



Análise da Eficiência Energética de uma Unidade de Ventilação com Recuperação de Calor Alimentada a Energia Solar

LUCAS AVOSANI

Outubro de 2017

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA UNIDADE DE VENTILAÇÃO COM RECUPERAÇÃO DE CALOR ALIMENTADA A ENERGIA SOLAR

Lucas Avosani

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA UNIDADE DE VENTILAÇÃO COM RECUPERAÇÃO DE CALOR ALIMENTADA A ENERGIA SOLAR

Lucas Avosani

1160158

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação de Isabel Maria Garcia Sarmento Pereira

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

JÚRI

Presidente

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Isabel Maria Garcia Sarmiento Pereira

Professora Adjunta, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Co-orientador

Pedro Silva

Administrador e Diretor técnico, ARFIT

Co-orientador

Doutor Thiago Antonini Alves

Professor Adjunto, Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Arguente

A definir

AGRADECIMENTOS

A minha família, em especial meus pais, minha irmã e minhas avós, pelo apoio incondicional, pelos incentivos e toda ajuda na superação dos obstáculos ao longo de toda minha vida acadêmica.

A minha orientadora, professora Isabel Maria Garcia Sarmento Pereira, por ter-me aceito como mestrando. Pela sua orientação, total apoio, disponibilidade e colaboração ao longo da realização deste trabalho.

A empresa ARFIT, em especial aos engenheiros Pedro Silva e Paulo Foyo, por terem dado a oportunidade e o desafio de realizar o estudo junto à empresa.

Ao co-orientador e supervisor na empresa, engenheiro Pedro Silva, pela confiança, por todo conhecimento transmitido e pela disponibilidade e total apoio durante a realização deste trabalho.

Ao co-orientador, professor Thiago Antonini, pela disponibilidade e por toda ajuda oferecida.

As instituições UTFPR e ISEP e seus docentes, pela contribuição na construção do conhecimento adquirido ao longo da graduação.

Aos coordenadores do curso de engenharia mecânica, professor Laercio Javarez Junior e professor Marcelo Vasconcelos de Carvalho e aos demais envolvidos, pelo trabalho e dedicação em proporcionar aos alunos a oportunidade de realizar a Dupla-Diplomação em uma instituição de ensino fora do Brasil.

Aos meus amigos, os quais tive o enorme prazer de conhecer no Porto, que foram minha família em Portugal e que me proporcionaram momentos únicos e incríveis. Aos meus amigos que ficaram no Brasil, mas que sempre estiveram presentes me apoiando.

PALAVRAS CHAVE

Unidade de ventilação, recuperação de calor, energia solar fotovoltaica, dimensionamento de sistema fotovoltaico, painel solar fotovoltaico, eficiência energética.

RESUMO

A busca pela eficiência energética nos edifícios tem levado as empresas, em particular as do setor de climatização, a desenvolver equipamentos cada vez mais eficientes e sustentáveis. Sendo as práticas de Ecodesign e a utilização de energia de fontes renováveis grandes aliadas nesse processo.

As unidades de ventilação com recuperação de calor, se adequadamente dimensionadas tendo em conta os requisitos dos espaços a que serão afetas, são equipamentos fundamentais à garantia da qualidade do ar interior em edifícios com um reduzido consumo energético. O permutador de calor presente nessas unidades permite reduzir as necessidades de calor em ventilação diminuindo, assim, a energia consumida pelo equipamento.

No estudo, é apresentada a análise e o dimensionamento de um sistema de produção de energia solar fotovoltaica para fornecer energia a uma gama de unidades de ventilação de duplo fluxo (insuflação/extração) com recuperador de energia.

O estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade económica de implementação do sistema em Portugal. Além de tornar a unidade de ventilação com recuperação de energia, através da utilização de energia de fonte renovável, um produto de alta eficiência energética e com ótima relação custo-benefício.

KEYWORDS

Ventilation unit, heat recovery, photovoltaic solar energy, photovoltaic system design, photovoltaic solar panel, energy efficiency

ABSTRACT

The search of energy efficient solutions for buildings has led companies, in particular those in the air conditioning sector, to develop increasingly efficient and sustainable equipment. The Ecodesign practices and the use of renewable energy sources are large allied to this process.

Ventilation units with heat recovery, if properly sized taking into account the requirements of the spaces to which they will be affected, are essential to guarantee indoor air quality in buildings with a low energy consumption. The heat exchanger in those units reduces the need for heating in ventilation, therefore reducing the equipment energy consumption.

In the study, the analysis and design of a photovoltaic solar energy production system is presented to provide power to a range of double flow ventilation units (insufflation / extraction) with energy recovery system.

The study aims to evaluate the economic viability of implementing the system in Portugal. In addition to making the ventilation unit with energy recovery system, through the use of renewable energy source, a high energy-efficient and cost-effective product.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

Termo	Designação
AVAC	Aquecimento, ventilação e ar condicionado
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
FV	Fotovoltaico
QAI	Qualidade do ar interior
RESP	Rede elétrica de serviço público
STC	Standard Test Conditions
UPAC	Unidade de produção para autoconsumo
UTA	Unidade de tratamento de ar
VRC	Ventilador de recuperação de calor
VRE	Ventilador de recuperação de energia
WRC	World Radiation Centre

Lista de Unidades

Termo	Designação
A	Ampere
Ah	Ampere-hora
eV	Eletrão-Volt
h	hora
Hz	Hertz
J	Joule
J/m ²	Joule por metro quadrado
K	Kelvin
Kg	Quilograma
Kg/m ³	Quilograma por metro cúbico

Km	Quilômetro
m	Metro
m/s	Metro por segundo
mm	Milímetro
mm ²	Milímetro quadrado
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
m ³ /h	Metro cúbico por hora
m ³ /h	Metro cúbico por hora por pessoa
V	Volt
kVA	Quilovolt-ampere
W	Watt
W/m ²	Watt por metro quadrado
Wh	Watt-hora
Wh/dia	Watt-hora por dia
kWh/ano	Quilowatt-hora por ano
kWh/m ² .mês	Quilowatt-hora por metro quadrado por mês
kWh/m ² .ano	Quilowatt-hora por metro quadrado por ano
Wp	Watt-pico
°C	Graus Celcius
°	Grau
'	Minuto
Ω	Ohm
%/°C	Porcentagem por grau Celcius

Lista de Símbolos

Termo	Designação
A	Área
cos	Cosseno
<i>cosφ</i>	Fator de potência

$C_{Bat} (Ah)$	Capacidade de carga da bateria
e_0	Carga do eletrão
E_{ideal}^{dia}	Energia teoricamente expectável
E_{real}^{dia}	Energia real expectável
D	Radiação difusa
F_c	Perdas devido aos cabos elétricos
F_{conv}	Perdas devido a conversão
FP	Fator de perdas
F_T	Fator de correção da temperatura
G_H	Radiação solar incidente em um plano horizontal na superfície da terra
G_h^{dm}	Energia diária média mensal solar incidente sobre um plano horizontal colocado na superfície da Terra
H_o	Ângulo horário do por do sol
H_o^{min}	Valor mínimo do ângulo horário do por do sol
H_s	Número de horas de sol equivalente
I_{mp}	Corrente de máxima potência
I_{sc}	Corrente de curto circuito
I_{sist}	Corrente consumida diariamente
I_{β}^{dm}	Energia solar diária média mensal incidente sobre um plano inclinado relativamente à horizontal na superfície da Terra
I_{β}^m	Energia solar média mensal incidente sobre um plano inclinado relativamente à horizontal na superfície da Terra
$I_{nFileira}$	Corrente elétrica da fileira
$I_{nFusível}$	Corrente elétrica do fusível
$I_{máx CC}$	Corrente contínua nominal do sistema
J_o	Corrente de saturação reversa do diodo
J_r	Corrente fotogerada
J_j	Corrente da junção pn
K	Constante de Boltzmann

K_T	Índice de claridade
K_T^{dm}	Valor diário médio mensal do índice de claridade
$K_{desc.}$	Descarga máxima da bateria
$K_{bat.}$	Eficiência da bateria
L	Albedo
L_{fi}	Comprimento do cabo elétrico de fileira
L_{CC}	Comprimento do cabo elétrico de corrente contínua
L_{CA}	Comprimento do cabo elétrico de corrente alternada
n	Número de dias
N_{max}	Número máximo de módulos conectados em série
N_{min}	Número mínimo de módulos conectados em série
N_D	Número de dias de autonomia
$N_{Fileira}$	Número máximo de fileiras
η_{inv}	Eficiência do inversor
P_M	Perdas na linha
P_{mp}	Potência máxima
P_{PV}	Potência do sistema fotovoltaico
PR	Índice de desempenho
P_{FV}	Potência nominal do painel fotovoltaico
P_{max}^{INV}	Potência nominal do inversor em CC
Q_{AN}	Caudal de ar novo
Q_{ANf}	Caudal de ar novo corrigido
Q_{REF}	Caudal de ar novo de referência
R^{dm}	Relação do valor diário médio mensal entre a radiação total em um plano inclinado e a do plano de medição
R_s^{dm}	Radiação direta incidente sobre uma superfície pousada na Terra
S	Radiação direta
S_{on}	Valor médio diário da constante solar
S_{oh}	Radiação solar incidente em um plano horizontal fora da atmosfera terrestre

S_{oh}^d	Energia média diária incidente em uma superfície horizontal fora da atmosfera terrestre
S_{oh}^{dm}	Energia diária média mensal que incide em uma superfície horizontal fora da atmosfera terrestre
S_{Fi}	Secção transversal do cabo de fileira
$S_{CA(mono)}$	Secção transversal do cabo CA monofásico
S_{CC}	Secção transversal do cabo CC
sen	Seno
tag	Tangente
T_{mod}	Temperatura do módulo
T_{amb}	Temperatura ambiente
V_{oc}	Corrente de circuito aberto
V_{mp}	Tensão de máxima potência
V_n	Tensão nominal da rede
W_D	Consumo total diário
α	Coeficiente de temperatura em relação a corrente elétrica
β	Coeficiente de temperatura em relação a tensão
β_s	Inclinação do plano em relação a superfície
γ	Coeficiente de temperatura em relação a potência
δ	Declinação do sol
ε_v	Eficácia de ventilação
κ	Condutividade elétrica do material
ρ	Parcela de Albedo
Φ	Latitude do local

GLOSSÁRIO DE TERMOS

Termo	Designação
Convecção	Modo de transferência de energia entre uma superfície sólida e outra líquida ou gasosa, que está em movimento.
Efeito estufa	Fenómeno natural de aquecimento térmico da Terra, essencial para a existência de vida na Terra, mas que, devido a poluição gerada pelo ser humano pode se tornar prejudicial.
Fusão nuclear	União de pequenos núcleos atômicos que formarão um núcleo maior e mais estável.
Radiação	Energia emitida pela matéria sob a forma de ondas eletromagnéticas (ou fótons) como resultado das mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas.
Sustentável	Processo sustentável é aquele que se pode manter no tempo por si só, sem ajuda externa e sem dar origem à escassez dos recursos existentes.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – POTÊNCIA INSTALADA E CRESCIMENTO ANUAL DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS.	38
FIGURA 2 – ESTRUTURA SOLAR.	41
FIGURA 3 – PLANO DA ELÍPTICA.	43
FIGURA 4 – SISTEMA DE COORDENADAS HORIZONTAL.	44
FIGURA 5 – SISTEMA DE COORDENADAS EQUATORIAL.	45
FIGURA 6 – ESPECTRO DE IRRADIAÇÃO SOLAR E COMPRIMENTO DE ONDAS TÍPICOS EM APLICAÇÕES SOLARES.	46
FIGURA 7 – COMPONENTES DA RADIAÇÃO SOLAR.	48
FIGURA 8 – POTÊNCIA FOTOVOLTAICA INSTALADA NO MUNDO.	52
FIGURA 9 – POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA NA EUROPA.	53
FIGURA 10 – POTENCIAL DE PRODUÇÃO FOTOVOLTAICA EM PORTUGAL.	54
FIGURA 11 – JUNÇÃO PN.	55
FIGURA 12 – ESTRUTURA FÍSICA DA CÉLULA FOTOVOLTAICA DOPADA COM FÓSFORO E BORO.	56
FIGURA 13- CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DE UMA CÉLULA SOLAR.	58
FIGURA 14 – CURVA CARACTERÍSTICA DE PERFORMANCE DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA.	59
FIGURA 15 – ASSOCIAÇÃO DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS EM SÉRIE (A) E EM PARALELO (B).	61
FIGURA 16 – INFLUÊNCIA DA IRRADIÂNCIA SOLAR EM UMA CÉLULA DE SILÍCIO CRISTALINO NA TEMPERATURA DE 25°C.	62
FIGURA 17 – INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA CÉLULA SOLAR PARA UM MÓDULO DE SILÍCIO CRISTALINO SOB IRRADIÂNCIA DE 1000 W/M ² .	63
FIGURA 18 – SISTEMA FOTOVOLTAICO NÃO CONECTADO À REDE ELÉTRICA (STAND-ALONE).	68
FIGURA 19 – SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA.	69
FIGURA 20 – MODOS DE UTILIZAÇÃO DOS INVERSORES EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.	71
FIGURA 21 – EXEMPLO DE CURVA DE CARGA.	76
FIGURA 22 – UNIDADE DE TRATAMENTO DE AR.	94
FIGURA 23 – (A) VENTILADOR CENTRÍFUGO COM TRANSMISSÃO POR ACOPLAMENTO DIRETO, (B) VENTILADOR AXIAL.	95
FIGURA 24 – FILTRO TIPO Z-LINE DA TROX TECHNIK.	96
FIGURA 25 – DIREÇÃO DO FLUXO DE AR NO PERMUTADOR DE CALOR.	97
FIGURA 26 – PERMUTADOR DE CALOR DE PLACAS FIXAS E FLUXO CRUZADO.	98
FIGURA 27 – PERMUTADOR DE CALOR DO TIPO RODA GIRATÓRIA.	99
FIGURA 28 – PERMUTADOR DE CALOR DO TIPO TUBOS.	99
FIGURA 29 – VENTILADOR DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA.	101
FIGURA 30 – UNIDADE DE RECUPERAÇÃO DE CALOR ECOEVO HE EC DA EMPRESA ARFIT.	110

FIGURA 31 – CURVA DE CARGA DAS UNIDADES ECOEVO HE EC.	114
FIGURA 32 – CARTA SOLAR – PORTO.	115
FIGURA 33 - CARTA SOLAR – LISBOA.	115
FIGURA 34 – CARTA SOLAR – FARO.	115
FIGURA 35 – PRODUÇÃO DE ENERGIA REAL VERSUS CONSUMO ECOEVO HE EC 10.	125
FIGURA 36 – ENERGIA ANUAL REAL SIMULADA VS. TEÓRICA – ECOEVO HE EC 10.	129
FIGURA 37 – PRODUÇÃO DE ENERGIA COM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DO SISTEMA.	131
FIGURA 38 – PRODUÇÃO DE ENERGIA HORA A HORA NA CIDADE DO PORTO.	132
FIGURA 39 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA SIMPLIFICADA DO SISTEMA SOLAR PARA AUTOCONSUMO DA ECOEVO HE EC 10.	136
FIGURA 40 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA SIMPLIFICADA DO SISTEMA SOLAR STAND-ALONE PARA EEOEVO HE EC 10.	140

