23] - Çengel, Y., *Heat Transfer*, McGraw Hill, 2nd edition, 28, 2003.
- [24] - www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html, acessado a 10 de Junho de 2010.
- [25] - Dias, D., *Radiation Control Coatings*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.
- [26] - http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0024957_03_postextual.pdf, acessado a 13 de Julho de 2010.
- [27] - Camus, C., Eusébio, E., *Gestão de Energia - Energia Solar*, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2006.
- [28] - Huld, T., Sári, M., Dunlop, E., Geographical Variation of the Conversion Efficiency of Crystalline Silicon Photovoltaic Modules in Europe, *Wiley Interscience*, 16, 595-607, 2008.

Anexo 1

Licença de certificação do colector solar térmico da NORQUENTE®



Rua José Afonso, 9 E – 2810-237 Almada – Portugal
Tel. 351. 21 258 69 40 – Fax. 351. 21 258 69 59

LICENCE TO USE KEYMARK

LICENÇA PARA O USO DA KEYMARK



Annex to the Licence no. <i>Anexo à Licença nº</i>	PSK - 001/2007	Date: <i>Data:</i>	2007-01-09
Type reference / Referência:	Norquente N2		
Collector type / Tipo de colector:	Flat plate with selective coating / Plano com superfície seletiva		
Dimensions / Dimensões:	Absorber area / Área do absorv.: 1,72 m ² Aperture area / Área de abertura: 1,91 m ² Gross area / Área total: 2,04 m ²		
Working pressure / Pressão de funcionamento:	3 bar		
Drop pressure / Perda de carga:	0,057 kg s ⁻¹ - 355 Pa		
Stagnation temperature / Temperatura de estagnação:	153 °C		
Rendimento instantâneo (área de abertura) / Instantaneous efficiency (opening area):			
η	0,731		
a_1 (W / °C m ²)	5,4		
a_2 (W / °C ² m ²)	0,004		
Time constant / Constante de tempo:	50 s		
Thermal capacity / Capacidade térmica:	24,7 kJ / K		
Incidence angle modifier (incidence angle = 50°) / Modificador de Ângulo (Ângulo de incidência = 50°):	0,82		

Note 1 / Nota 1: The manufacturer declares that certified solar collector used with frost protection mixture can be used in frost exposed areas / O fabricante declara que o colector solar térmico certificado, quando utilizado com mistura de fluido anti-congelante pode ser utilizado em ambientes com gelo / The freeze resistance test (clause 5.8 of EN 12975-2:2006) was not carried out. O ensaio de resistência ao congelamento (secção 5.8 da EN 12975-2:2006) não foi efectuado.

Note 2 / Nota 2: The impact resistance test (clause 5.10 of EN 12975-2) was not carried out. Opcional test / O ensaio de resistência ao impacto (secção 5.10 da EN 12975-2:2006) não foi efectuado. Ensaio opcional.

Figura A1.1 - Licença de certificação do colector solar térmico da NORQUENTE®.

Anexo 2

Processo de produção dos colectores solares térmicos da NORQUENTE®

A primeira etapa do processo é a soldadura do absorvedor, processo pelo qual esta peça, depois de receber um tratamento por pulverização catódica (não efectuado na empresa) é soldada aos tubos de cobre onde circula o fluido de transporte de calor. A soldadura é feita por ultra-sons, processo este que induz localmente uma vibração de alta frequência e, sem adição de qualquer outro material, aquece e acopla o absorvedor ao tubo de cobre. Como as temperaturas atingidas neste processo não são elevadas, são mantidas as propriedades do absorvedor, evitando o risco de formação de zonas propícias à corrosão e acumulação de detritos prejudiciais - Figura A2.1.



Figura A2.1 - Processo de soldadura do absorvedor aos tubos de cobre.

Segue-se a etapa da soldadura da grelha, composta por vários conjuntos de absorvedor-tubo. Esta fase consiste na união de todos os tubos existentes no painel a um único tubo de cobre, que vai fazer com que o fluido de aquecimento seja encaminhado ao depósito e, posteriormente, devolvido ao painel para novo aquecimento - Figura A2.2.



Figura A2.2 - Processo de soldadura da grelha.

A terceira etapa do processo é o teste de pressão efectuado à grelha para verificar a existência de eventuais fugas. Embora a pressão de funcionamento seja cerca de 3 bar, as unidades são testadas a 6 bar.

A etapa final é o isolamento da grelha na caixa do colector. Toda a caixa é isolada termicamente com lã de rocha e folha de alumínio - Figura A2.3.



Figura A2.3 - Processo de isolamento da caixa do colector.

Depois de forrada a caixa, é feito um revestimento escuro com o objectivo de evitar perdas por radiação. A grelha é então colocada na caixa isolada e coberta com o vidro temperado - Figura A2.4. A fixação e isolamento do vidro na caixa de inox são feitos com silicone. Finalmente é colocado o casquilho lateral que, para além de uma função estética tem também uma função de fixação.

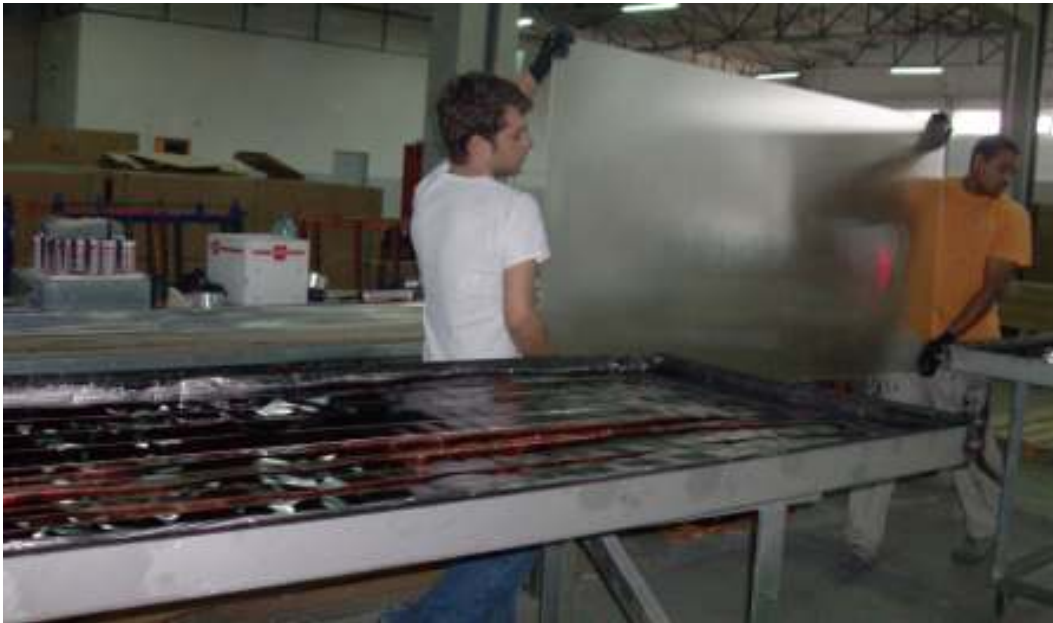


Figura A2.4 - Caixa do colector isolada e com a grelha e cobertura de vidro.