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO SOL.	42
TABELA 2 – EXEMPLO DE CÁLCULO DO CONSUMO DIÁRIO E DIÁRIO MÉDIO SEMANAL.	75
TABELA 3 - VALORES DA EFICÁCIA PARA DIFERENTES MÉTODOS DE VENTILAÇÃO.	89
TABELA 4 – CAUDAL DE AR NOVO DETERMINADO EM FUNÇÃO DA TAXA DE METABOLISMO DOS OCUPANTES.	91
TABELA 5 – CAUDAL DE AR NOVO DETERMINADO EM FUNÇÃO DA CARGA POLUENTE DEVIDA AO EDIFÍCIO.	91
TABELA 6 – REQUISITOS MÍNIMOS DE EFICIÊNCIA DAS UNIDADES DE PRODUÇÃO TÉRMICAS.	103
TABELA 7 – REQUISITOS MÍNIMOS DE EFICIÊNCIA DAS UNIDADES DE TRATAMENTO DE AR.	103
TABELA 8 – REQUISITOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE BOMBAS E VENTILADORES.	103
TABELA 9 – REQUISITOS ESPECÍFICOS DE CONCEÇÃO ECOLÓGICA APLICÁVEIS ÀS UVNR PARA A ERP 2016.	104
TABELA 10 - REQUISITOS ESPECÍFICOS DE CONCEÇÃO ECOLÓGICA APLICÁVEIS ÀS UVNR PARA A ERP 2018.	105
TABELA 11 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA ECOEVO HE EC.	111
TABELA 12 – PADRÃO DE REFERÊNCIA DE OCUPAÇÃO EM ESCRITÓRIOS.	111
TABELA 13 – CONSUMO DIÁRIO HORÁRIO E DIÁRIO TOTAL DAS UNIDADES DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA ECOEVO HE EC.	112
TABELA 14 – CONSUMO ELÉTRICO DAS UNIDADES ECOEVO HE EC.	113
TABELA 15 – CAUDAL DE AR NOVO SEGUNDO A PORTARIA N.º. 353-A/2013 DE 4 DE DEZEMBRO.	116
TABELA 16 – EQUIPAMENTOS DO SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO E SEUS CUSTOS.	117
TABELA 17 – LATITUDE, ÂNGULO ÓTIMO E ALBEDO PARA PORTO, LISBOA E FARO.	119
TABELA 18 – ÍNDICES DE CLARIDADE E TEMPERATURA AMBIENTE MÉDIA MENSAL PARA PORTO, LISBOA E FARO.	119
TABELA 19 - <i>Sohm, Ghm, Iβdm</i> E <i>Iβm</i> PARA A CIDADE DO PORTO - PORTUGAL.	120
TABELA 20 - <i>Sohm, Ghm, Iβdm</i> E <i>Iβm</i> PARA A CIDADE DE LISBOA- PORTUGAL.	121
TABELA 21 - <i>Sohm, Ghm, Iβdm</i> E <i>Iβm</i> PARA A CIDADE DE FARO - PORTUGAL.	122
TABELA 22 – QUANTIDADE DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS PARA UNIDADE ECOEVO HE EC 10.	123
TABELA 23 – ENERGIA PRODUZIDA PELOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS PARA ECOEVO HE EC 10.	127
TABELA 24 – PERÍODO DE AMORTIZAÇÃO ECOEVO HE EC 16, 23, 39 E 54.	127
TABELA 25 – AMORTIZAÇÃO PARA OS DIFERENTES SISTEMAS ANALISADOS.	130
TABELA 26 – ECOEVO HE EC 16, 23, 39 E 54 PARA A CIDADE DO PORTO.	133
TABELA 27 – DIMENSIONAMENTO INVERSOR.	134
TABELA 28 – DIMENSIONAMENTO DOS CABOS ELÉTRICOS.	135

TABELA 29 – POTÊNCIA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO NÃO CONECTADO A REDE.	137
TABELA 30 – CAPACIDADE DE CARGA DA BATERIA E CORRENTE MÁXIMA DO CONTROLADOR DE CARGA.	138
TABELA 31 – AMORTIZAÇÃO DO SISTEMA OFF-GRID PARA ECOEVO HE EC 10 NA CIDADE DO PORTO.	139

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	31
1.1	Apresentação da empresa de acolhimento	31
1.2	Enquadramento	32
1.3	Objetivos	32
1.4	Metodologia	33
1.5	Estrutura da dissertação	33
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	37
2.1	Energias de Fontes Renováveis	37
2.1.1	Desenvolvimento Sustentável	38
2.2	Energia Solar	40
2.2.1	O Sol e suas Propriedades	40
2.2.2	Orientação Sol – Terra	42
2.2.3	Radiação Solar	45
2.3	Sistemas Fotovoltaicos	51
2.3.1	Panorama Mundial	52
2.3.2	Efeito Fotovoltaico	54
2.3.3	Célula Fotovoltaica	55
2.3.4	Características elétricas	57
2.3.5	Associação de células e painéis fotovoltaicos	61
2.3.6	Parâmetros que influenciam a eficiência do painel solar	62
2.3.7	Tecnologias e materiais de construção	65
2.3.8	Sistemas fotovoltaicos	67
2.3.9	Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos	74
2.3.10	Manutenção	85
2.3.11	Autoconsumo	85
2.3.12	Amortização de sistemas fotovoltaicos	85
2.4	Aquecimento, ventilação e ar condicionado em edifícios	86

2.4.1	Conceitos fundamentais	87
2.4.2	Qualidade do ar interior e Conforto térmico	88
2.4.3	Sistemas AVAC	92
2.4.4	Eficiência energética para sistemas AVAC em edifícios de comércio e serviços	102
3	DESENVOLVIMENTO	109
3.1	Caracterização do problema	109
3.2	Unidade de ventilação com recuperação de energia	110
3.2.1	Consumo energético	110
3.2.2	Enquadramento regulamentar	116
3.3	Sistema fotovoltaico – levantamento de dados	117
3.4	Energia solar disponível	118
3.5	Dimensionamento teórico do sistema	122
3.5.1	Número de módulos fotovoltaicos	123
3.5.2	Seleção do modelo do painel fotovoltaico	124
3.5.3	Validação dos resultados	128
3.6	Otimização do sistema	129
3.6.1	ECOEVOL HE EC 16, 23 ,39 e 54	132
3.6.2	Dimensionamento do inversor	133
3.6.3	Dimensionamento dos cabos elétricos	134
3.7	Sistema ECOEVOL HE EC 10	136
3.8	Estudo de viabilidade para o sistema stand-alone	137
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	145
4.1	CONCLUSÕES	145
4.2	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	146
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	149
6	ANEXOS	155

6.1 ANEXO A	155
6.2 ANEXO B	159
6.3 ANEXO C	159
6.4 ANEXO D	162
6.5 ANEXO E	163

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA DE ACOLHIMENTO

1.2 ENQUADRAMENTO

1.3 OBJETIVOS

1.4 METODOLOGIA

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

1 INTRODUÇÃO

A presente dissertação apresenta o estudo realizado de análise à eficiência energética e de viabilidade económica à hipótese de implementação de painéis solares fotovoltaicos a uma gama de unidades de ventilação de duplo fluxo (insuflação/extração) com recuperador de calor. O projeto foi desenvolvido em parceria com a empresa do ramo de climatização, ARFIT, em Portugal.

Antes do desenvolvimento do projeto, é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito dos temas abordados que servirá de fundamentação teórica para melhor compreensão de todo o estudo.

1.1 Apresentação da empresa de acolhimento

A ARFIT é uma empresa portuguesa com mais de 60 anos de história e que desde 2008 oferece soluções globais de climatização tanto a nível nacional quanto internacional. Fundada em 1944, como o nome Feio e companhia, inicialmente dedicava-se à venda de artigos para instalações hidráulicas, a partir de 2008, como o nome de ARFIT, passou a dedicar-se à venda e fabrico de equipamentos de climatização. A empresa tem como missão “ser o parceiro de referência no fornecimento de equipamentos e serviços na área da climatização, garantindo a satisfação dos nossos clientes, superando as suas expectativas”. Para isso, aplica as mais exigentes certificações em seus processos e produtos, desde a ISO9001 até a EUROVENT.

A ARFIT possui em seu catálogo de produtos variadas soluções de climatização e ventilação, bem como equipamentos de controlo, humidificação e unidades produtoras.

Seu quadro técnico é composto por 42 funcionários, sendo 14 engenheiros, 17 operadores de linha e produção e 11 atendendo outras funções.

O projeto foi coordenado pelo engenheiro mecânico Pedro Silva, atuando na função de administrador e diretor técnico da empresa, formado pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, trabalhando a nove anos na empresa e a 20 anos no sector de climatização.

1.2 Enquadramento

As unidades de ventilação são fundamentais na busca pela qualidade do ar interior de um edifício e, se necessário, pelo conforto térmico dos seus ocupantes, não só em edifícios de comércio e serviços, mas também em edifícios residenciais. Os recuperadores de calor nas unidades de ventilação possibilitam diminuir as necessidades de calor em ventilação e por consequência permitem a economia de energia e dos custos de exploração associados.

A busca pela eficiência energética, devido à crescente preocupação com o meio ambiente, tem levado cada vez mais as empresas e em particular aquelas que se dedicam à conceção e fabrico de equipamentos destinados à climatização de edifícios numa aposta de desenvolvimento de equipamentos que contribuam para a construção sustentável, incluindo a implementação de práticas de ecodesign, sendo a utilização de energia de fontes renováveis grande aliada nesse processo.

É com essa visão, que a empresa ARFIT pretende implementar painéis solares fotovoltaicos numa gama de unidades de ventilação com recuperação de calor, para proporcionar aos seus clientes um produto de alta eficiência energética e com ótima relação custo-benefício.

1.3 Objetivos

Este trabalho, realizado em conjunto com a empresa ARFIT, tem como objetivo analisar a viabilidade económica da implementação numa gama de unidades de ventilação com recuperação de calor, já disponível no mercado, painéis solares fotovoltaicos a fim de fornecer energia elétrica de fonte renovável necessária ao acionamento dos motores dos respetivos ventiladores.

A análise da viabilidade de implementação dos módulos fotovoltaicos à unidade de recuperação de energia busca proporcionar aos clientes da empresa ARFIT um produto novo no mercado com período de amortização e investimento inicial baixos.

1.4 Metodologia

A partir do objetivo proposto, elaborou-se um plano de trabalho com a finalidade de atender ao pedido da empresa. O plano de trabalho consiste nas seguintes etapas:

1. Aprofundamento dos conhecimentos acerca do funcionamento das unidades de tratamento de ar, em particular, as unidades de ventilação de duplo fluxo com recuperação de calor, e dos painéis fotovoltaicos;
2. Seleção do equipamento sobre o qual se realizará o estudo;
3. Estudo prévio sobre a possibilidade de dimensionar o campo de painéis fotovoltaicos com vista à autossuficiência energética do equipamento;
4. Seleção e dimensionamento do sistema fotovoltaico;
5. Comparação dos dados teóricos e simulados;
6. Obtenção dos resultados.

Cada uma dessas etapas é abordada durante o decorrer desse projeto.

1.5 Estrutura da dissertação

A presente dissertação é estruturada nas seguintes partes: Revisão, Desenvolvimento e Considerações Finais. Na Revisão Bibliográfica são abordados os conceitos necessários sobre a energia fotovoltaica e as unidades de tratamento de ar, que permitiram uma melhor compreensão para o desenvolvimento do projeto. No Desenvolvimento é tratada a parte de maior interesse da dissertação, onde são apresentados os cálculos de dimensionamento e as simulações necessárias para atingir o objetivo do estudo. Nas Considerações Finais são apresentados os resultados de maior relevância para o projeto, bem como, as propostas de trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENERGIAS DE FONTES RENOVÁVEIS

2.2 ENERGIA SOLAR

2.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

2.4 AQUECIMENTO, VENTILAÇÃO E AR CONDICIONADO

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nas seções a seguir, serão apresentados conceitos sobre os temas apresentados abaixo, para esclarecimento e melhor compreensão do presente projeto.

- Energias de Fontes Renováveis
- Energia Solar
- Sistemas Fotovoltaicos
- Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado em edifícios

2.1 Energias de Fontes Renováveis

O crescimento global da economia e da população, a urbanização e a rápida industrialização liderada pelos países em desenvolvimento, segundo IRENA (2017), são fatores responsáveis por aumentar a procura por energia global. Devido ao impacto ambiental, económico e social do uso em demasia e da dependência de combustíveis fósseis, a busca por opções mais sustentáveis para suprir as necessidades energéticas se tornou prioridade nos governos atuais. O rápido desenvolvimento da tecnologia aliado a políticas de suporte tornaram a produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis viável.

Segundo Twidell & Weir (2016), energia renovável é “a energia obtida a partir de fluxos naturais e persistentes de energia que ocorrem no ambiente imediato”, como a energia proveniente do sol, do vento e dos recursos hídricos. Também é conhecida como energia verde ou energia sustentável. Já a energia não renovável é “a energia obtida a partir de armazéns estáticos que permanecem subterrâneos a menos que libertados pela interação humana”, como por exemplo o carvão, o petróleo e os combustíveis nucleares.

Para a grande maioria das tecnologias de produção de energias renováveis, de acordo com IRENA (2017), o crescimento e a capacidade de produção continuam a aumentar e a superar o crescimento das tecnologias convencionais, como consequência, além da redução aos danos ao meio ambiente houve o aumento das vagas de trabalho criadas

para o setor. Em 2015, a contribuição da energia de fontes renováveis foi a maior até então (figura 1), atingindo 9,3% de crescimento em relação ao ano anterior, com destaque para a energia eólica, solar fotovoltaica e hídrica.

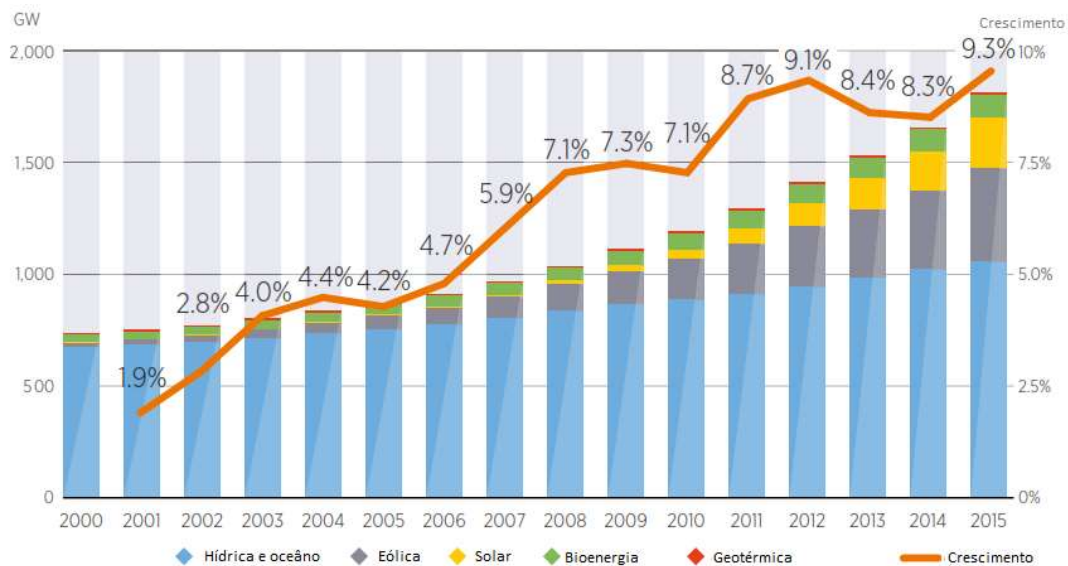


Figura 1 – Potência instalada e crescimento anual das energias renováveis.
Fonte: Adaptado de IRENA (2017)

Ainda segundo IRENA (2017), as fontes de energia renováveis são hoje a primeira escolha para expansão e modernização da infraestrutura da rede elétrica pelo mundo, além de desempenhar um papel fundamental na implementação de acordos internacionais para redução da degradação do meio ambiente. A implementação e a expansão da utilização de energia de fontes renováveis trarão benefícios tanto do ponto de vista económico e social quanto do ambiental.

2.1.1 Desenvolvimento Sustentável

O termo desenvolvimento sustentável passou a ser amplamente aceite em 1987 devido à Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, de acordo com Twidell & Weir (2006), o desenvolvimento sustentável é o ato de viver, produzir e consumir de modo a suprir as necessidades presentes sem comprometer a capacidade das próximas gerações em suprir suas necessidades. Esta prática deve ser aplicada de maneira internacional, nacional e local. A comissão de 87 foi criada pelas Nações

Unidas, com o intuito de encontrar soluções para a pressão colocada sobre os recursos naturais devido ao crescimento populacional e económico dos países.

O aumento da concentração de CO₂ (dióxido de carbono) na atmosfera, proveniente da queima de combustíveis fósseis, demonstra que o uso de tecnologias que recorrem a fontes de energia convencionais não renováveis é insustentável ao longo prazo. O equilíbrio, nas opiniões dos cientistas, mostra que, se não houver mudanças, o efeito de estufa aumentará, provocando mudanças climáticas significativas dentro de um século ou menos, podendo causar um impacto negativo sobre o ser humano (Twidell & Weir, 2006).

A assinatura do Protocolo de Quito, em 11 de dezembro de 1997, marcou o início de uma nova era, onde existe a necessidade e a preocupação em poupar energia e reduzir os danos ao meio ambiente. De acordo com o Protocolo de Quioto, os países participantes se comprometeram a aumentar a eficiência energética em setores relevantes da economia, a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de energia de fontes renováveis, a eliminação gradual dos incentivos para os setores emissores de gases do efeito estufa e a limitar e/ou reduzir as emissões dos gases do efeito estufa em 5% do valor registrado em 1990.

Sendo a preservação do ambiente, hoje em dia, uma variável imprescindível no desenvolvimento económico e na estratégia empresarial segundo a Vieira et al. (2013) as empresas que não procuram se adequar ao conceito de desenvolvimento sustentável perderão competitividade a curto e médio prazo. Desse modo, surge o conceito de ecodesign, uma nova abordagem ao processo de criação e fabrico de um produto levando em conta as preocupações ambientais. Segundo Antunes (2004) apud. Vieira et al. (2013), o ecodesign é o desenvolvimento do produto considerando os critérios ambientais e minimizando os impactos diretos e indiretos em todas as fases do ciclo de vida.

Todos os produtos ao longo do ciclo de vida causam impactos ambientais, segundo Rocha (2011), estima-se que 80% dos impactos estão relacionados a fase de desenvolvimento, tornando assim a abordagem do ecodesign muito promissora para a produção sustentável. De acordo com a Vieira et al. (2013), além dos benefícios ambientais, a aplicação do ecodesign gera benefícios de grande interesse para as

empresas, tais como: redução de custos, inovação, aumento na qualidade do produto e melhoria da imagem do produto e da empresa.

A Directiva 2005/32/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 6 de julho de 2005 define os requisitos de concepção ecológica dos produtos que consomem energia. A Directiva 2005/32/CE visa contribuir para o desenvolvimento sustentável, na medida em que aumenta a eficiência energética e o nível de proteção do meio ambiente e se aplica a todos produtos que, uma vez colocados no mercado, dependem de uma fonte de energia para funcionar, seja ela renovável ou não.

Como a Directiva 2005/32/CE se preocupava apenas com os produtos consumidores de energia, em 2009 houve a emissão da Directiva 2009/125/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 21 de outubro de 2009 que altera a directiva anterior, de modo a estender os requisitos a todos os produtos relacionados com a utilização de energia. De acordo com a Directiva 2009/125/CE, um produto relacionado com energia é qualquer bem que tenha impacto sobre o consumo de energia durante a sua utilização, incluindo peças a incorporar em produtos relacionados ao consumo de energia.

2.2 Energia Solar

A energia solar é maior fonte de energia permanente na Terra. Responsável pela manutenção da vida no planeta, é uma fonte inesgotável de energia, possuindo assim um enorme potencial de utilização em sistemas de conversão de energia solar. (Pinho & Galdino , 2014).

2.2.1 O Sol e suas Propriedades

O sol é uma estrela pseudoesférica de diâmetro de 1.391.000 km composta de matéria gasosa, principalmente por hidrogénio e hélio, que permanecem em constante fusão nuclear chegando a temperaturas de aproximadamente 10^7 K (Labouret & Viloz, 2010).

A energia produzida no núcleo do sol é transmitida para a superfície solar e depois para o espaço através de processos convectivos e radiativos (Duffie & Beckman, 2013). A figura 2 ilustra a estrutura solar. Estima-se que 90% da energia é gerada na região compreendida entre 0 a 23% do raio do sol, onde está contida 40% da massa solar. Do centro à distância de 70% do raio, existe intensa troca de calor por radiação, há ainda a diminuição da temperatura e da densidade e os processos de convecção começam a se tornar importantes. A zona contida entre 70 e 100% do raio é chamada de zona convectiva, é nela onde ocorrem as principais trocas de calor por convecção entre o interior e a superfície do sol.

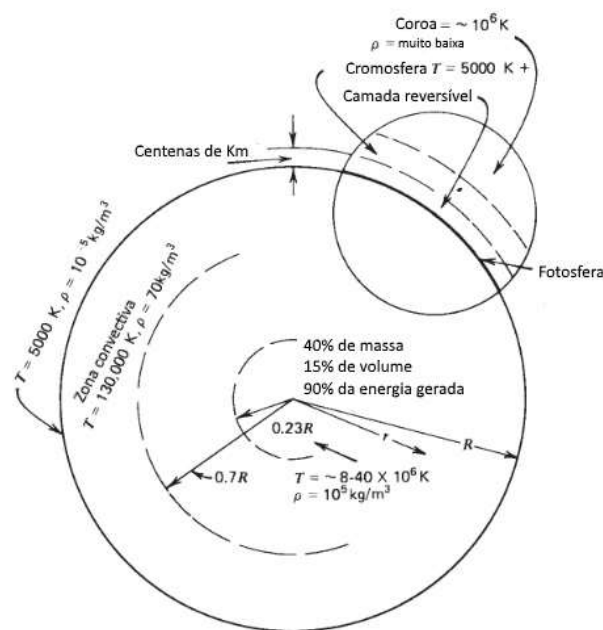


Figura 2 – Estrutura Solar.
Fonte: Adaptado de Duffie & Beckman (2013)

Ainda segundo Duffie & Beckman (2013), a superfície do sol é composta pelos grânulos fotosféricos ou células de convecção irregular, pelos poros e pelas manchas solares. São nessas zonas que ocorrem as trocas de calor entre a camada convectiva e a superfície, a essa camada dá-se o nome de fotosfera, fonte da maior parte da radiação solar. A atmosfera solar é composta por três camadas: a camada reversível, composta por gases com temperaturas parecidas com a da fotosfera. A cromosfera, com uma altura de aproximadamente 10.000 km é formada por gases de baixa densidade e temperaturas parecidas com a camada anterior. E por último a coroa, formada por gases de baixa densidade e temperaturas de entorno de 10^6 K .

A seguir, na tabela 1, estão presentes as principais características do sol.

Tabela 1 – Principais características do Sol.
Fonte: Adaptado de Oliveira Filho & Saraiva (2014)

Principais características do Sol	
Massa	$1,989 \times 10^{30}$ kg
Raio	$6,960 \times 10^8$ m
Densidade média	1409 kg.m^{-3}
Densidade central	$1,6 \times 10^5 \text{ kg.m}^{-3}$
Temperatura efetiva	5785 K
Temperatura central	$1,5 \times 10^7$ K
Distância da Terra	$1,496 \times 10^8$ km
Composição química principal	Hidrogênio = 91,2%
	Hélio = 8,7%
	Oxigênio = 0,078%
	Carbono = 0,049%

2.2.2 Orientação Sol – Terra

Segundo Labouret & Viloz (2010), a terra se move em torno do sol em uma trajetória elíptica de pequena excentricidade ($e = 0.017$), como observado na figura 3, e possui um ângulo de inclinação de $23^{\circ}27'$ em relação ao plano da elíptica. O ângulo entre os raios solares e o plano do equador é denominado como declinação solar (δ) e é responsável pelas estações do ano. No hemisfério norte o ângulo varia de $+23^{\circ}27'$ no solstício de verão (21 de junho) até $-23^{\circ}27'$ no solstício de inverno (21 de dezembro) e durante os equinócios de primavera e outono (21 de setembro e 21 de março respectivamente) os raios solares se alinham com o plano do equador e o ângulo de declinação é igual a zero. O contrário é verdadeiro para o hemisfério sul.

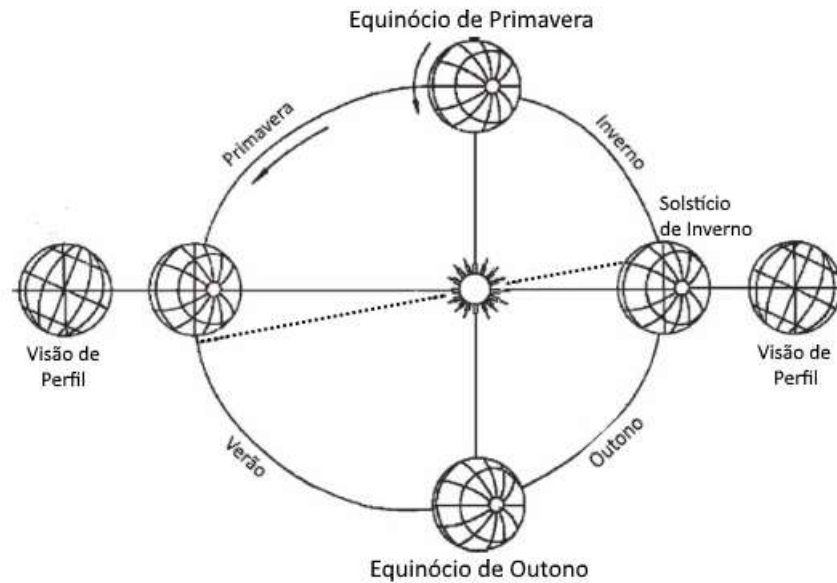


Figura 3 – Plano da elíptica.
Fonte: Adaptado de Labouret & Viloz (2010)

A declinação aproximada do sol pode ser calculada para qualquer dia n do ano pela equação de Cooper (1969).

$$\delta = 23,45 \text{sen} \left(360 \frac{(284 + n)}{365} \right) \quad (1)$$

Em que $n=1$ para 1 de Janeiro, $n=2$ para 2 de Janeiro e assim sucessivamente até 31 de Dezembro.

2.2.2.1 Sistema de Coordenadas Celestes

Os sistemas de coordenadas celestes definem a posição dos astros na esfera celeste e estão nos princípios das equações utilizadas para calcular a radiação solar incidente sobre a terra. São eles o sistema horizontal e o sistema equatorial.

O sistema horizontal tem como base o horizonte celeste e a posição dos astros é definida através da altura e do azimute. A altura (h) é o ângulo medido que passa sobre astro entre o horizonte celeste e o astro. O azimute (A) é o ângulo medido sobre o horizonte com origem no ponto cardeal Norte, no sentido horário, e fim no círculo vertical do astro. As coordenadas de azimute e de altura não dependem do astro e sim

do lugar e do instante de observação na Terra (Oliveira Filho & Saraiva, 2014). A figura 4 mostra a representação do sistema horizontal.

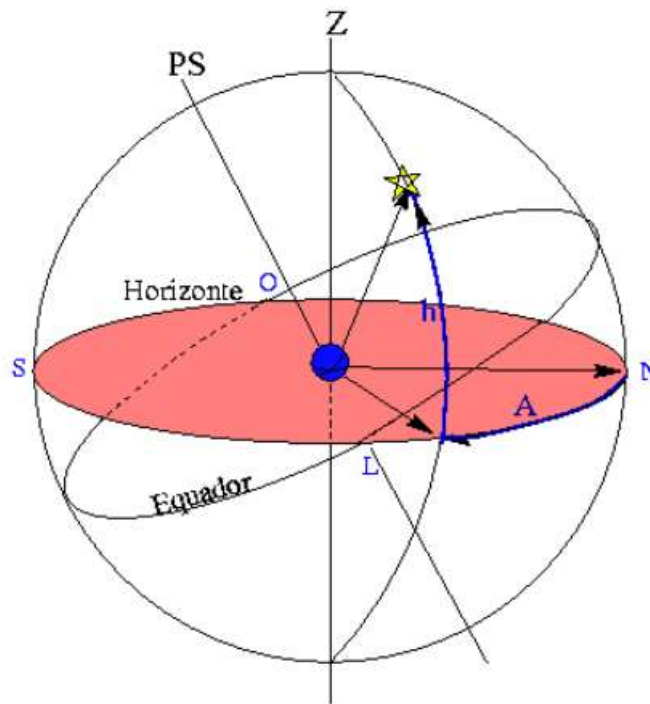


Figura 4 – Sistema de coordenadas horizontal.
Fonte: Adaptado de Oliveira Filho & Saraiva (2014)

O sistema equatorial utiliza como base o plano do equador celeste e a posição dos astros é definida pela Ascensão reta (α) e a declinação. A ascensão reta é o ângulo medido sobre o equador, no sentido anti-horário, com origem no ponto Vernal (ponto em que o sol cruza o equador celeste no equinócio de primavera) e fim no meridiano do astro. A declinação é o ângulo medido sobre o meridiano que passa pelo astro com origem no equador celeste. Neste sistema, as coordenadas de um astro permanecem constantes por longos períodos de tempo, não dependo do lugar e do instante de observação na Terra (Oliveira Filho & Saraiva, 2014). A figura 5 mostra a representação do sistema equatorial.

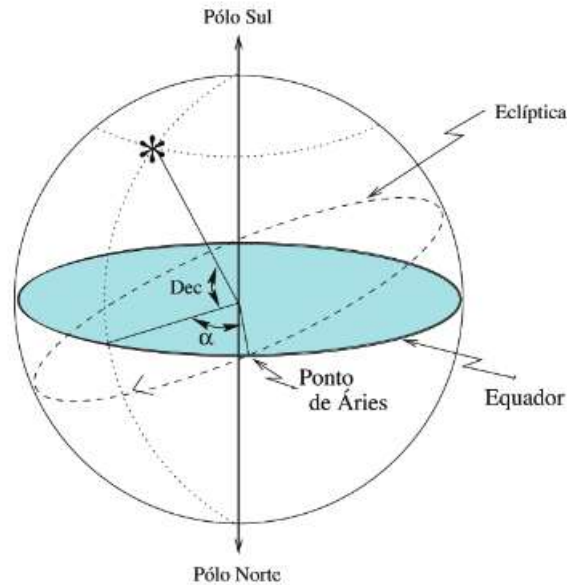


Figura 5 – Sistema de coordenadas equatorial.
Fonte: Adaptado de Oliveira Filho & Saraiva (2014)

2.2.3 Radiação Solar

Para a realização de projetos de sistemas solares é necessário saber informações detalhadas sobre a radiação solar disponível. A potência térmica recebida do sol por unidade de área perpendicular aos raios solares que chega ao exterior da atmosfera terrestre é chamada de constante solar. Por definição, o Centro de Radiação Mundial (WRC) adota o valor de 1367 W/m^2 com incerteza de 1%. A equação 2 pode ser utilizada para calcular a constante solar de acordo com a variação da posição do sol em relação a terra (Duffie & Beckman, 2013).

$$S_{on} = 1367 \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) \quad (2)$$

Onde: S_{on} é o valor médio diário da constante solar em função do n dia do ano ($n=1$ para 1 de Janeiro, $n=2$ para 2 de Janeiro e assim sucessivamente até 31 de Dezembro).

A energia solar em forma de radiação eletromagnética, de acordo com Goswami (2015), possui comprimentos de onda que variam de aproximadamente 300 nm (10^{-9} m) até acima de 3000 nm. A região abaixo de 400 nm corresponde aos raios ultravioleta, a região de 400 nm até 700 nm corresponde a radiação visível e acima de 700 nm é a radiação infravermelha. A maior parte da energia está concentrada na região visível e infravermelha.

Ainda de acordo com Goswami (2015), a energia solar radiante incidente, por unidade de tempo, em uma superfície unitária é chamada de irradiância. A radiação solar distribuída em comprimentos de onda e a irradiância dentro de uma determinada banda espectral é chamada de irradiância espectral. A figura 6 mostra o espectro de irradiação solar fora da atmosfera terrestre e ao nível do mar e os comprimentos de onda típicos usados em diferentes aplicações solares.