Anexo 3

Folha de especificações de um painel fotovoltaico *KC85GX-2P* da *Kyocera*®

KC85GX-2P

High efficiency multicrystal photovoltaic module



CUTTING-EDGE TECHNOLOGY

Exhaustive research work, continuous further development of production processes and highly automated production enable polycrystalline Kyocera solar modules to attain an exceptional standard of quality and markedly high levels of efficiency.

The integrated Kyocera high-performance solar cells with a standard size of 15 cm x 15.5 cm achieve over 16 % efficiency, guaranteeing an extremely high annual yield of energy from the photovoltaic system.

To protect against the harshest weather conditions, the cells are embedded between a reinforced glass covering (hailstorm resistance complying with IEC 61215 ed. 2, tested by TÜV) and EVA foil, and are sealed with a PET foil backing. The laminate is set in a sturdy aluminum frame which is easy to assemble.

The junction box on the module backside is equipped with bypass diodes that eliminate the risk of the individual solar cells overheating (hot spot effect). Photovoltaic modules can be easily wired using pre-assembled solar cables and multi-contact plugs.

Kyocera manufactures all the components at its own production sites – without buying in semi-finished products – to ensure consistently high product quality.

EXAMPLES OF APPLICATION

- Small grid-connected systems
- Stand-alone systems (electrifying remote houses, holiday homes and allotment systems, etc.)
- Supplying electricity to outlying villages and medical institutions in rural areas and development zones
- Emergency power supply, protection against catastrophes
- Pumping systems (drinking water supply and irrigation)
- Telecommunications (mobile phone networks, booster stations, etc.)
- Oil & gas (corrosion proofing, control, monitoring, etc.)



TUVdotCOM Service: Internet platform for tested quality and service
 TUVdotCom-ID: 0000022553
 IEC 61215 ed. 2, IEC 61730 and Safety Class II
 Kyocera is ISO 9001 and ISO 14001 certified and registered.



**KYOCERA
 SOLAR**

We care!

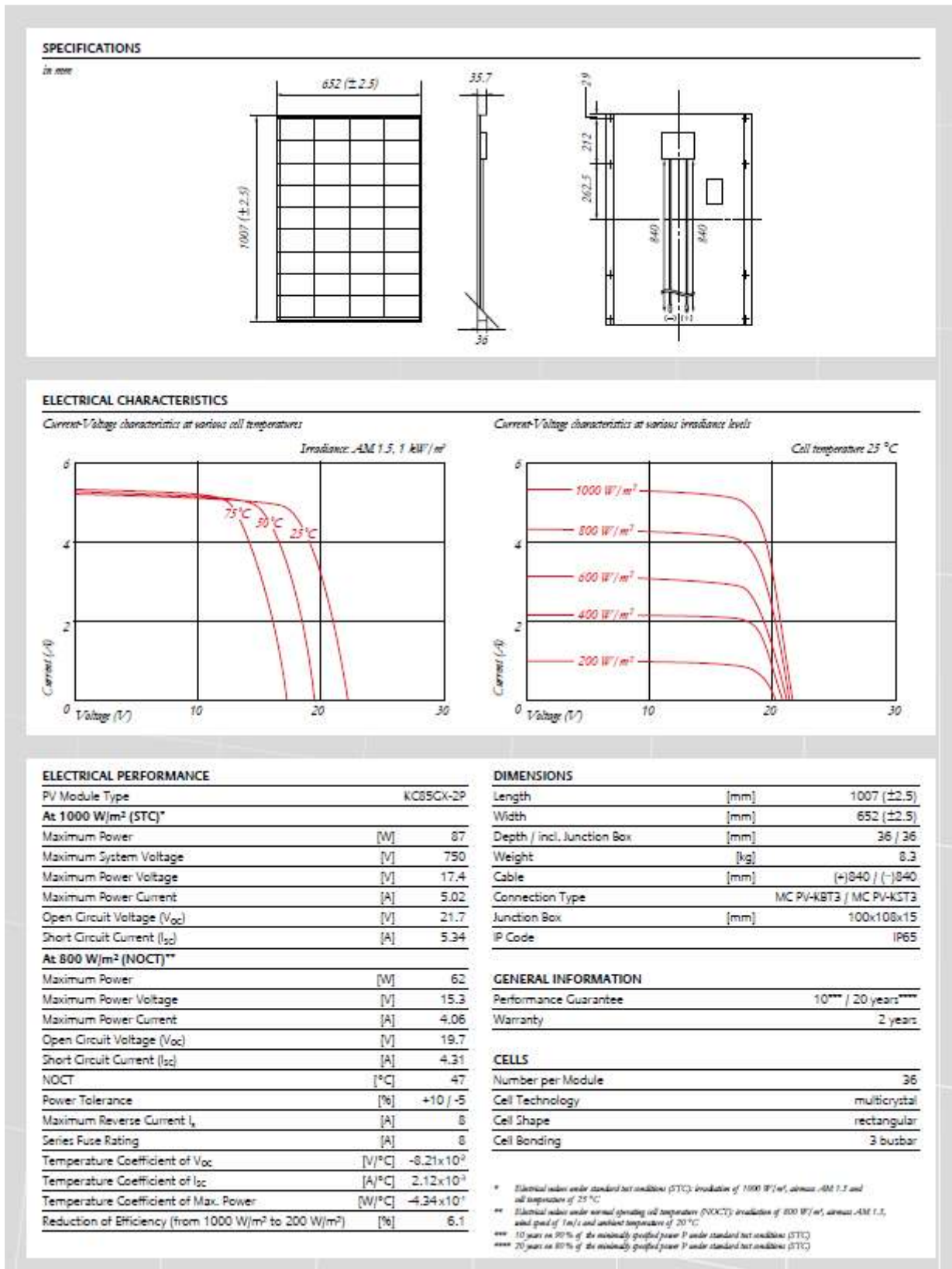


Figura A3.1 - Folha de especificações do painel fotovoltaico.

Anexo 4

Curvas I-V para a variação do azimute do painel, no dia 17 de Junho de 2010

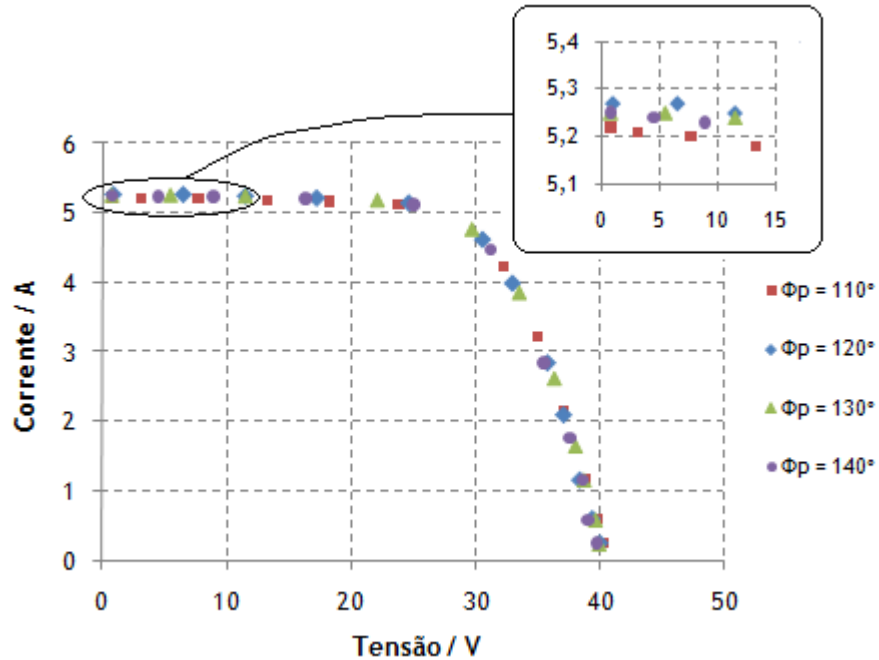


Figura A4.1 - Curvas I-V para variação do azimute do painel, no dia 17 de Junho, por volta das 11h30.

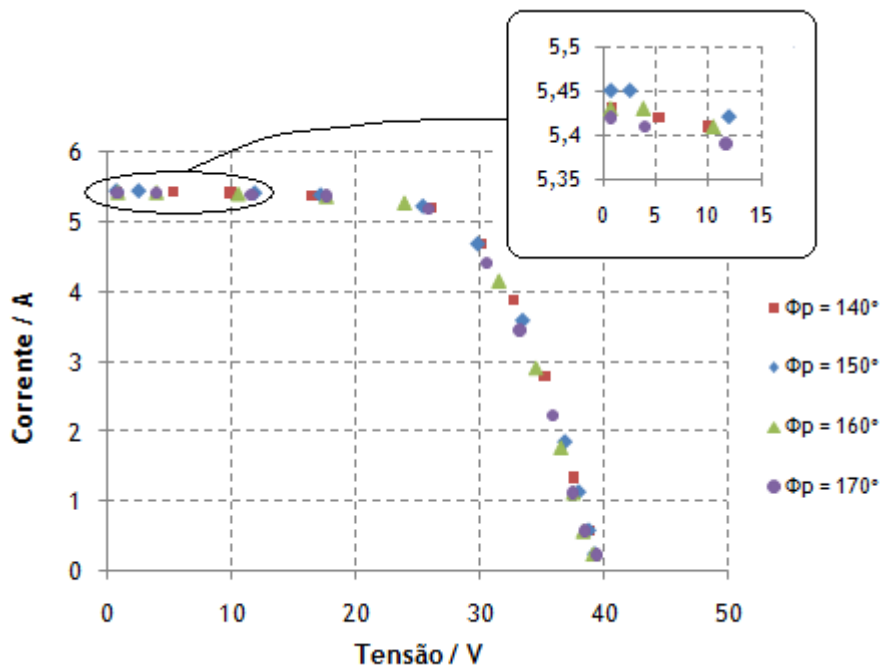


Figura A4.2 - Curvas I-V para variação do azimute do painel, no dia 17 de Junho, por volta das 12h30.

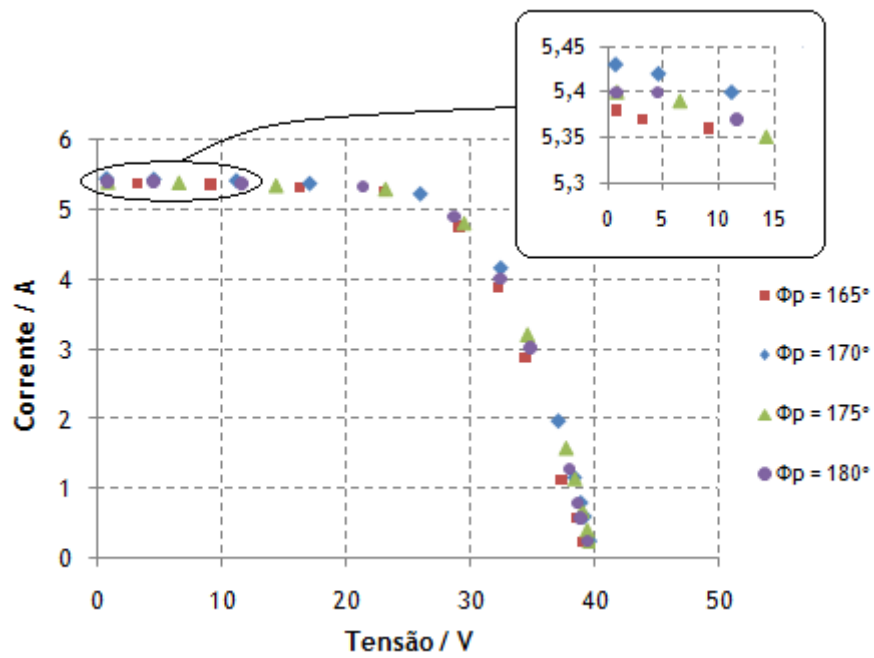


Figura A4.3 - Curvas I-V para variação do azimute do painel, no dia 17 de Junho, por volta das 13h30.

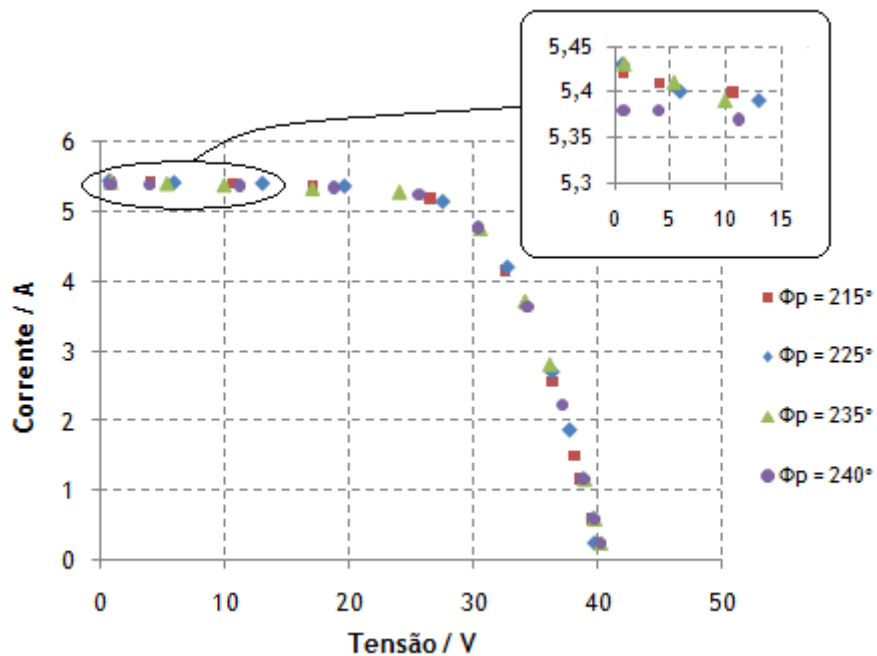


Figura A4.4 - Curvas I-V para variação do azimute do painel, no dia 17 de Junho, por volta das 14h30.