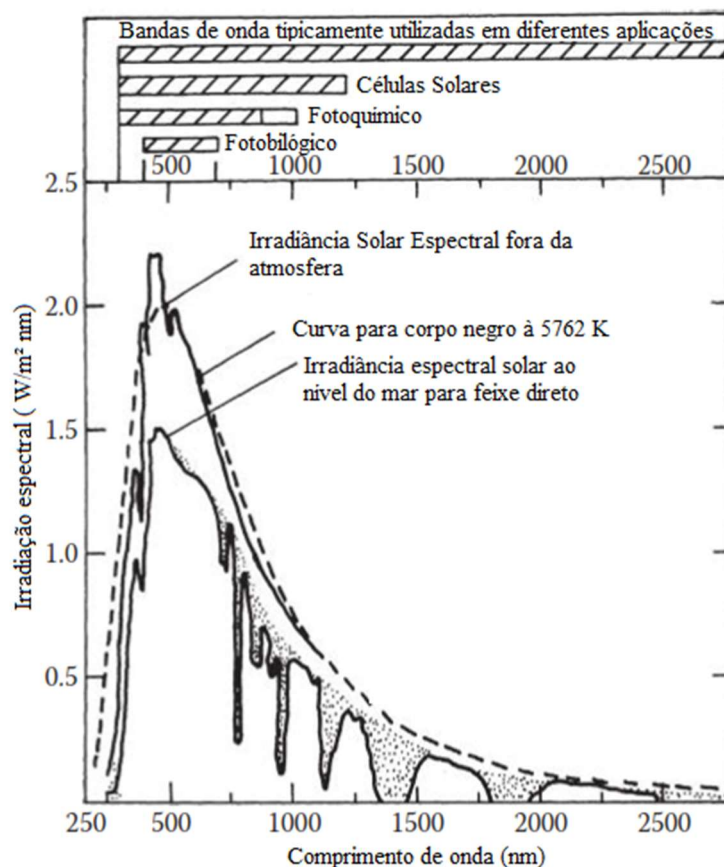


Figura 6 – Espectro de irradiação solar e comprimento de ondas típicos em aplicações solares.
Fonte: Adaptado de Goswami (2015)

O espectro de irradiação solar fora da atmosfera pode ser aproximado com a irradiação de um corpo negro¹, como indicado na figura 6.

2.2.3.1 Base de dados meteorológicas

Espalhadas por todo o planeta, existem estações de medições meteorológicas que utilizam equipamentos como o pireliómetro para coletar e compilar dados sobre a radiação solar incidente na Terra. Infelizmente, o acesso a esses dados nem sempre é fácil e gratuito (Labouret & Viloz, 2010). O Atlas de Radiação Solar Europeu² contém valores médios de 10 anos da radiação total e difusa em diferentes orientações e inclinações. A base de dados meteorológica da NASA³ é também bastante utilizada e completa. Outros softwares como o Meteonorm⁴, o PVSyst⁵ e o TRNSYS⁶ fornecem dados de radiação solar, contudo não possuem licença gratuita.

2.2.3.2 Radiação direta, difusa e albedo.

De acordo com Labouret & Viloz (2010), a totalidade da radiação emitida pelo sol não chega à superfície da terra, conforme passa pela atmosfera é parcialmente absorvida e refletida, desse modo, pode-se distinguir diferentes frações da radiação. A fração da radiação do sol que chega em linha reta e sem interferências é chamada de radiação direta. A radiação difusa é a fração correspondente à luz dispersa na atmosfera, refletida em diversas direções pelas nuvens e pelas partículas presentes no ar. A radiação difusa varia de acordo com as condições climáticas. Por último, o Albedo, é a fração refletida pelo solo e depende da localização do ambiente. A figura 7 mostra os

¹ Corpo negro: objeto que possui absorção e emissão ideal de radiação. Conforme é esquentado, começa a brilhar, isto é, emitir radiação eletromagnética em diferentes comprimentos de onda. (Wenham, Green, Watt, & Corkish, 2007)

² W. Palz, J.Greif (eds.), European Solar Radiation Atlas: Solar Radiation on Horizontal and Inclined Surfaces, Springer-Verlag, Berlin; 2008.

³ <https://eosweb.larc.nasa.gov/>

⁴ <http://www.meteonorm.com/>

⁵ <http://www.pvsyst.com/en/>

⁶ <http://www.trnsys.com/>

três diferentes tipos de radiação solar na atmosfera terrestre. A soma das três parcelas é chamada de radiação total.

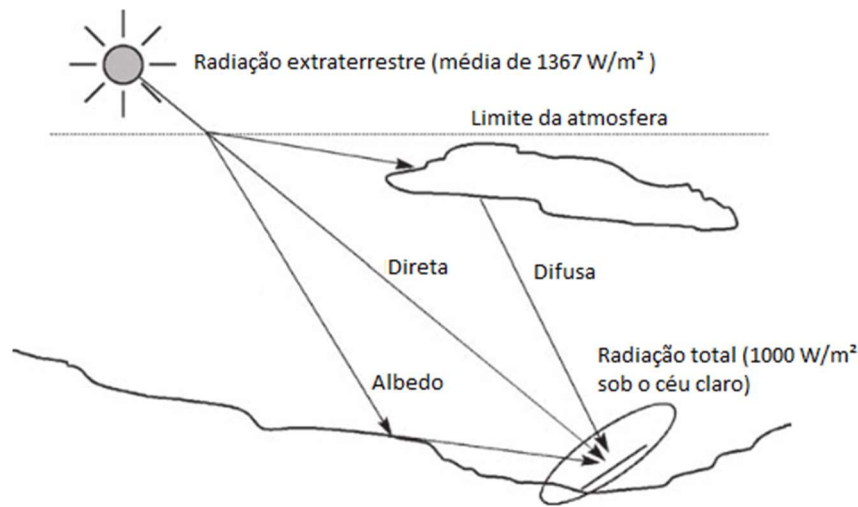


Figura 7 – Componentes da radiação solar.
Fonte: Adaptado de Labouret & Viloz (2010)

2.2.3.3 Índice de claridade

O índice de claridade, K_T , mede a permeabilidade da atmosfera terrestre à radiação solar no intervalo de 0 a 1. Quanto maior for o K_T , mais claro é o dia (sem nuvens e poluição) e vice-versa. O índice de claridade é determinado experimentalmente pela razão entre a radiação solar incidente em um plano horizontal na superfície da terra (G_H) e a radiação solar incidente em um plano horizontal fora da atmosfera terrestre (S_{oh}) (Duffie & Beckman, 2013).

$$K_T = \frac{G_H}{S_{oh}} \quad (3)$$

O índice de claridade pode ser encontrado nas bases de dados meteorológicas apresentadas na seção 2.2.3.1. Os parâmetros G_H e S_{oh} serão melhores definidos na próxima seção.

2.2.3.4 Cálculo da radiação média em superfícies inclinadas

A seguir, será apresentado a metodologia para o cálculo da radiação solar média mensal incidente em superfícies inclinadas na superfície terrestre de acordo com o método KT realizado por Klein & Theilacker (1981) e presente no livro Solar Engineering of Thermal Processes de Duffie & Beckman (2013).

Os cálculos serão realizados em três passos: determinação da energia solar incidente sobre uma superfície horizontal fora da atmosfera terrestre, determinação da energia solar incidente sobre uma superfície horizontal pousada na superfície terrestre e por último, a determinação da energia solar incidente sobre uma superfície terrestre inclinada relativamente a horizontal.

2.2.3.4.1 Radiação solar incidente sobre uma superfície extraterrestre.

A equação 4 dá-nos a energia média diária que incide em uma superfície horizontal fora da atmosfera terrestre (S_{oh}^d) em J/m².

$$S_{oh}^d = \frac{24 \times 3600}{\pi} \times 1367 \left[1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] \times \left[\cos\Phi \cos\delta \sin H_o + \frac{2\pi H_o}{360} \sin\Phi \sin\delta \right] \quad (4)$$

Onde: δ é a declinação do sol, ϕ é a latitude para o lugar da Terra, H_o é o ângulo horário do por do sol e n é número do dia do ano ($n=1$ para 1 de janeiro, $n = 2$ para 2 de janeiro e assim sucessivamente até 31 de dezembro)

O ângulo horário do por do sol é o ângulo, medido em graus, com que o sol se põe em determinada latitude e pode ser calculado pela equação 5.

$$H_o = \cos^{-1}(-\tan\delta \tan\Phi) \quad (5)$$

A partir dos valores de S_{oh}^d calculados para cada dia do ano, podemos obter os valores diários médios mensais (S_{oh}^{dm}) para cada mês a partir da média dos valores de cada mês de S_{oh}^d

2.2.3.4.2 Radiação solar incidente sobre um plano horizontal na superfície da Terra

Para calcular a energia diária média mensal solar incidente sobre um plano horizontal colocado na superfície da Terra (G_h^{dm}) em determinada latitude, em J/m^2 , utiliza-se a equação 6.

$$G_h^{dm} = K_T^{dm} \times S_{oh}^{dm} \quad (6)$$

Onde: K_T^{dm} é o valor diário médio mensal do índice de claridade e pode ser encontrado de acordo com as informações obtidas na seção 2.2.3.3.

2.2.3.4.3 Radiação solar incidente sobre um plano inclinado na superfície da Terra

O cálculo da energia solar diária média mensal incidente sobre um plano inclinado relativamente à horizontal na superfície da terra (I_β^{dm}), equação 7, depende de R e da radiação incidente sobre um plano horizontal na superfície da Terra.

$$I_\beta^{dm} = R^{dm} \times G_h^{dm} \quad (7)$$

R^{dm} é a relação do valor diário médio mensal entre a radiação total em um plano inclinado e a do plano de medição, e é calculado pela equação 8. β_s é a inclinação do plano em relação a superfície e ρ é o albedo.

$$R^{dm} = \left(1 - \frac{D_h^{dm}}{G_h^{dm}}\right) R_s^{dm} + \frac{D_h^{dm}}{G_h^{dm}} \left(\frac{1 + \cos\beta_s}{2}\right) + \rho \left(\frac{1 - \cos\beta_s}{2}\right) \quad (8)$$

Em que D_h^{dm}/G_h^{dm} é a correlação, de Collares-Pereira e Rabl (1979), da radiação mensal difusa pela radiação total e pode ser calculada empiricamente pela equação 9.

$$\frac{D_h^{dm}}{G_h^{dm}} = 0,775 + 0,00606(H_o - 90) - [0,505 + 0,00455(H_o - 90)]\cos(115K_T^{dm} - 103) \quad (9)$$

O valor da radiação direta incidente sobre uma superfície pousada na Terra é dada pelas seguintes equações: equação 10 para o hemisfério norte.

$$R_s^{dm} = \frac{\cos(\Phi - \beta_s) \cos\delta \sin H_o^{min} + \frac{\pi}{180} H_o^{min} \sin(\Phi - \beta_s) \sin\delta}{\cos\Phi \cos\delta \sin H_o + \frac{\pi}{180} H_o \sin\Phi \sin\delta} \quad (10)$$

Onde H_o^{min} é o menor valor entre a equação 5 e $H_o = \cos^{-1}[-\text{tag}\delta \text{tag}(\Phi - \beta_s)]$.

Equação 11 para o hemisfério sul.

$$R_s^{dm} = \frac{\cos(\Phi + \beta_s) \cos\delta \sin H_o^{min} + \frac{\pi}{180} H_o^{min} \sin(\Phi + \beta_s) \sin\delta}{\cos\Phi \cos\delta \sin H_o + \frac{\pi}{180} H_o \sin\Phi \sin\delta} \quad (11)$$

Onde H_o^{min} é o menor valor entre a equação 5 e $H_o = \cos^{-1}[-\text{tag}\delta \text{tag}(\Phi + \beta_s)]$.

Calculados os valores de R^{dm} e G_h^{dm} obtêm-se o valor diário médio mensal da radiação solar incidente em um plano inclinado relativamente à horizontal na superfície da Terra (I_β^{dm}). O valor de I_β^{dm} pode ser utilizado para cálculos de dimensionamento de sistemas conversores de energia solar.

2.3 Sistemas Fotovoltaicos

A tecnologia de conversão de energia solar em energia elétrica é baseada em princípios físicos completamente diferentes dos outros meios de produção de eletricidade. Enquanto os meios de produção a partir da energia eólica, hídrica e vapor se fundamentam nas leis macroscópicas da física, a conversão da energia solar em elétrica está baseada nos princípios da física quântica. Sendo mais flexível, pode-se ter instalações desde 1 W a maiores que 1GW. A energia fotovoltaica tem muito a crescer devido aos avanços tecnológicos principalmente relacionados com a área da indústria eletrônica (Foundation Nicolas Hulot, 2015).

2.3.1 Panorama Mundial

Nos últimos 6 anos, os investimentos em tecnologias para utilização de energia solar foram os maiores entre as demais fontes renováveis de energia, representando 56% do total investido. Até 2006, a produção das células solares era dominada pelos países europeus e pelo Japão, entretanto, com o rápido crescimento da produção em países como China e Taiwan, uma nova tendência surgiu em 2014 aumentando a produção em outros países asiáticos (Jäger-Waldau, 2016).

Segundo Jäger-Waldau (2016), no final de 2015 a capacidade instalada de produção de energia elétrica a partir de tecnologia fotovoltaica era de 235 GW, podendo a capacidade duplicar até 2018. Em 2016 a potência instalada esperada é de 310 GW. Apesar de haver crescimento nos investimentos para produção de energia elétrica com origem na tecnologia fotovoltaica em praticamente todo o mundo, os investimentos diminuíram nos países europeus, como pode ser visto na figura 8.

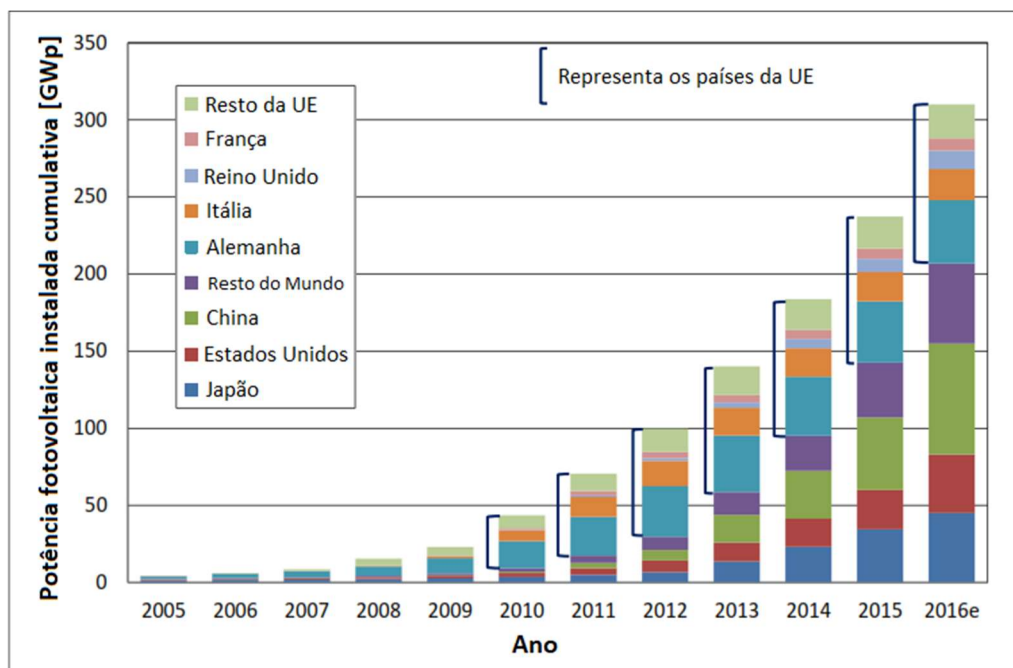


Figura 8 – Potência fotovoltaica instalada no mundo.

Fonte: adaptado de Jäger-Waldau (2016)

A figura 9 mostra o potencial de produção fotovoltaico na Europa e a irradiação solar em um plano ótimo inclinado em relação à superfície. Os dados são uma média do período de 1998 até 2011. Os países do sul da Europa, como Portugal, Itália e Espanha

possuem maior incidência de radiação solar durante o ano, do que os países norte europeus, logo possuem maior capacidade de produção de energia elétrica por tecnologia fotovoltaica.