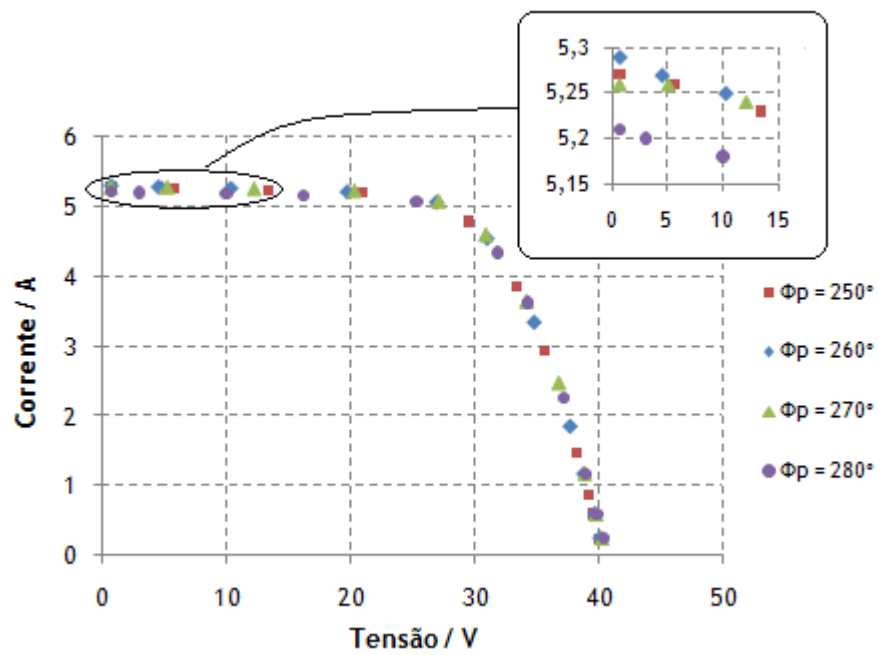


Figura A4.5 - Curvas I-V para variação do azimute do painel, no dia 17 de Junho, por volta das 15h30.

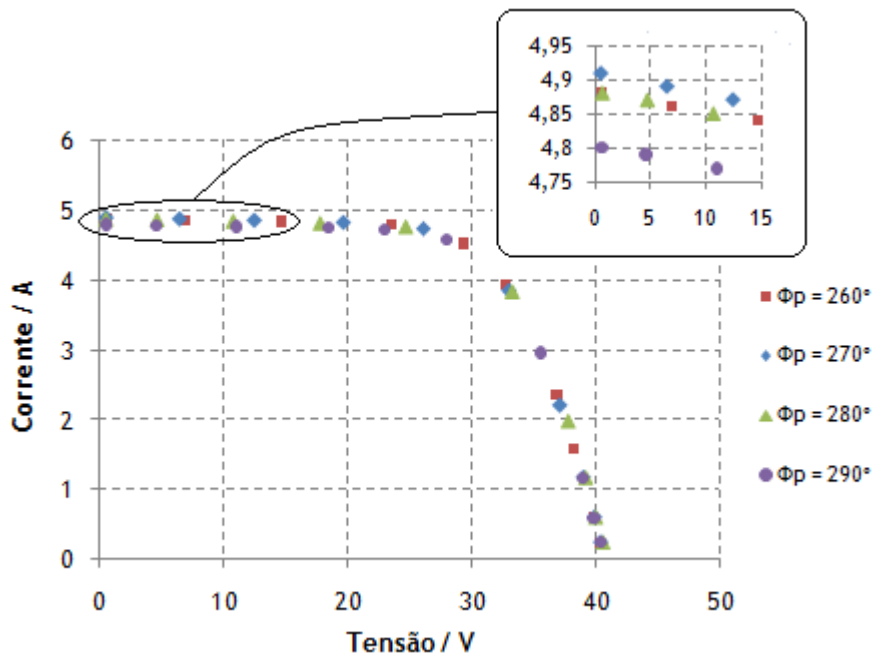


Figura A4.6 - Curvas I-V para variação do azimute do painel, no dia 17 de Junho, por volta das 16h30.

Anexo 5

Manual de Experiências

Experiência 1 - Determinação da eficiência de um colector solar térmico plano do tipo de termossifão

1.1 Objectivo

O objectivo específico deste trabalho prático é a determinação da eficiência do painel de um colector solar térmico plano, tendo em conta perdas por convecção e emissão.

1.2 Teoria

Os colectores solares térmicos podem ser de dois tipos, consoante o modo de circulação do fluido de transporte: circulação natural (sistema de termossifão) e circulação forçada. O sistema de termossifão baseia-se na circulação natural do fluido térmico devido à mudança da sua densidade, consoante a temperatura. Neste sistema, o depósito da água está, normalmente, colocado acima do colector e à medida que a temperatura aumenta no absorvedor, o fluido térmico torna-se menos denso, movendo-se para a parte superior do colector, ou seja, para o depósito, transferindo calor para a água nele contida. O sistema de circulação forçada é usado quando a colocação do depósito acima do colector não é viável. Neste caso, é necessária a instalação de uma bomba para fazer circular o fluido térmico.

O funcionamento do colector solar térmico é baseado em fenómenos de transferência de calor, desde a radiação solar até ao aquecimento da água. Quando a radiação solar incide na superfície do painel, parte é absorvida, outra reflectida e a restante transmitida - Figura 1.1.

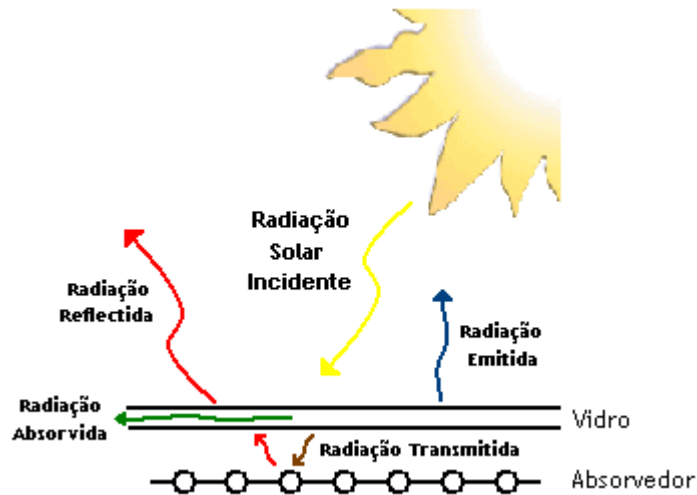


Figura 1.1 - Radiação solar absorvida, reflectida, transmitida e emitida.

Em estado estacionário, a radiação absorvida pelo vidro é desprezável face à radiação que é transmitida, no entanto, como em todo o corpo que aquece, há perdas de potência por emissão de radiação, Q_e . Além destas, ocorrem também perdas de potência por convecção no ar, por influência do vento e da humidade, Q_c . Quando a radiação que atravessa o vidro incide no absorvedor de cobre, a maior parte é absorvida devido ao seu revestimento selectivo escuro. No entanto, há uma pequena parte que é reflectida e transmitida pelo vidro para o exterior, Q_t . Assim, o total de perdas fica:

$$Q_p = Q_c + Q_e + Q_t \quad (1.1)$$

As perdas por convecção traduzem-se matematicamente pela Equação (1.2):

$$Q_c = \frac{k_h}{x_f} A (T_s - T_{amb}) \quad (1.2)$$

em que:

- k_h é o coeficiente de condução de calor no ar húmido;
- x_f é a espessura da camada limite;
- A é a área de transferência de calor;
- T_s é a temperatura da superfície do painel;
- T_{amb} é a temperatura ambiente.

O coeficiente de condução de calor no ar húmido relaciona-se com o coeficiente de condução de calor do ar seco, k_0 , e com a fracção de vapor de água no ar, φ , da seguinte forma [1]:

$$k_h = k_0 + 0,0041 \varphi \quad (1.3)$$

sendo que o coeficiente de condução de calor do ar seco depende da temperatura ambiente, podendo-se considerar a seguinte relação, para um intervalo de temperaturas entre -40 °C e 120 °C [2]:

$$k_0 = 2,397 \times 10^{-2} + 7,59 \times 10^{-5} T_{amb} \quad \text{em } \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1} \quad (1.4)$$

A espessura da camada limite é determinada usando a correlação de Nusselt-Reynolds-Prandtl para transferência de calor por convecção forçada em superfícies planas [3]:

$$Nu = 0,332 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad (1.5)$$

Substituindo os números de Nusselt, Reynolds e Prandtl, vem:

$$\frac{h_v x_f}{k_h} = 0,332 \left(\frac{u_{vento} x_f \rho_{ar}}{\mu_{ar}} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_{ar}}{\mu_{ar} \alpha_{ar}} \right)^{1/3} \quad (1.6)$$

O coeficiente de transferência de calor por convecção no ar, h_v , em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$, depende da velocidade do vento, u_{vento} , de acordo com a seguinte expressão [4]:

$$h_v = 5,7 + 3,8 u_{vento} \quad \text{para } 0 \leq u_{vento} < 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (1.7)$$

Além das perdas de calor por convecção, há perdas por emissão de radiação que são traduzidas pela lei de Stefan-Boltzmann [5]:

$$Q_e = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (1.8)$$

onde ε é a emissividade do vidro e σ é a constante de Boltzmann.

Quando a radiação que atravessa o vidro incide no absorvedor de cobre, maior parte é absorvida devido ao seu revestimento selectivo escuro. No entanto, há uma pequena parte que é reflectida e pode ser quantificada através da TSR - *Total Solar Reflectance*, que para o absorvedor em causa é de 1,4 %. Admitindo então que toda a radiação que é reflectida pelo absorvedor será transmitida pelo vidro para o exterior, o cálculo desta perda é feito da seguinte forma:

$$Q_t = (Q_s - Q_c - Q_e) \cdot \frac{TSR(\%)}{100} \quad (1.9)$$

em que Q_s é a potência da radiação solar incidente no painel em W.

É possível então calcular a potência efectiva, subtraindo o total de perdas, Q_p , à potência da radiação solar que incide no painel em determinado instante:

$$Q_{ef} = Q_s - Q_p = G A - Q_p \quad (1.10)$$

onde G é a potência da radiação solar por unidade de área e A a área efectiva do painel.

Fazendo o balanço energético ao fluido térmico que passa pelos tubos do colector, pode ser calculada a potência útil, ou seja, a potência transferida para o fluido, $Q_{u,f}$, para uma determinada potência de radiação incidente, através da Equação (1.11).

$$Q_{u,f} = \dot{m}_f C_{p,f} (T_{q,f} - T_{f,f}) \quad (1.11)$$

em que \dot{m}_f é o caudal mássico do fluido que circula dentro dos tubos, $C_{p,f}$ a sua capacidade calorífica e $T_{f,f}$ e $T_{q,f}$ as temperaturas do fluido à entrada do painel/saída do depósito e à saída do painel/entrada do depósito, respectivamente. O caudal mássico do fluido térmico pode ser calculado a partir da seguinte expressão para escoamento interno em tubos:

$$\ln \left(\frac{T_{s,t} - T_{q,f}}{T_{s,t} - T_{f,f}} \right) = \frac{h_f A}{\dot{m}_f C_{p,f}} \quad (1.12)$$

em que $T_{s,t}$ é a temperatura da superfície dos tubos de cobre, h_f é o coeficiente de transferência de calor por convecção do fluido e A a área de transferência de calor. Considerando que o escoamento no interior dos tubos é laminar, o coeficiente convectivo pode ser calculado da seguinte forma [3]:

$$h_f = \frac{Nu k_f}{d_i} \quad (1.13)$$

em que k_f é a condutividade térmica do fluido e d_i é o diâmetro interno dos tubos.

A eficiência global do colector solar, η_{global} , compreende duas eficiências intermédias: a eficiência da caixa isoladora e a eficiência do absorvedor. A seguinte expressão mostra a relação entre elas:

$$\eta_{global} = \frac{Q_{ef}}{Q_s} \times \frac{Q_{u,f}}{Q_{ef}} \times 100 \quad (1.14)$$

1.3 Modo de proceder

A instalação experimental que irá usar foi projectada para a realização da seguinte experiência:

- i. determinação da eficiência do colector solar térmico a várias potências de radiação solar e vários caudais de alimentação de água ao depósito.

O colector solar térmico em estudo é constituído por um depósito de água de 200 litros e por dois módulos colectores. Estes, por sua vez, contêm tubos de cobre nos quais circula o fluido térmico (solução de propilenoglicol em água a 12 % v/v). O sistema de absorção de energia radiante é formado por duas alhetas soldadas aos tubos de cobre. Estas alhetas, também de cobre, são revestidas por um óxido metálico com uma elevada absorvância ao espectro solar. A caixa do colector é de inox, com isolamento térmico em lã de rocha e coberta com vidro temperado. Outras características estruturais dadas pelo fornecedor e pela licença de certificação do colector solar são apresentadas na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Características dadas pelo fornecedor de um módulo do colector solar térmico.

Comprimento	2013 mm
Largura	1017 mm
Área total	2 m ²
Massa	53 kg
Pressão de funcionamento	8 bar
Pressão de ensaio	6 bar
Temperatura de estagnação	180 °C
Área do absorvedor	1,72 m ²
Absorção	95 %
Emissão	5 %
Eficiência	73 %

No colector solar térmico estão implementados cinco sensores de temperatura para leitura das temperaturas da água fria e quente, do fluido de transporte à saída e entrada do

colector e da temperatura da superfície do painel. Além dos sensores de temperatura, também estão instalados dois sensores de caudal, que medem o caudal de água à entrada e saída do depósito. Todos os dados são adquiridos no programa “Termossifão” que se encontra no ambiente de trabalho do computador da cabine técnica de controlo.

Para começar as experiências, ligar a válvula de fornecimento de água ao sistema, que se encontra ao lado das ventoinhas de dissipação de ar condicionado. Abrir a válvula on-off do sistema e regular o caudal na válvula de comporta para o caudal desejado. Deixar atingir o estado estacionário e obter as eficiências a diferentes caudais e a diferentes potências de radiação solar.

Os dados meteorológicos podem ser consultados em tempo real no site da estação meteorológica do Laboratório de Física das Construções (<http://experimenta.fe.up.pt/meteorologicalstation/Estacao.htm>).