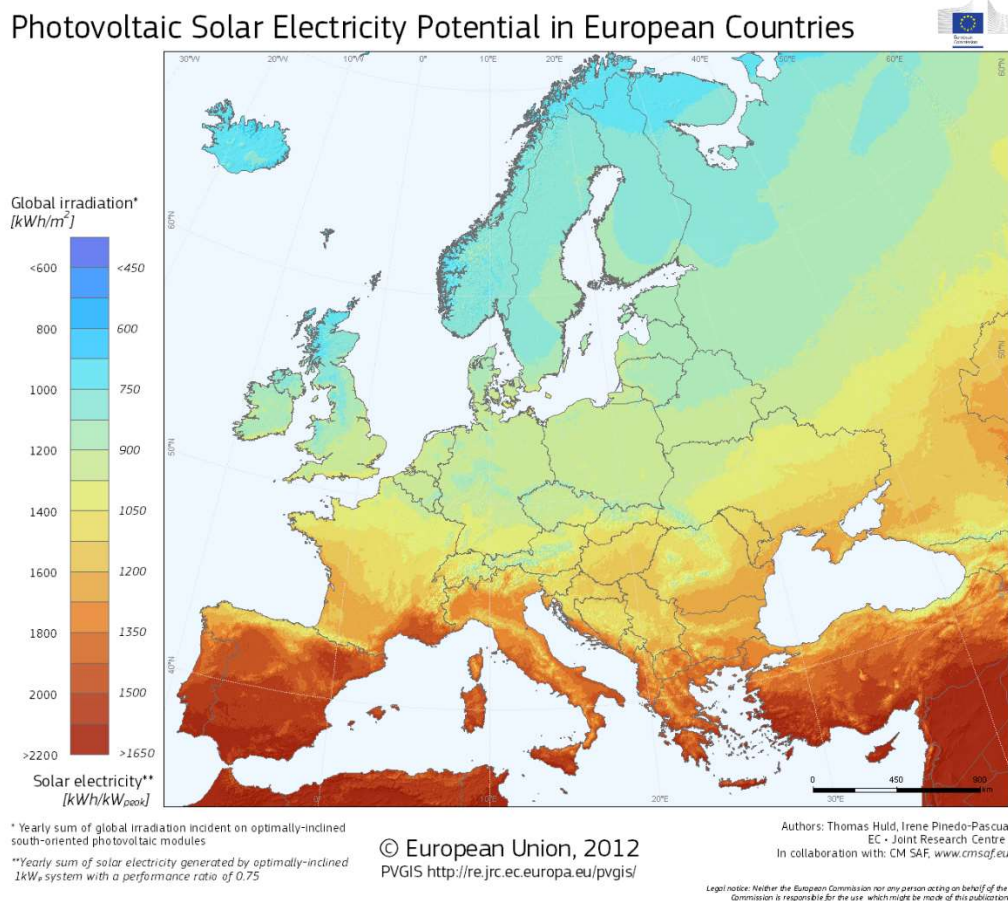


Figura 9 – Potencial de produção de energia fotovoltaica na Europa.
Fonte: PVGIS © European Union, 2001-2012

A figura 10, mostra o potencial de produção de energia elétrica por tecnologia fotovoltaica em Portugal para um ângulo ótimo em relação à superfície terrestre.

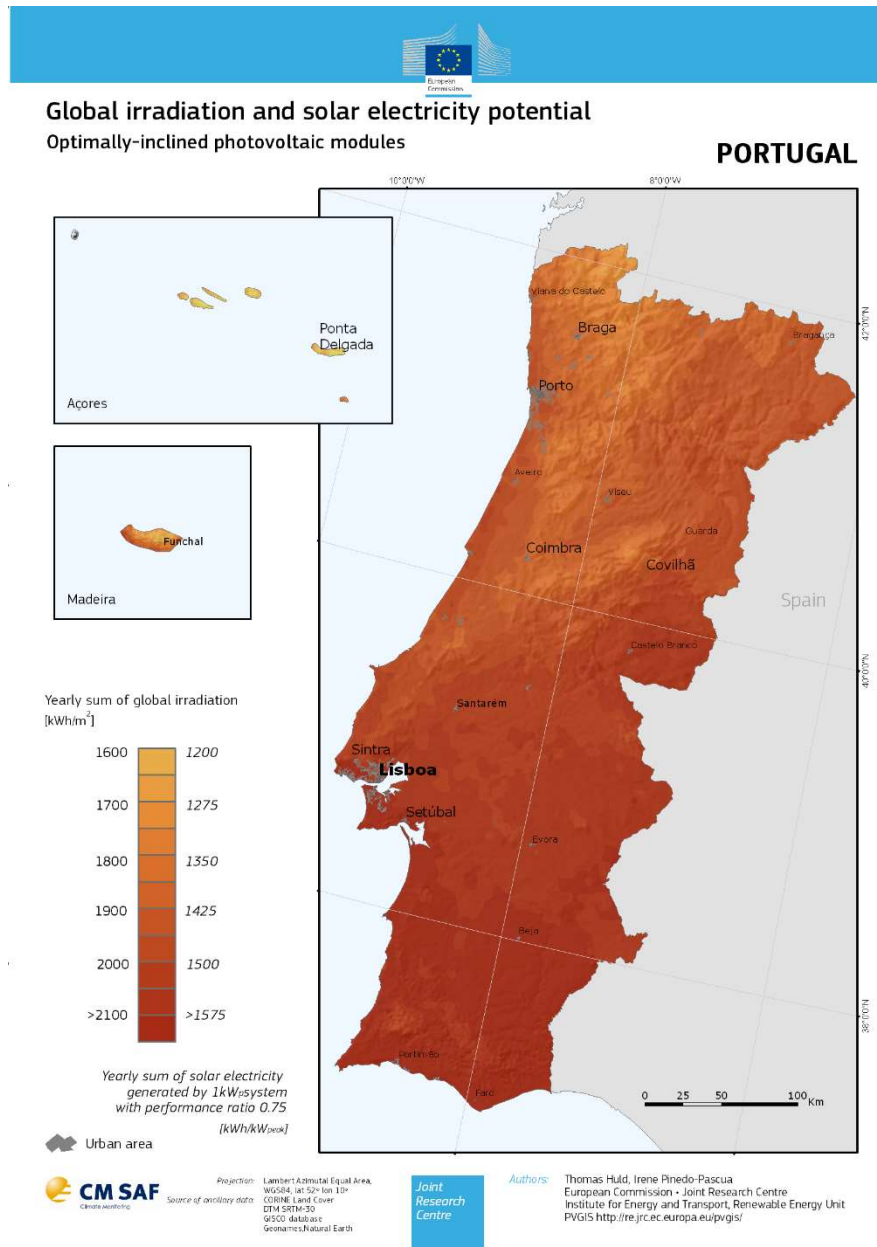


Figura 10 – Potencial de produção fotovoltaica em Portugal.
Fonte: PVGIS © European Union, 2001-2012

Apesar da grande incidência de radiação solar em Portugal, o crescimento da produção de energia fotovoltaica é lento, chegando em 2015 a um total de produção instalado de 460 MW, (Jäger-Waldau, 2016).

2.3.2 Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico se caracteriza pela conversão direta de luz em energia elétrica. Isso ocorre quando dois materiais semicondutores são iluminados por radiação de

fotões, desenvolvendo assim uma diferença de potencial elétrico entre os dois. O efeito fotovoltaico foi descoberto por físico francês Becquerel em 1839, contudo, apenas em 1954 a primeira célula fotovoltaica foi produzida (Patel, 1999).

2.3.3 Célula Fotovoltaica

As células fotovoltaicas são produzidas a partir de materiais classificados como semicondutores, que se caracterizam por possuírem uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução sem elétrons quando em temperaturas próximas ao zero absoluto. A separação das duas bandas de energia é conhecida como bandgap ou banda proibida, e pode atingir até 3 eV (elétron-volt). Uma propriedade importante dos semicondutores é, que devido à existência das bandas de energia, existe o aumento da condutividade com a temperatura, proporcionado pela excitação térmica de elétrons na banda de valência para a banda de condução (Pinho & Galdino, 2014).

Ainda de acordo com Pinho & Galdino (2014), para o aproveitamento da corrente e da tensão elétrica no semicondutor é necessário aplicar um campo elétrico. Para tal, é preciso realizar a dopagem do semicondutor, ou seja, introduzir impurezas de forma controlada a fim de mudar as propriedades elétricas do material, formando assim a chamada junção *pn* (figura 11).

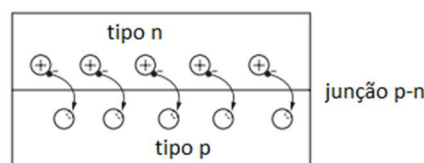


Figura 11 – Junção *pn*.
Fonte: Adaptado de Goswami (2015)

A seguir será realizada uma breve explicação sobre o funcionamento da junção *pn* de acordo com Pinho & Galdino (2014).

O silício (Si) cristalino é o material mais utilizado na produção de células fotovoltaicas, seus átomos possuem quatro elétrons na camada de valência que formam ligações covalentes com os átomos vizinhos. Ao se introduzir nesta estrutura um átomo com

cinco elétrons na camada de valência, haverá um elétron em excesso que ficará fracamente ligado a seu átomo de origem. Isto faz com que, à temperatura ambiente, pouca energia fornecida faça com o elétron salte para a banda de condução, deixando seu átomo de origem com carga fixa positiva. O Fósforo (P), o Arsênio (As) e o Antimônio (Sb) são exemplos de átomos pentavalentes e são conhecidos como dopantes do tipo *n*.

Por outro lado, se introduzido um átomo com três elétrons na camada de valência haverá falta de um elétron para completar as ligações com os átomos de Si na estrutura. Esta falta é denominada lacuna e à temperatura ambiente, a energia térmica de um elétron de uma ligação vizinha é suficiente para fazê-lo ocupar essa posição, tornando o átomo com carga fixa negativa. O Boro (B), o Alumínio (Al), o Gálio (Ga) e o Índio (In) são átomos trivalentes e são conhecidos como dopantes do tipo *p*.

No caso de um semiconductor de Si dopado com P e B, à temperatura ambiente existe energia suficiente para que a maioria dos átomos de Fósforo estejam livres e para que todas as lacunas criadas pelos átomos de Boro se desloquem. A figura 12 mostra a estrutura física de célula fotovoltaica dopada com Fósforo e Boro.

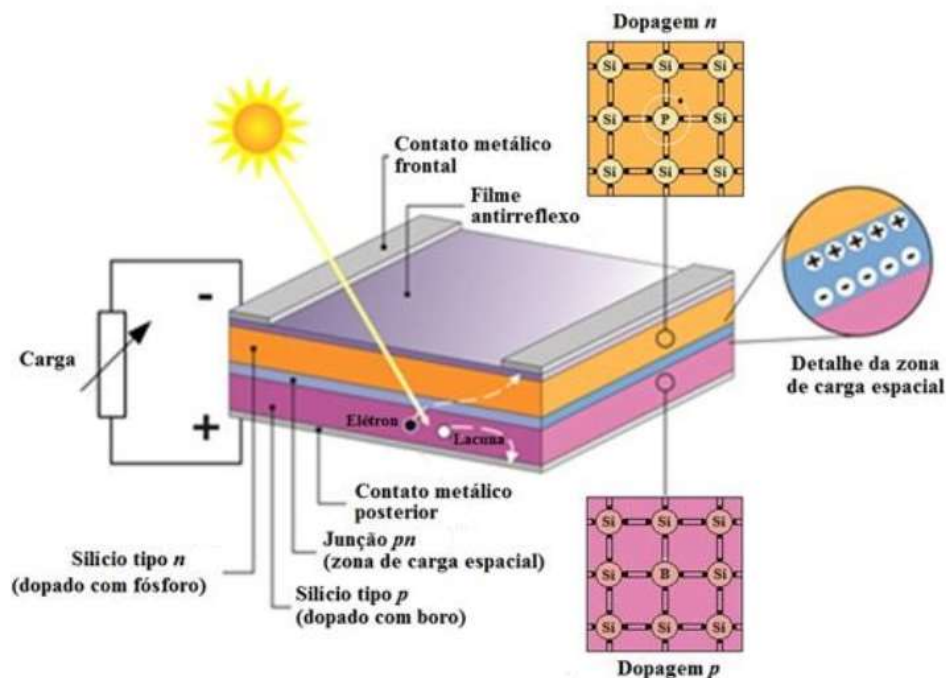


Figura 12 – Estrutura física da célula fotovoltaica dopada com Fósforo e Boro.
Fonte: Adaptado de Pinho & Galdino (2014)

Na junção pn , o excesso de elétrons livres da região n se difunde para a região p . Dessa forma há o acúmulo de elétrons no lado p , tornando sua carga negativa e uma redução dos elétrons no lado n , tornando-o eletricamente positivo. Esse processo não continua indefinidamente, porque o excesso de cargas na junção pn faz com que haja um campo elétrico, que impede a movimentação dos elétrons. Se uma junção pn for exposta a fótons com energia maior que a da bandgap, ocorrerá a geração de pares elétron-lacuna na região onde o campo elétrico é diferente de zero. As cargas serão aceleradas gerando uma corrente através da junção.

Para haver a circulação de elétrons, é necessário a existência de um contacto metálico superior e um inferior ligados por meio de um condutor. O filme antirreflexo é utilizado para absorver o máximo de energia solar incidente possível minimizando a reflexão, como visto na figura 12. A proteção mecânica é oferecida por um vidro colocado acima do filme antirreflexo.

2.3.4 Características elétricas

O módulo fotovoltaico é usualmente caracterizado apenas pela sua potência de pico (Wp), contudo, é necessário observar outras características elétricas com vista a verificar a compatibilidade do sistema com sua aplicação. A medição dos parâmetros elétricos das células e módulos fotovoltaicos são realizados em sua grande maioria de acordo com as condições padrão de ensaio (STC, do inglês Standard Test Conditions) que considera a irradiação incidente sobre a célula/painel de 1000 W/m^2 a uma temperatura de 25°C , (Pinho & Galdino, 2014).

Nesta secção é apresentada uma análise das características elétricas das células fotovoltaicas. A figura 13 apresenta o circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica de acordo com Goswami (2015). É importante saber que, a corrente elétrica gerada em um sistema solar é proporcional a área das células, logo é apropriado realizar a análise em termos de densidade de corrente (corrente por unidade de área).

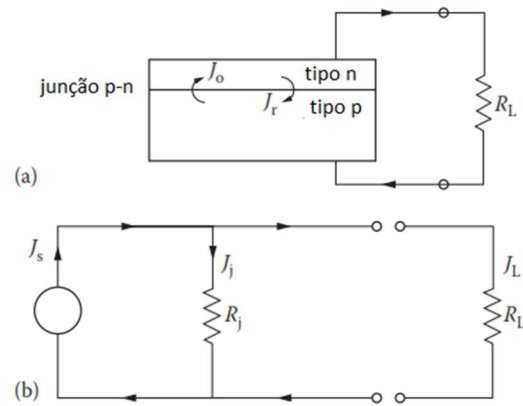


Figura 13- Circuito elétrico equivalente de uma célula solar.
Fonte: adaptado de Goswami (2015)

De acordo com Goswami (2015), na junção pn mostrada na figura 13a a corrente de saturação reversa do díodo (J_o) é gerada pelo movimento dos elétrões, a uma determinada temperatura T , da junção p para a junção n . Quando uma tensão V é aplicada sobre a junção pn , ou seja, fotões de luz atingem a célula fotovoltaica, os elétrões da junção n se deslocam para a junção p dando origem a corrente fotogerada (J_r). A subtração de J_o de J_r é chamada de corrente elétrica da junção pn ($J_j = J_r - J_o$). A corrente fotogerada pode ser calculada pela equação 12 e a corrente da junção pn pela equação 13.

$$J_r = J_o \exp(e_0 V / kT) \quad (12)$$

e

$$J_j = J_o [\exp(e_0 V / kT) - 1] \quad (13)$$

Onde e_0 é a carga do elétron (1.6×10^{-19} C) e k é a constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} J/K).