1.4 Integração de conceitos

Além do estudo da influência que a potência da radiação solar e o caudal de consumo de água tem nas eficiências do colector solar, pode ainda analisar de que forma as perdas por convecção e emissão são significativas.

Referências

- [1] - Irvine, T., Hartnett, J., *Advances in Heat Transfer*, Volume 1, Elsevier, 2006, 135.
- [2] - Becker, B., Misra A., Fricke B., *Bulk Refrigeration of Fruits and Vegetables, Part I: Theoretical Considerations of Heat*, University of Missouri-Kansas City, 1995.
- [3] - Holman, J., *Heat Transfer*, McGraw Hill, 6th edition, 230, 1986.
- [4] - Husseina, H., Mohamada, M., Asfour, A., Transient investigation of a thermosyphon flat-plate solar collector, *Applied Thermal Engineering*, 19, 789-800, 1999.
- [5] - Çengel, Y., *Heat Transfer*, McGraw Hill, 2nd edition, 28, 2003.

Experiência 2 - Determinação das curvas I-V e da eficiência de um sistema de painéis fotovoltaicos

2.1 Objectivo

O objectivo específico deste trabalho prático é a determinação das curvas I-V e da eficiência de um sistema de painéis fotovoltaicos sobre várias condições de operação.

2.2 Teoria

A conversão directa da energia solar em energia eléctrica é feita em módulos fotovoltaicos. Um módulo fotovoltaico consiste no conjunto de várias células fotovoltaicas que são constituídas por um material semiconductor, usualmente o silício. O silício é *dopado* com elementos que vão alterar as suas propriedades eléctricas, formando-se duas camadas na célula: um semiconductor positivo (tipo-p, ou seja, com excesso de cargas positivas) e um semiconductor negativo (tipo-n, isto é, com excesso de cargas negativas). A junção p-n é o local onde ambos os tipos do semiconductor, positivo e negativo, se encontram. No caso da junção p-n em equilíbrio, os electrões fluem naturalmente para a camada tipo-p, deixando lacunas na camada tipo-n. Da mesma maneira, as lacunas difundem-se para a camada tipo-n. Na interface forma-se então uma camada de depleção, onde vai haver um excesso de cargas negativas na camada tipo-p e um excesso de cargas positivas na camada tipo-n. Quando a radiação solar incide nas células fotovoltaicas, os fotões com energia suficiente são absorvidos e excitam os electrões que passam para a banda de condução formando-se então pares electrão-lacuna. Quando estas partículas móveis carregadas atingem a vizinhança da junção p-n, o campo eléctrico dessa região vai enviar os electrões para o terminal negativo e as lacunas para o terminal positivo, gerando corrente eléctrica.

Existem dois modelos a considerar relativamente aos painéis fotovoltaicos. O primeiro é um modelo simples que considera que a queda de tensão do sistema fotovoltaico é ajustada a uma resistência em série. O segundo é um modelo complexo que, para além da resistência em série a representar a queda de tensão no circuito, admite também uma resistência em paralelo que representa as correntes de fuga.

Neste trabalho irá usar-se o modelo simplificado, que pressupõe que o sistema fotovoltaico tem uma fonte de corrente dependente em paralelo com um díodo e considera-se que a resistência associada à queda de tensão é nula - Figura 2.1 [1].

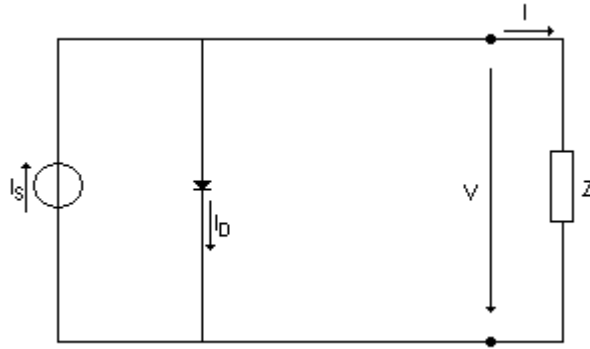


Figura 2.1 - Circuito eléctrico equivalente aos dois módulos fotovoltaicos que alimentam a carga Z .

A fonte de corrente I_S corresponde à corrente eléctrica produzida quando a radiação solar atinge a superfície das células. Essa corrente eléctrica depende da intensidade da radiação incidente. O díodo representa a junção p-n das células fotovoltaicas e é atravessado por uma corrente interna I_D que depende da tensão nos terminais dos painéis, V . Essa corrente interna unidireccional é dada pela seguinte expressão [1]:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

onde I_0 é a corrente inversa máxima de saturação do díodo que depende das características do material e da temperatura; m o factor de idealidade do díodo e V_T o potencial térmico:

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (2.2)$$

em que:

- k é a constante de Boltzmann ($1,3806 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$);
- T é a temperatura absoluta das células, em kelvin;
- q é a carga eléctrica do electrão ($1,6022 \times 10^{-19} \text{ C}$).

Sendo assim, a corrente I que atravessa a carga é:

$$I = I_S - I_D = I_S - I_0 \left(e^{\frac{V}{mV_T}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

Existem dois pontos de operação limite a considerar no painel fotovoltaico: a corrente de curto-circuito e a tensão em circuito aberto. A corrente de curto-circuito, I_{CC} , é o valor máximo da corrente de carga, gerado por efeito fotovoltaico, quando a tensão e a corrente que atravessam o díodo são nulas. Neste caso, a corrente I fica:

$$I = I_S = I_{CC} \quad (2.4)$$

A tensão em circuito aberto, V_{CA} , é o valor de tensão máxima que se obtém nos terminais do painel, que ocorre quando a corrente é nula. Da Equação (2.3) obtém então:

$$V_{CA} = mV_T \ln \left(1 + \frac{I_S}{I_0} \right) \quad (2.5)$$

Estes dois valores limite são característicos do painel e são fornecidos pelo fabricante em condições de operação de referência. Além destes, os valores de potência, tensão de potência e corrente de potência máximos também são dados pelo fornecedor, para as condições de operação de referência.

Aplicando a Equação (2.3) às condições de referência, para os casos de circuito aberto, curto-circuito e potência máxima, respectivamente, obtém-se:

$$0 = I_{S,r} - I_{0,r} \left(e^{\frac{V_{CA,r}}{mV_{T,r}}} - 1 \right) \quad (2.6)$$

$$I_{CC,r} = I_{S,r} \quad (2.7)$$

$$I_{\max,r} = I_{S,r} - I_{0,r} \left(e^{\frac{V_{\max,r}}{mV_{T,r}}} - 1 \right) \quad (2.8)$$

Da Equação (2.8) é possível determinar o factor de idealidade do díodo, da seguinte forma:

$$m = \frac{V_{\max,r} - V_{CA,r}}{V_T \ln \left(1 - \frac{I_{\max,r}}{I_{CC,r}} \right)} \quad (2.9)$$

Calculado o factor de idealidade do díodo, reúnem-se todas as condições para calcular o último parâmetro, a corrente inversa máxima de saturação nas condições de referência, através da seguinte expressão:

$$I_{0,r} = \frac{I_{S,r}}{e^{\frac{mV_{T,r}}{V_{CA,r}}} - 1} \quad (2.10)$$

sendo que $I_{S,r}$ é igual a $I_{CC,r}$, no ponto de curto-circuito, como referido na Equação (2.7).