A corrente gerada na célula fotovoltaica tem dois caminhos paralelos, um pela junção pn (R_j) e outro pela resistência externa (R_L) como visto na figura 13b. A corrente (J_L) que passa pela resistência externa é calculado pela equação 14, onde J_s é a corrente de curto-circuito.

$$J_L = J_s - J_j$$

$$J_L = J_s - J_o [\exp(e_0 V / kT) - 1] \quad (14)$$

A corrente de curto-circuito (J_s ou I_{sc}), conforme Jäger, et al (2014), é a corrente que passa pelo circuito externo quando a tensão nos terminais é igual a zero, ou seja, quando $V = 0$, $J_s = J_L$. A corrente de curto-circuito é a máxima que se pode obter e depende da irradiação solar no coletor e de sua distribuição espectral. Também sofre influência de parâmetros como a área e as propriedades óticas da célula solar, como a absorção e reflexão. Quando não existe corrente passando pelo circuito externo obtemos a tensão de circuito aberto, V_{oc} , que é a tensão máxima que a célula solar pode fornecer e que depende da corrente fotogerada e da corrente de saturação. A tensão de circuito aberto pode ser calculada pela equação 15, quando $J_L = 0$ e $V = V_{oc}$.

$$V_{oc} = \frac{kT}{e_0} \ln\left(\frac{J_s}{J_0} + 1\right) \quad (15)$$

Através das características elétricas das células fotovoltaicas é possível traçar a curva típica de performance ($I - V$) apresentada na figura 14. Nela são representados os valores da corrente de curto-circuito (I_{sc}), da tensão de circuito aberto (V_{oc}), da corrente e tensão quando a potência é máxima (I_{mp} e V_{mp} respectivamente) e a potência máxima da célula solar (P_{mp}), (Goswami, 2015).

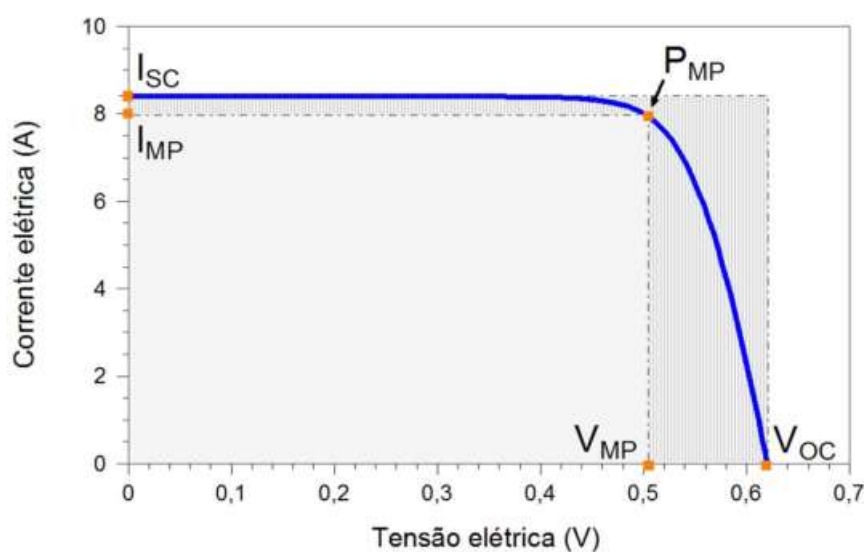


Figura 14 – Curva característica de performance de uma célula fotovoltaica.
Fonte: Pinho & Galdino (2014)

Ainda segundo Goswami (2015), através das equações 16, 17 e 18 é possível calcular a tensão no ponto de potência máxima, a corrente no ponto de potência máxima e a potência máxima fornecida pela célula solar respectivamente.

$$\exp\left(\frac{e_0 V_{mp}}{kT}\right) \left(1 + \frac{e_0 V_{mp}}{kT}\right) = 1 + \frac{J_s}{J_o} \quad (16)$$

$$J_{mp} = I_{mp} = \frac{e_0 V_{mp}/kT}{1 + (e_0 V_{mp}/kT)} (J_s + J_o) \quad (17)$$

$$P_{mp} = \frac{e_0 V_{mp}^2/kT}{1 + (e_0 V_{mp}/kT)} (J_s + J_o) A \quad (18)$$

Onde A é a área do coletor solar ou da célula solar.

A potência máxima pode ser calculada de forma alternativa pela equação 19.

$$P_{mp} = J_{mp} V_{mp} \quad (19)$$

Outros dois parâmetros elétricos importantes, segundo Jäger, et al. (2014) são o fator de forma (FF) e a eficiência de conversão (η). O fator de forma é a razão entre a potência máxima gerada pela célula solar e o produto da corrente de curto-circuito com a tensão de circuito aberto (equação 20). Quanto menores forem as perdas resistivas no sistema, mais próximo da forma retangular será o sistema, como visto na figura 14. Os valores de FF variam de acordo com os materiais utilizados no fabrico da célula.

$$FF = \frac{J_{mp} V_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (20)$$

Já a eficiência de conversão é a razão entre a energia máxima gerada e a energia incidente na célula.

$$\eta = \frac{J_{mp} V_{mp}}{P_{in}} \quad (21)$$

Onde a potência incidente é a área da célula multiplicada pela radiação incidente ($P_{in} = AI_{\beta}^{dm}$). Para as condições standard de medições para painéis fotovoltaicos $P_{in} = 1000 W/m^2$.

A I_{sc} , a I_{mp} , a V_{oc} e a V_{mp} são dados fornecidos pelos fabricantes de painéis fotovoltaicos, e estão presentes nas fichas técnicas de cada modelo.

2.3.5 Associação de células e painéis fotovoltaicos

As células fotovoltaicas, de acordo com Pinho & Galdino (2014), são conectadas em série e em paralelo para formar os painéis fotovoltaicos, por sua vez, os painéis também podem ser conectados em série e em paralelo para obter-se a voltagem e a corrente desejada. Na associação em série, o terminal positivo do dispositivo fotovoltaico é conectado ao terminal negativo do outro dispositivo, dessa forma, para dispositivos idênticos, a corrente permanece constante e as tensões são somadas. Já na associação em paralelo os terminais positivos são interligados com os positivos, o mesmo ocorre com os terminais negativos. Assim, para dispositivos idênticos, a tensão se mantém constante e as correntes elétricas são somadas. A figura 15 mostra a curva I-V de duas células solares conectadas em série (a) e paralelo (b).

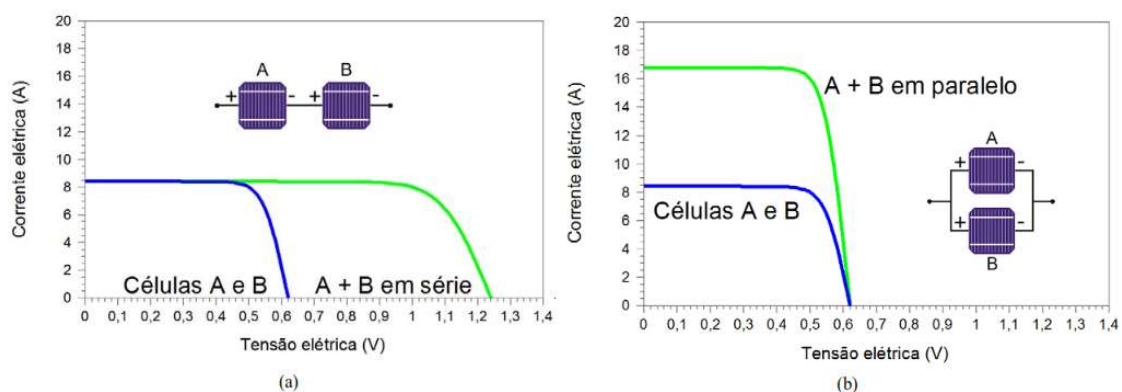


Figura 15 – Associação de células fotovoltaicas em série (a) e em paralelo (b).

Fonte: adaptado de Pinho & Galdino (2014)

2.3.6 Parâmetros que influenciam a eficiência do painel solar

As células solares e, conseqüentemente os painéis solares possuem seu desempenho afetado pela influência da irradiação solar, da temperatura nas células e do sombreamento nos módulos.

2.3.6.1 Irradiância solar

O aumento da irradiância solar incidente no painel fotovoltaico faz com que exista um acréscimo linear da corrente elétrica gerada, enquanto que a tensão de circuito aberta aumenta de forma logarítmica no caso de a temperatura ser constante conforme mostrado pela figura 16, (Pinho & Galdino , 2014).

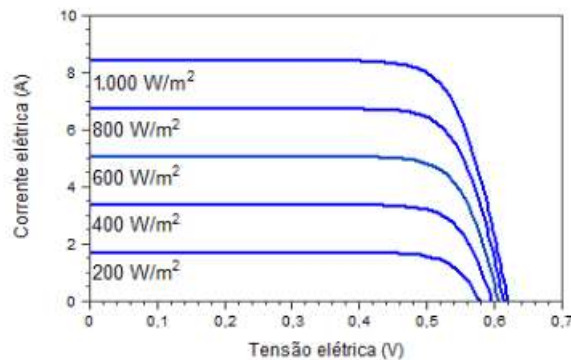


Figura 16 – Influência da irradiância solar em uma célula de silício cristalino na temperatura de 25°C.
Fonte: Pinho & Galdino (2014)

2.3.6.2 Temperatura

Ainda de acordo com Pinho & Galdino (2014), o aumento da temperatura na célula influencia diretamente a potência produzida pelo painel solar, como observado na figura 17. A corrente elétrica sofre um aumento pequeno que não compensa a perda causada pela diminuição da tensão.

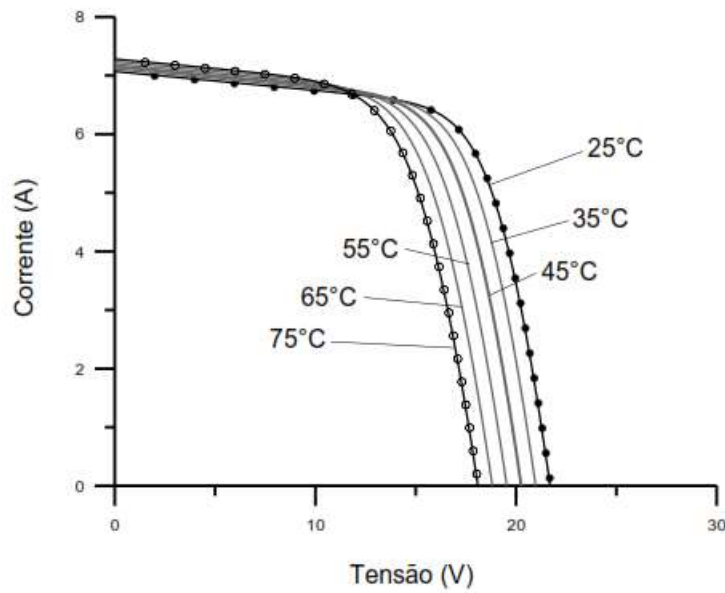


Figura 17 – Influência da temperatura na célula solar para um módulo de silício cristalino sob irradiância de 1000 W/m².

Fonte: Adaptado de Pinho & Galdino (2014)

A variação na corrente e na tensão e conseqüentemente na potência do painel fotovoltaico é contabilizada através dos coeficientes de temperatura β , α e γ , onde: β é a variação da tensão de circuito aberto com a temperatura e possui valor negativo, α é a variação da corrente de curto-circuito com a temperatura e possui valor positivo e γ é a variação da potência com a temperatura é negativo.

$$\beta = \frac{\Delta V_{oc}}{\Delta T} ; \alpha = \frac{\Delta I_{sc}}{\Delta T} ; \gamma = \frac{\Delta P_{mp}}{\Delta T} \quad (22) \quad (23) \quad (24)$$

Alguns fabricantes de painéis fotovoltaicos fornecem o coeficiente $\beta_{V_{MP}}$ que é específico para a tensão em máxima potência, esse valor é geralmente maior que β .

Com os coeficientes de temperatura definidos é possível calcular V_{oc} , I_{sc} e P_{mp} para determinada temperatura através das equações 25, 26 e 27. Para o cálculo de P_{mp} considera-se que α é igual a $\alpha_{I_{MP}}$.

$$V_{oc}(T) = V_{oc_{stc}}(1 + \beta \cdot \Delta T) \quad (25)$$

$$I_{sc}(T) = I_{sc_{stc}}(1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (26)$$

$$P_{MP}(T) = V_{MP}(T) \cdot I_{MP}(T) = V_{mp_{stc}} \cdot I_{sc_{stc}}(1 + (\alpha + \beta_{V_{MP}}) \cdot \Delta T) \quad (27)$$

Os valores dos coeficientes térmicos variam de acordo com a tecnologia de construção da célula solar e são fornecidos pelos fabricantes nos dados técnicos de cada unidade.

A temperatura de operação do módulo pode ser calculada de acordo com Freitas (2008) de forma simplificada pela equação 28.

$$T_{mod} = T_{amb} + \left(\frac{T_{NOCT} - 20^\circ}{800} \right) \times (219 + 823K_t) \quad (28)$$

Em que: T_{mod} é a temperatura do módulo em °C, T_{amb} é a temperatura ambiente em °C, K_t é o índice de claridade. A equação 28 não leva em consideração as condições do ambiente em que o painel está inserido, logo pode ter erros significativos.

A temperatura do módulo é calculada com base na temperatura nominal de operação da célula (NOCT). Essa temperatura é obtida através de ensaios normalizados realizados fora das condições padrão de ensaio (STC), com irradiância incidente no módulo de 800 W/m², temperatura do ar a 20°C e velocidade do vento de 1 m/s. A T_{NOCT} está ligada às propriedades térmicas e ópticas dos materiais utilizados na construção dos módulos e é fornecida pelos fabricantes.

2.3.6.3 Sombreamento

O efeito da projeção de sombras sobre os sistemas fotovoltaicos, de acordo com GreenPro (2014), causa perdas de energia muito maiores que nos sistemas solares térmicos, e podem ser de 5 a 10% da energia produzida anualmente. O sombreamento pode ser classificado quanto à causa: o sombreamento temporário resulta da presença de pó, neve, folhas, dejetos de animais entre outros tipos de sujeiras na superfície do módulo fotovoltaico e pode ser reduzido devido ao sistema de auto limpeza dos painéis com a água da chuva ou através da limpeza manual; o sombreamento produzido pelo edifício que envolvem sombras constantes de chaminés, antenas saliências do telhado, entre outros. Alguns sombreamentos podem ser evitados deslocando o gerador ou o objeto que causa a sombra; o sombreamento causado pela localização compreende todo o sombreamento produzido pela envolvente do edifício, como por exemplo, construções vizinhas e árvores.

2.3.7 Tecnologias e materiais de construção

Os painéis fotovoltaicos oferecem uma solução prática e sustentável para satisfazer o aumento na procura global de energia elétrica. Os recentes avanços no desenvolvimento dos materiais fotovoltaicos permitem o contínuo aumento da eficiência e a diminuição do preço dos módulos, possibilitando o maior acesso a esse tipo de tecnologia, Polman et al. (2016). A seguir, será realizada uma breve apresentação das tecnologias e materiais mais comuns na construção de painéis fotovoltaicos.

2.3.7.1 Silício cristalino

Atualmente, o mercado de painéis fotovoltaicos é dominado pelos módulos de silício cristalino (90%) onde aproximadamente 65% são de silício monocristalino e os outros 35% são de silício policristalino. Essa tecnologia já é considerada madura no mercado e oferece alta confiabilidade e baixa degradação de eficiência em um período de até 25 anos de utilização. Devido ao processo de fabrico, os módulos de silício policristalino possuem qualidades elétricas menores que as de silício monocristalino, isso ocorre principalmente devido à maior quantidade de impurezas nas células policristalinas, por outro lado, o custo de fabrico das células é menor. A eficiência dos módulos pode ser de 22,4 % para o silício monocristalino e a 18,5% para o silício policristalino, (Polman et al., 2016).