Este conjunto de expressões permite obter as curvas características I-V. No entanto, o comportamento das curvas I-V varia com a alteração das condições de temperatura das células, T , e da potência da radiação incidente, G . Na Figura 2.2 estão apresentadas as curvas exemplificativas para três temperaturas distintas, 25 °C, 50 °C e 75 °C.

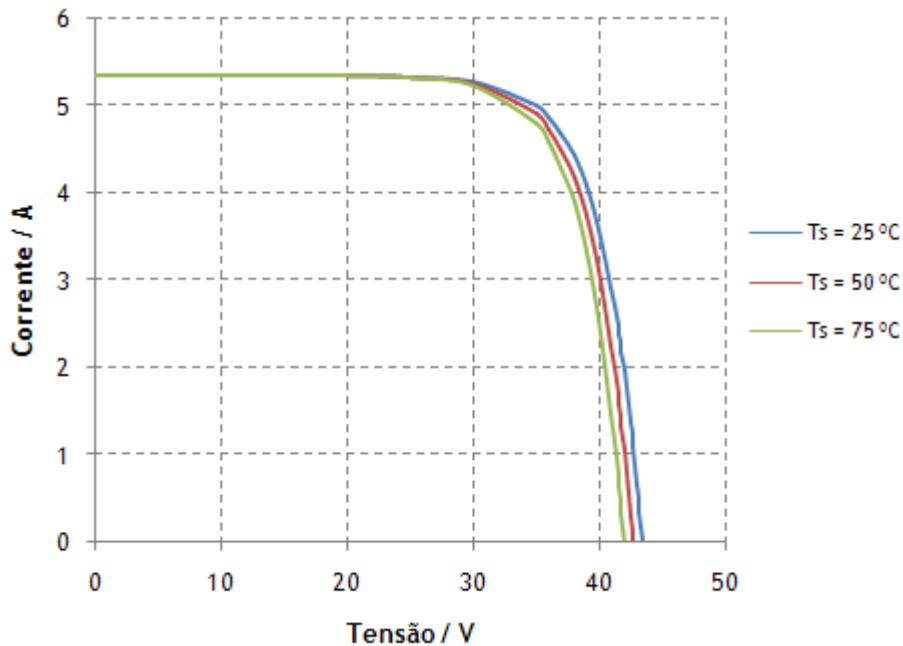


Figura 2.2 - Curvas I-V para variação da temperatura das células.

Verifica-se uma diminuição da tensão em circuito aberto com o aumento da temperatura de funcionamento das células, o que faz com que a potência de saída do painel seja menor. Esta variação deve-se ao facto da corrente inversa de saturação, I_0 , depender das características do material da célula e da sua temperatura. Essa dependência é traduzida matematicamente através da seguinte expressão:

$$I_0 = DT^3 e^{\frac{\varepsilon_s}{m'V_T}} \quad (2.11)$$

em que D é uma constante, ε_s é o hiato do silício (1,12 eV), m' é o factor de idealidade equivalente a uma célula e T a temperatura das células. Assim, o valor de I_0 aumenta com o aumento da temperatura, fazendo com que a tensão em circuito aberto diminua, segundo a

Equação (2.5). A correcção a esse parâmetro é feita através da Equação (2.12) que relaciona I_0 com os valores referência cedidos pelo fabricante.

$$\frac{I_0}{I_{0,r}} = \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \quad (2.12)$$

Quando há variação da potência da radiação solar, as curvas apresentam outro comportamento distinto que pode ser observado na Figura 2.3.

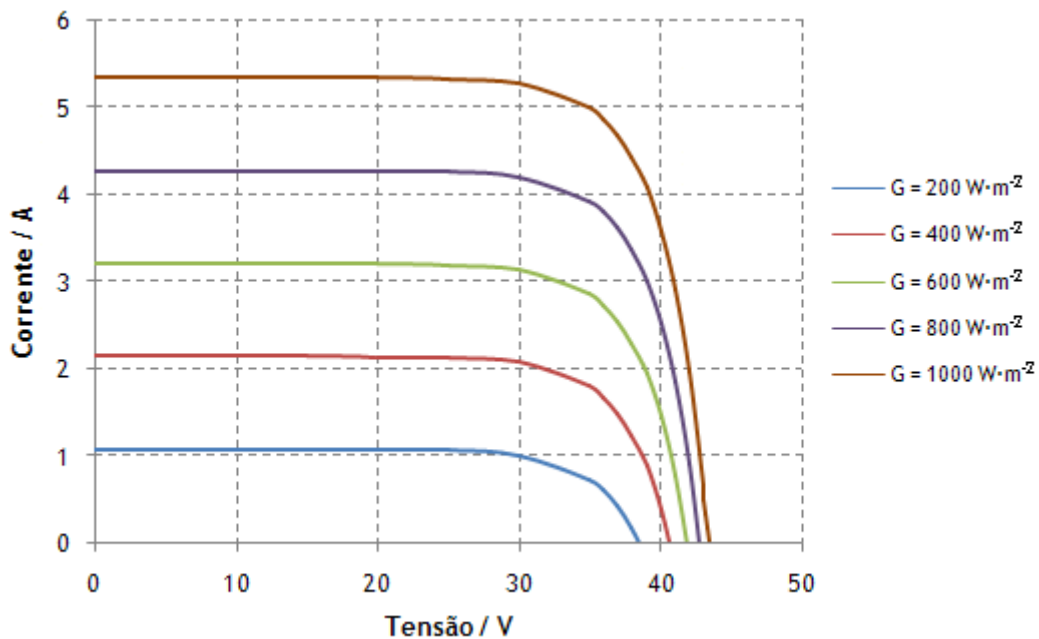


Figura 2.3 - Curvas I-V para variação da potência da radiação solar.

O aumento da potência da radiação provoca um aumento significativo na corrente de curto-circuito e um pequeno aumento na tensão em circuito aberto, fazendo com que a potência de saída também aumente. A variação da potência da radiação solar influencia directamente a corrente eléctrica produzida por radiação solar, I_S , e a sua correcção é feita de acordo com a seguinte

$$\frac{I_S}{I_{S,r}} = \frac{G}{G_r} \quad (2.13)$$

A potência eléctrica do sistema pode ser calculada da seguinte forma:

$$P=VI=V\left(I_{CC}-I_0\left(e^{\frac{V}{mV_T}}-1\right)\right) \quad (2.14)$$

O valor de potência máxima obtém-se quando $\frac{dP}{dV}=0$, ou seja, quando:

$$\frac{dP}{dV}=I_{CC}+I_0\left(1-e^{\frac{V}{mV_T}}-\frac{V}{mV_T}e^{\frac{V}{mV_T}}\right)=0 \quad (2.15)$$

em que V corresponde ao $V_{m\acute{a}x}$. Como se trata de uma equação não-linear, terá de ser resolvido por um método iterativo, como o método de Newton, cuja expressão é a seguinte:

$$V_{m\acute{a}x}^{(i+1)}=V_{m\acute{a}x}^{(i)}-\frac{I_{CC}+I_0\left(1-e^{\frac{V_{m\acute{a}x}^{(i)}}{mV_T}}-\frac{V_{m\acute{a}x}^{(i)}}{mV_T}e^{\frac{V_{m\acute{a}x}^{(i)}}{mV_T}}\right)}{-\frac{I_0}{mV_T}e^{\frac{V_{m\acute{a}x}^{(i)}}{mV_T}}\left(2+\frac{V_{m\acute{a}x}^{(i)}}{mV_T}\right)} \quad (2.16)$$

Partindo de um valor de $V_{m\acute{a}x}^0$ arbitrado, calcula-se $V_{m\acute{a}x}^1$ e substitui-se na Equação (2.15). Este processo é repetido e o método converge quando o valor de $V_{m\acute{a}x}^{(i+1)}$ obtido iguala a Equação (2.15) a zero.