De acordo com Goswami (2015) a produção de módulos de silício cristalino segue, de maneira simplificada, a seguinte série de processos. Primeiramente são fabricados lingotes de silício monocristalino ou barras retangulares de silício policristalinos, tanto os lingotes quanto as barras são dopadas com boro (junção *p*). Após esse processo, os lingotes e as barras retangulares são cortadas em fatias e sofrem dopagem de fósforo (junção *n*) formando assim a junção *pn*. Após a dopagem são colocados os contactos elétricos para captação da energia gerada e ocorre a aplicação de uma camada antirreflexo, para melhorar o desempenho da célula. Por último, a célula é encapsulada num material transparente e conectada a outras células para formar os

módulos. O processo detalhado de fabrico das células de silício pode ser encontrado no livro *Principles of Solar Engineering* de Goswami (2015).

2.3.7.2 *Filme fino*

Os painéis fotovoltaicos de filme fino são a segunda geração da tecnologia fotovoltaica e suas células solares possuem espessura muito menor do que as produzidas a partir do silício cristalino. Devido à reduzida espessura, as células de filme fino necessitam de materiais de apoio para lhes conferir resistência mecânica, os comumente utilizados são: vidro, aço inox e folhas de polímeros, com isso é possível fabricar células flexíveis. Nas células solares de filme fino as camadas semicondutoras são intercaladas entre uma camada de óxido condutor transparente e o contacto elétrico traseiro, também é adicionado na parte de trás da célula um refletor com o propósito de minimizar as perdas de calor. A tecnologia da segunda geração, de um modo geral, possui eficiência menor que as de silício cristalino, contudo, é esperado que seu custo de produção se torne inferior aos da primeira geração, compensando a menor eficiência, (Jäger, Isabella, Smets, van Swaaij, & Zeman, 2014).

De acordo com Polman et al. (2016) os semicondutores mais comuns utilizados são o CGIS, o CdTe e o Si. O CGIS é produzido a partir dos componentes químicos Cobre (Cu), Índio (In), Gálio (Ga), Selénio (Se) e Enxofre (S) e os módulos possuem eficiência até 17,5%. Os módulos produzidos a partir de CdTe (Cádmio e Telúrio) possuem eficiência até 18,6% e apesar de ser o semicondutor mais comum nos painéis de filme fino possui os problemas da toxicidade do Cádmio e de escassez de Telúrio. A construção de painéis fotovoltaicos de filme fino a partir de Silício, ainda, é realizada em menor escala e seu desenvolvimento diminuiu nos anos recentes, e a sua eficiência é de apenas 12,2%.

O processo de fabrico das células fotovoltaicas de filme fino pode ser encontrado no livro *Solar Energy: Fundamentals, Technology and Systems* de Jäger et al. (2014).

2.3.7.3 *GaAs e Multijunção*

Os módulos fotovoltaicos produzidos a partir de GaAs (Gálio e Arsénio) possuem o recorde de eficiência entre os painéis fotovoltaicos, 24,1%. Considerada uma

tecnologia cara, a sua utilização abrange mercados em que é necessária grande eficiência numa pequena área, como o caso das tecnologias espaciais. É esperado que, com o desenvolvimento da tecnologia, o custo de fabrico desses painéis diminua, podendo assim ser usados em aplicações mais abrangentes, (Polman, Knight, Garnett, Ehrler, & Sinke, 2016).

A junção de um ou mais semicondutores numa célula fotovoltaica é chamada, segundo Jäger et al. (2014), de células fotovoltaicas multijunção. Essa tecnologia ainda é tema de estudos em centros de pesquisa e sua produção industrial só é viável economicamente para utilização em aplicações espaciais. Como o custo de produção é muito alto, podem ser utilizados concentradores solares, que convergem a irradiação de uma grande área para uma área menor, aumentando assim a tensão de circuito aberta. No caso do painel possuir concentrador solar é necessário a utilização de sistemas de resfriamento das células para diminuir as perdas devido ao aumento da temperatura. O recorde de eficiência em laboratório para painéis de multijunção é de 44% e os semicondutores mais utilizados são GaInP/GaAs/GaInNAs e GaInP/GaInAs/Ge. Informações sobre o processo de fabrico das células fotovoltaicas multijunção podem ser encontradas no Solar Energy: Fundamentals, Technology and Systems de Jäger et al. (2014).

2.3.8 Sistemas fotovoltaicos

Um sistema fotovoltaico possui diferentes componentes além dos painéis fotovoltaicos e a sua aplicação pode ser desde simples tarefas como alimentar eletricamente uma bomba de água, como mais complexas, como por exemplo fornecer energia para uma casa inteira ou produzir energia em campos fotovoltaicos. De acordo com Jäger et al. (2014), podemos dividir os sistemas fotovoltaicos em três principais categorias: sistemas stand-alone, sistemas ligados a rede e sistemas híbridos. As três categorias serão abordadas a seguir de acordo com Jäger et al. (2014).

2.3.8.1 Tipos de sistemas fotovoltaicos

Os sistemas stand-alone ou não ligados à rede dependem apenas da energia gerada pelos painéis solares e podem possuir apenas o painel solar que supre as necessidades energéticas ou podem possuir baterias para armazenar energia. Quando o sistema possui baterias, é necessário a utilização do regulador de cargas para evitar que a bateria tenha carga menor do que a determinada pelo fabricante ou que desligue o sistema quando ela estiver totalmente carregada. Além disso, pode ser necessário a utilização de um inversor de corrente, conforme a utilização, para converter a corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). A figura 18 mostra o esquema de um sistema fotovoltaico não conectado à rede.

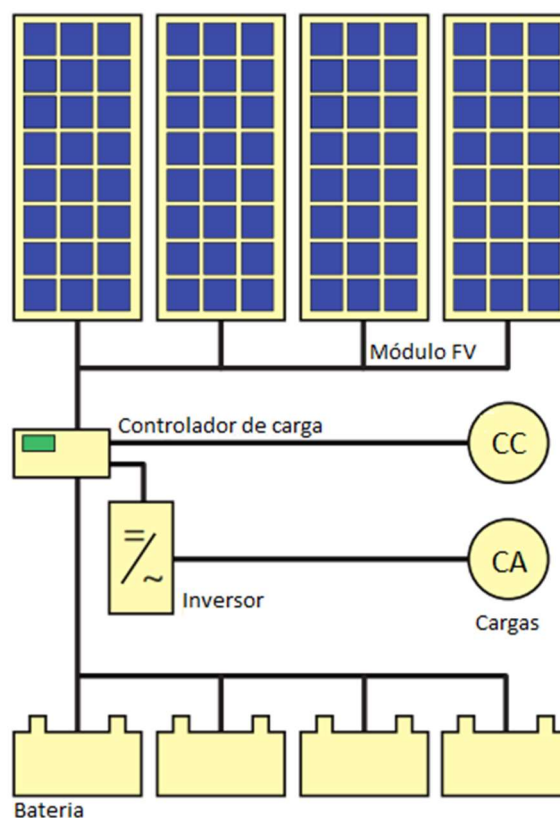


Figura 18 – Sistema fotovoltaico não conectado à rede elétrica (stand-alone).
Fonte: adaptado de Goswami (2015)

Os sistemas ligados à rede, como ilustrado na figura 19, são conectados à rede elétrica através dos inversores de corrente e, portanto, não possuem baterias. Esses sistemas vêm ganhando popularidade na aplicação em equipamentos e para utilização em

residências. Os painéis fotovoltaicos são conectados ao inversor de corrente que, por sua vez, é conectado ao quadro elétrico da residência ou do equipamento. A energia excedente é transferida para rede de distribuição de eletricidade. Os sistemas ligados à rede elétrica são utilizados também nos campos solares fotovoltaicos, onde uma grande quantidade de painéis gera energia elétrica para suprir as necessidades da rede.

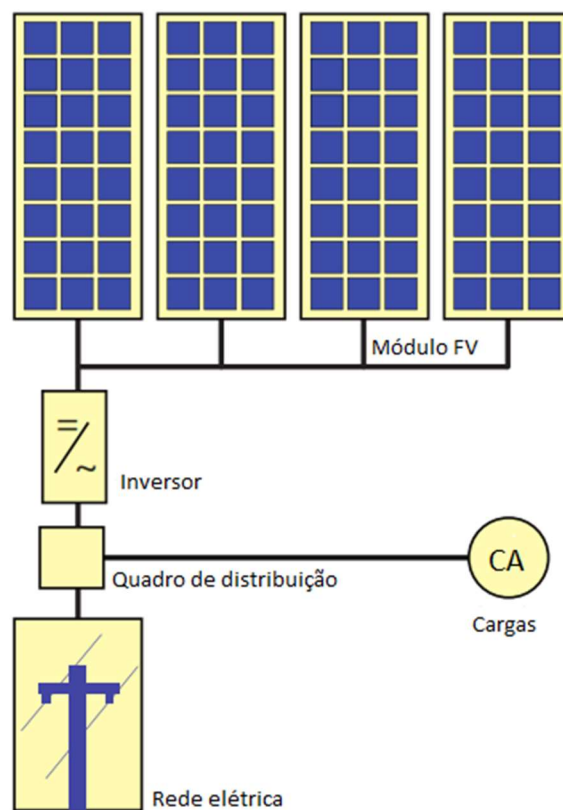


Figura 19 – Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.
Fonte: adaptado de Goswami (2015)

Os sistemas híbridos consistem na combinação de sistemas fotovoltaicos com outros sistemas de geração de energia elétrica, como geradores movidos a combustíveis fósseis ou turbinas eólicas. A junção de dois sistemas diferentes faz com que os controles necessários sejam mais complexos, uma vez que é necessário garantir que um sistema esteja disponível quando o outro não estiver.

2.3.8.2 Componentes

Além dos painéis fotovoltaicos os sistemas solares fotovoltaicos possuem outros componentes que variam de acordo com a utilização do sistema. Os principais componentes de um sistema solar fotovoltaico, de acordo com Jäger (2014), são o inversor de corrente, a bateria, o controlador de carga, os cabos e a estrutura de montagem. Cada um desses componentes será seguidamente abordado.

2.3.8.2.1 Inversor

De acordo com Pinho e Galdino (2014), um inversor de corrente elétrica é um dispositivo eletrônico que converte corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). A corrente contínua pode ser proveniente de módulos fotovoltaicos, baterias ou geradores a combustíveis. Um inversor ideal deve fornecer a potência máxima do sistema fotovoltaico ao sistema a que está ligado e a tensão de saída deve ser regulada de acordo com a necessidade, tanto nos casos de sistemas stand-alone quanto em sistemas conectados à rede.

Os inversores de corrente devem possuir as seguintes características, de acordo com Jäger et al. (2014): devem ser de alta eficiência para entregar a maior quantidade de energia possível, possuir proteções contra humidade e altas temperaturas, ter funcionamento silencioso, possuir sistemas de segurança e estar de acordo com as leis de interferência magnética e baixos limites para harmônicos de linhas de corrente.

Ainda segundo Jäger et al (2014), os inversores podem ser monofásicos, que são comuns em sistemas com baixa potência ou trifásicos, que são comuns em sistemas de alta potência e podem ser instalados com diferentes arquiteturas como esquematizado na figura 20.

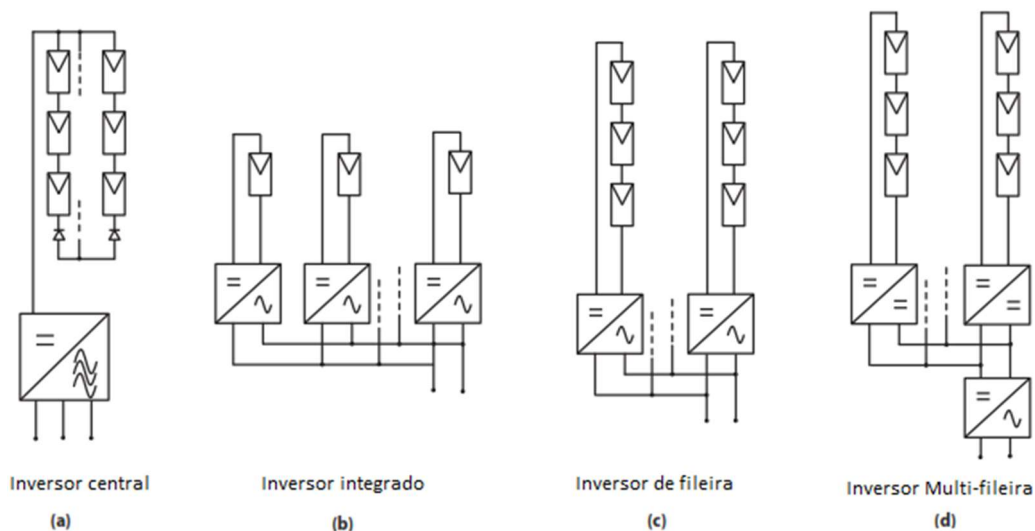


Figura 20 – Modos de utilização dos inversores em sistemas fotovoltaicos.

Fonte: adaptado de Jäger et al. (2014)

Os inversores centrais (figura 20 a) possuem a arquitetura mais simples empregada nos sistemas fotovoltaicos. Os módulos são conectados em fileiras que por sua vez são ligados em paralelo, que são conectados ao inversor central. Esse tipo de configuração geralmente é utilizado em produções fotovoltaicas de larga escala e o inversor é trifásico. Os inversores integrados no módulo (figura 20 b) operam diretamente conectados a um ou mais painéis fotovoltaicos e possuem potências menores que os inversores centrais. Esse sistema é conhecido como painéis de corrente CA e possui grande capacidade de expansão. Os inversores de fileiras (figura 20 c) combinam as vantagens dos inversores centrais com os integrados, os módulos fotovoltaicos são conectados em fileiras, cada fileira é conectada a um inversor diferente. Esse tipo de configuração é geralmente utilizado em aplicações residenciais e em edifícios comerciais, para isso, são necessárias interligações entre os inversores para garantir a corrente e a tensão adequada à instalação. Os inversores Multi-fileiras (figura 20 d) foram desenvolvidos para combinar a vantagem do maior rendimento energético dos inversores centrais com o baixo custo dos inversores de fileira. Conversores CC-CC são conectados as fileiras de módulos fotovoltaicos que por sua vez são conectados aos inversores CC-AC, para expandir o sistema é necessário apenas adicionar mais uma fileira de módulos conectadas ao conversor CC-CC (transforma a variação da voltagem dos painéis em voltagem estável) e são adequados a instalações em que as fileiras de módulo estão sujeitas a condições de radiação diferentes.

2.3.8.2.2 Bateria

Baterias são dispositivos eletroquímicos que convertem energia química em elétrica e possuem a capacidade de serem recarregadas quando necessário. A bateria é um componente vital nos sistemas fotovoltaicos stand-alone, o armazenamento de energia nesse caso é importante devido a intermitência da geração de energia que pode acontecer devido a variação de irradiação durante o dia e ao longo do ano e, ainda, ao defasamento temporal entre as necessidades e a disponibilidade de radiação. A bateria de chumbo-ácido, é a tecnologia mais antiga e mais madura disponível no mercado e é a principal escolha para os sistemas fotovoltaicos devido à sua relação custo/benefício. Apesar de possuir o melhor custo/benefício, as baterias de chumbo-ácido possuem o inconveniente de serem maiores e mais pesadas, quando comparadas com baterias com a mesma capacidade de carga de outras tecnologias e também sofrem envelhecimento, ou seja, perda da capacidade de armazenamento durante sua vida útil (Jäger et al. 2014).