Assim, a corrente máxima fica:

$$I_{m\acute{a}x}=I_{CC}-I_0\left(e^{\frac{V_{m\acute{a}x}}{mV_T}}-1\right) \quad (2.17)$$

A eficiência é então dada pela seguinte expressão:

$$\eta(\%)=\frac{P_{m\acute{a}x}}{GA}\times 100=\frac{I_{m\acute{a}x}V_{m\acute{a}x}}{GA}\times 100 \quad (2.18)$$

Graficamente, através das curvas I-V e P-V, podem ser determinadas a corrente de curto-circuito, tensão em circuito aberto, corrente e tensão máximas. Como mostra a Figura 2.4, a corrente de curto-circuito é o ponto em que a tensão é nula. A tensão em circuito aberto corresponde ao ponto em que a corrente se anula. A corrente e tensão máximas são

determinadas através da na curva I-V, correspondendo ao máximo da curva P-V, que é o ponto de potência máxima.

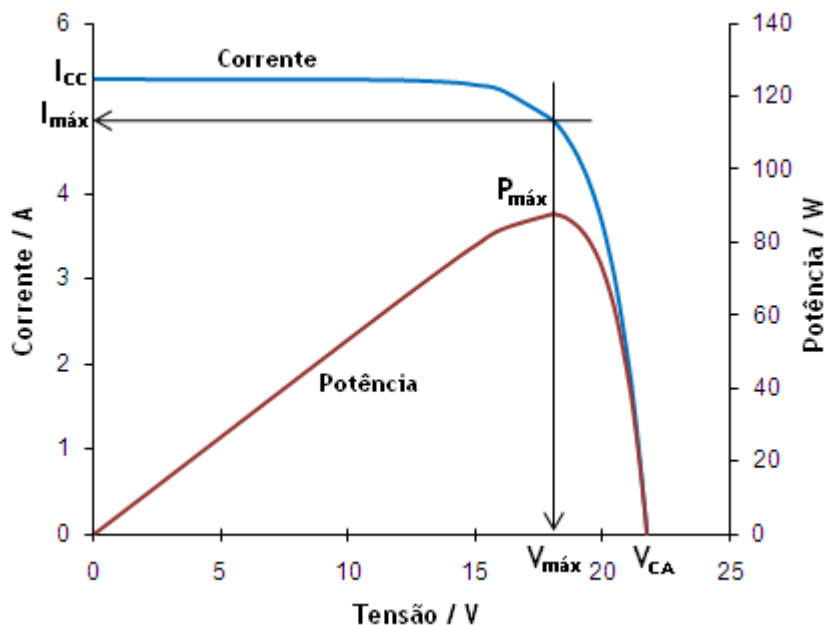


Figura 2.4 - Gráfico exemplificativo para determinação da corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto e corrente e tensão máximas.

2.3 Modo de proceder

A instalação experimental que irá usar foi projectada para a realização de várias experiências:

- i. determinação das curvas I-V variando o ângulo de inclinação e azimute dos painéis;
- ii. determinação das curvas I-V para diferentes potências de radiação solar e diferentes temperaturas de funcionamento das células;
- iii. determinação da eficiência do sistema de painéis fotovoltaicos para cada caso;
- iv. comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os resultados obtidos pelo modelo matemático.

O sistema de painéis fotovoltaicos em estudo é constituído por dois módulos ligados em série. A medição da tensão e intensidade da corrente foram efectuadas em paralelo e em série, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 2.5.

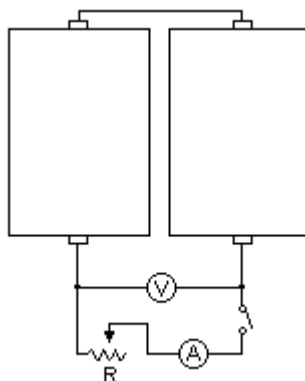


Figura 2.5 - Esquema das ligações efectuadas.

A corrente, A , e a tensão, V , são medidas em dois multímetros distintos. A corrente é lida através de um multímetro com ligação RS-232 ao computador de aquisição. A tensão é lida usando outro multímetro sem esse tipo de ligação, sendo que os valores de tensão terão de ser anotados pelo operador. Para simular a carga no sistema, que vai permitir obter os dados para as curvas características I-V, usou-se uma resistência variável (reóstato), R . O interruptor representado no esquema é usado apenas para segurança, aquando da manipulação do reóstato.

Além disto, encontram-se instalados dois sensores de temperatura para leitura da temperatura ambiente e da superfície. Todos os dados são adquiridos no programa “Painéis fotovoltaicos” que se encontra no ambiente de trabalho do computador da cabine técnica de controlo.

Na Tabela 2.1 estão apresentadas as características eléctricas, área e eficiência para um módulo fotovoltaico, dados fornecidos pelo fabricante.

Tabela 2.1 - Características eléctricas nas condições STC^2 , para um módulo fotovoltaico.

Potência máxima - $P_{máx}$ (W)	87
Tensão de potência máxima - $V_{máx}$ (V)	17,4
Corrente de potência máxima - $I_{máx}$ (A)	5,02
Tensão em circuito aberto - V_{CA} (V)	21,7
Corrente de curto-circuito - I_{CC} (A)	5,34
Área - A (m^2)	0,58
Eficiência - η (%)	15

Para estudar a influência dos ângulos de inclinação e azimute do painel, faça variar o seu valor, com a ajuda de um inclinómetro e de uma bússola digital, respectivamente. Obtenha os dados de corrente e tensão para diferentes horas e compare com os valores teóricos para o dia e hora em questão.

A análise da influência da potência da radiação solar e da temperatura de funcionamento das células também é feita obtendo dados da corrente e tensão em diferentes horas do dia ou diferentes dias, cujas condições variam.

2.4 Integração de conceitos

Pode ainda estudar a influência de sujidade superficial, colocando pó de talco sobre a superfície dos painéis a simular pó, e do arrefecimento brusco das células pela queda de chuva, simulado com água sobre a superfície dos painéis.

Referências

[1] - Castro, R., *Introdução à Energia Fotovoltaica*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2009.

² *Standard Test Conditions* - Valores nas condições de teste referência: potência de radiação de $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, AM 1,5 e temperatura das células de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.