As baterias, segundo Jäger et al. (2014), podem ser caracterizadas a partir dos seguintes parâmetros: a voltagem nominal que uma bateria deve operar, geralmente, as baterias para sistemas fotovoltaicos possuem 12 V, 24 V ou 48 V. A capacidade da bateria, medida em ampere-hora (Ah), é a quantidade de carga que a bateria pode fornecer a determinada voltagem, se multiplicado pela voltagem nominal obtém-se a quantidade de energia da bateria em watt-hora (Wh). A taxa de descarga, ou C-rate, é a medida da taxa de descarga da bateria em relação à sua capacidade de carga e em geral pode-se dizer que uma taxa de descarga n corresponde à descarga total da bateria em $1/n$ horas independente da sua capacidade. Outro parâmetro importante para o projeto de um sistema fotovoltaico é a eficiência energética da bateria que é a razão entre a energia que sai da bateria e a energia que entra na bateria quando está sendo carregada. A profundidade de descarga é, em percentagem, o quanto da capacidade nominal foi retirado em relação ao estado inicial da bateria e é complementar ao estado de carga. A profundidade de descarga é limitada pelos fabricantes para aumentar a vida útil das baterias. Por último, o ciclo de vida da bateria, que representa o número de vezes que a bateria pode ser carregada e descarregada até que sua capacidade de carga se reduza a 80% do valor nominal.

2.3.8.2.3 Controlador de carga

Os controladores de carga são dispositivos utilizados em sistemas fotovoltaicos que possuem baterias para controlar a corrente e a voltagem entre o painel fotovoltaico e a bateria, garantindo que os parâmetros elétricos da bateria sejam os mesmos indicados pelos fabricantes. Este equipamento deve ser utilizado devido à importância de carregar e descarregar a bateria na voltagem e corrente adequada afim de aumentar a vida útil. Os controladores de carga também possuem a função de evitar que energia seja enviada à bateria quando sua carga estiver completa e evitar que a bateria tenha descargas maiores do que a indicada pelo fabricante (Jäger et al. 2014).

2.3.8.2.4 Cabos

O desempenho do sistema fotovoltaico, segundo Jäger et al (2014), é fortemente influenciado pela seleção dos cabos, que devem ser dimensionados para que as perdas resistivas sejam mínimas. Os cabos do circuito de corrente contínua devem ser mais espessos que os cabos do sistema de corrente alternada devido a corrente elétrica ser maior. Os materiais mais comuns utilizados são cobre e alumínio e as cores dos cabos seguem um padrão definido por norma, para os sistemas de corrente contínua utilizam-se cabos vermelhos para contactos positivos e cabos pretos para os contactos negativos. Já para os cabos dos sistemas de corrente alternada, na europa, são azuis para o contacto neutro, verde-amarelo para a ligação terra e castanho (ou outra cor) para a fase.

2.3.8.2.5 Suportes dos painéis fotovoltaicos

De acordo com Wenham et al. (2007), o sistema de montagem dos painéis fotovoltaicos terá influência direta na energia produzida, no capital de investimento e na manutenção do sistema. Os suportes podem ser montados no chão, em telhados e até em postes e variam de acordo com os eixos de movimento. Os mais comuns e mais baratos são os suportes de ângulo fixo, ou seja, o painel é montado no ângulo ótimo para cada região. Outro tipo de suporte é aquele em que o ângulo de incidência pode

ser alterado manualmente de acordo com a estação do ano, seu custo não influencia de forma significativa o custo final da instalação e o ganho de energia pode chegar a 5% ao ano. Existem ainda suportes com sistemas seguidores do sol e que podem ter movimento num ou dois eixos. Os que acompanham num único eixo se ajustam em intervalos de tempo de hora em hora, ou mais frequentemente, e seguem o sol do Leste para o Oeste. Já os que possuem movimentos em dois eixos, acompanham o sol tanto de Leste para Oeste, quanto de Norte para o Sul. Apesar dos sistemas seguidores do sol aumentarem de forma significativa a produção de energia, o custo ainda é elevado e a manutenção é mais recorrente, dessa forma, a utilização desses sistemas deve ser avaliada projeto a projeto.

2.3.9 Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos

O dimensionamento de um sistema fotovoltaico pode ser realizado, segundo Goswami (2015) seguindo três passos. Primeiro é necessário estimar as necessidades em energia elétrica do edifício ou do equipamento em questão em que se irá instalar o sistema fotovoltaico, o segundo passo é realizar a avaliação do recurso solar disponível na região e por último dimensionar os painéis fotovoltaicos e demais componentes, de acordo com a aplicação do projeto.

Em Portugal, de acordo com o Despacho n.º 3156/2016 da Direção-Geral de Energia e Geologia, no âmbito do Sistema de Certificação energética de Edifícios (Decreto-Lei n.º 118/2013), para sistemas solares fotovoltaicos a energia produzida deve ser determinada com a versão em vigor do programa SCE.ER da DGEG ou de outra ferramenta que utilize metodologia de cálculo equivalente e devidamente validada.

2.3.9.1 Procura e consumo de energia elétrica

A maneira mais tradicional de se realizar o levantamento das necessidades em energia elétrica, segundo Pinho e Galdino (2014), é somar a energia elétrica consumida por cada equipamento. Para obter os dados diários de energia consumida em Wh/dia, como exemplificado na tabela 2, são listados os equipamentos e suas respectivas potências elétricas e tempo de funcionamento além dos dias de utilização na semana.

O cálculo do consumo diário de cada equipamento é realizado através da multiplicação da potência em (W) pelo número de horas de utilização por dia. O cálculo do consumo diário médio semanal é realizado através da multiplicação do consumo diário pelo número de dias de utilização por semana dividido pelo número total de dias da semana. O consumo diário total em Wh/dia é obtido através da soma do consumo diário em Wh de cada equipamento, e o mesmo acontece para o consumo total diário médio semanal.

Tabela 2 – Exemplo de cálculo do consumo diário e diário médio semanal.
Fonte: adaptado de Pinho & Galdino (2014)

Equipamento	Potência (W)	Horas de utilização por dia	Consumo diário (Wh)	Dias de utilização por semana	Consumo diário médio semanal (Wh)
Equipamento 1	15	3	45	4/7	25,71
Equipamento 2	60	2	120	2/7	34,29
Equipamento 3	100	1,5	150	7/7	150,00
Potencia total (W)	175	Consumo diário total (Wh/dia)	315	Consumo diário médio semanal total (Wh/dia)	210,00

Segundo Pinho e Galdino (2014) um fator a ser observado é o tipo de alimentação dos equipamentos, se em corrente contínua (CC) ou corrente alternada (CA). No caso de haver as duas correntes, o cálculo deve ser realizado separadamente para cada tipo. A potência de cada equipamento deve ser obtida através do manual técnico fornecido pelo fabricante. Outro fator importante na realização do levantamento do consumo elétrico é a obtenção da curva de carga, que pode ser diária, semanal, mensal ou anual. A curva de carga, figura 21, é a curva característica de consumo ao longo do tempo e representa o consumo energético ao longo de um determinado período.

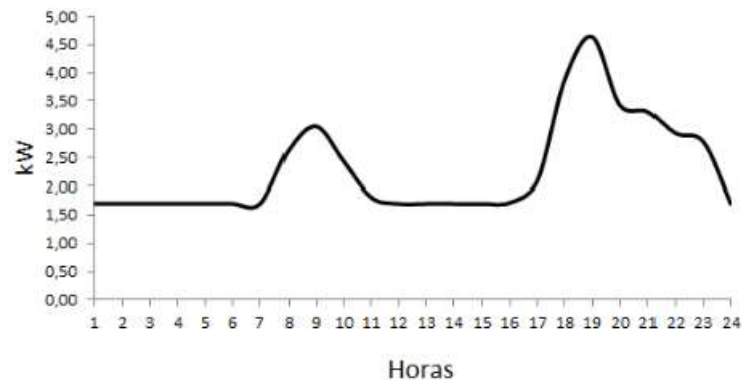


Figura 21 – Exemplo de curva de carga.
Fonte: Adaptado de Pinho & Galdino (2014)

A partir da curva de carga é possível identificar possíveis sazonalidades, reduzindo assim o risco de falta energia elétrica no sistema.

De acordo com Goswami (2015), a estimativa precisa das cargas energéticas necessárias é importante para os sistemas fotovoltaicos, uma vez que o sistema deve ser dimensionado para satisfazer as necessidades ao longo do dia, levando em consideração o maior pico de potência utilizada.

2.3.9.2 Avaliação do recurso solar

A estimativa da radiação solar disponível no painel solar fotovoltaico pode ser calculada com o método descrito na seção 2.2, através da energia solar diária média mensal incidente sobre um plano inclinado relativamente à horizontal, I_{β}^{dm} (equação 7).

2.3.9.3 Dimensionamento de um sistema conectado à rede

O dimensionamento de um sistema fotovoltaico conectado à rede, de acordo com GreenPro (2004), segue as seguintes etapas: Seleção do módulo e concepção do sistema fotovoltaico, dimensionamento do inversor, dimensionamento dos cabos e a estimativa de produção de energia. Cada uma das etapas será abordada a seguir, de acordo com o apresentado por GreenPro (2004).

2.3.9.3.1 Seleção do módulo e concepção do sistema fotovoltaico

Além da potência requerida pelo sistema, deve-se levar em consideração o tipo de material do painel fotovoltaico, a estrutura de suporte mais adequada, os custos do painel, a orientação, a existência de sombreamento e a área disponível para instalação. Com base nessas condições, é selecionado o módulo fotovoltaico e a partir das suas especificações técnicas serão definidos os próximos passos do dimensionamento do sistema. É nessa etapa em que se deve escolher a configuração do sistema, se serão utilizados inversores centrais, de fileira ou de módulos.

2.3.9.3.2 Dimensionamento do inversor

A partir da configuração do sistema determina-se o número, o nível de tensão e a potência dos inversores utilizados, para isso, é fundamental que as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante sejam respeitadas.

A seleção da potência do inversor é realizada através da razão entre as potências do gerador fotovoltaico e do inversor, numa razão de 1:1. Qualquer desvio dessa razão deverá estar presente no seguinte intervalo de potência.

$$0,7P_{FV} < P_{max}^{INV} < 1,2P_{FV} \quad (29)$$

Onde P_{FV} é a potência máxima nominal do módulo fotovoltaico e P_{max}^{INV} é a potência em CC máxima nominal do inversor.

De um modo geral, é favorável a escolha de um inversor com potência um pouco abaixo da potência do gerador fotovoltaico, dado que a eficiência do inversor é relativamente baixa para as potências inferiores a 10% da potência nominal. Como a irradiação solar dificilmente é superior a 850 W/m^2 , o inversor é subdimensionado com o intuito de manter os elevados níveis de eficiência mesmo para baixos níveis de irradiação solar. Além da radiação, outros fatores que influenciam a potência dos geradores e por consequência o inversor são: má orientação, sombreamento e aumento da temperatura devido ao déficit de ventilação nos módulos fotovoltaicos.

A amplitude de tensão num inversor é o resultado da soma das tensões individuais de cada módulo ligado em série numa fileira. Como as tensões do módulo, e por consequência do sistema dependem da temperatura, as situações extremas de inverno e verão são determinantes para o dimensionamento do número máximo e mínimo de inversores por fileira.

O número máximo (N_{max}) de módulos fotovoltaicos que podem ser conectados em série é calculado através da equação 30, onde V_{maxINV} é a tensão máxima nominal do inversor e $V_{oc_{-10^{\circ}C}}$ é a tensão de circuito aberto do painel fotovoltaico para uma temperatura de $-10^{\circ}C$.

$$N_{max} = \frac{V_{maxINV}}{V_{oc_{-10^{\circ}C}}} \quad (30)$$

A $V_{oc_{-10^{\circ}C}}$ é calculada pela equação 31 no caso de β ser dado em $\%/^{\circ}C$ e equação 32 no caso de β ser dado em $mV/^{\circ}C$, ambas derivadas da equação 25.

$$V_{oc_{-10^{\circ}C}} = \left(1 + \frac{35^{\circ}C \times \beta}{100}\right) V_{oc_{STC}} \quad (31)$$

$$V_{oc_{-10^{\circ}C}} = -35^{\circ}C \times V_{oc_{STC}} \quad (32)$$

Em que β é a variação da tensão de circuito aberto com a temperatura e possui valor negativo.

O número mínimo (N_{min}) de módulos fotovoltaicos que podem ser conectados em série é calculado através da equação 33, onde $V_{MP_{INVmin}}$ é a tensão de máxima potência mínima do inversor e $V_{MP_{70^{\circ}C}}$ é a tensão de máxima potência do painel fotovoltaico para uma temperatura de $70^{\circ}C$.

$$N_{min} = \frac{V_{MP_{INVmin}}}{V_{MP_{70^{\circ}C}}} \quad (33)$$

A $V_{MP_{70^{\circ}C}}$ é calculada pela equação 34 no caso de β ser dado em $\%/^{\circ}C$ e equação 35 no caso de β ser dado em $mV/^{\circ}C$, ambas derivadas da equação 25.

$$V_{MP70^{\circ}C} = \left(1 + \frac{45^{\circ}C \times \beta}{100}\right) V_{MPSTC} \quad (34)$$

$$V_{MP70^{\circ}C} = V_{MPSTC} + 35^{\circ}C \times \beta \quad (35)$$

Para finalizar o dimensionamento do inversor é necessário verificar se a corrente do painel fotovoltaico ultrapassa o limite máximo da corrente de entrada do inversor. Através da equação 36 calcula-se o número máximo de fileiras ($N_{Fileira}$) de módulos, onde I_{maxINV} é o valor máximo de corrente do inversor e $I_{nFileira}$ é a corrente da fileira de módulos.

$$N_{Fileira} = \frac{I_{maxINV}}{I_{nFileira}} \quad (36)$$

2.3.9.3.3 Dimensionamento dos cabos elétricos

A primeira etapa no dimensionamento é determinar o comprimento aproximado de cada cabo. Feito isso, devem ser levados em conta três critérios: o cumprimento dos limites fixados pela tensão nominal e pela intensidade de corrente máxima admissível do cabo e a minimização das perdas da linha.

A tensão nominal do cabo elétrico deve ser comparada com a tensão de circuito aberto do módulo fotovoltaico para a temperatura de $-10^{\circ}C$ nos sistemas compostos por longas fileiras de módulos, para os sistemas de pequena geração, a tensão normalmente não ultrapassa a tensão nominal dos cabos standard. A secção transversal do cabo é dimensionada a partir da corrente máxima que atravessa o cabo, de acordo com a norma europeia International Electrotechnical Commission (IEC) 60364-7-712 apud GreenPro (2004), o cabo da fileira de módulos deve ser capaz de suportar 1,25 vezes a corrente de circuito aberto do módulo fotovoltaico ($I_{nFileira} = 1,25I_{SC}$) e deve estar protegido contra falhas e curto-circuitos.

Os fusíveis de proteção são distribuídos ao longo das fileiras e a corrente nominal do aparelho de proteção deve ser pelo menos 1,25 vezes maior que a corrente nominal da fileira ($I_{nFusivel} \geq 1,25 I_{nFileira}$). De acordo com a norma IEC 60364-7-712 deve-se instalar um interruptor de corte geral antes do inversor.

A redução das perdas nos cabos é definida pela norma alemã, adaptada em Portugal, VDE 0100 Parte 712 (1998) apud GreenPro (2004). No lado de corrente contínua do sistema a norma sugere que a queda de tensão máxima admissível no circuito não deve ser superior a 1% da tensão nominal do sistema fotovoltaico para as condições de STC. Este critério determina que se limite a 1% as perdas de potência nos cabos CC do sistema. No lado de corrente alternada do sistema, a queda de tensão máxima admissível na linha é de 3% relativamente à tensão nominal da rede.

A equação 37 permite calcular a secção transversal dos cabos de fileira (S_{Fi}), que estabelecem as ligações elétricas entre os módulos na mesma fileira.

$$S_{Fi} = \frac{2L_{fi}I_{fileira}}{1\%V_{MPP}\kappa} \quad (37)$$

Onde L_{fi} é o comprimento do cabo, $I_{fileira}$ é a corrente da fileira, V_{MPP} é a tensão de máxima potência da fileira e κ é a condutividade elétrica do material.

A secção transversal dos cabos de corrente contínua S_{CC} e de corrente alternada do sistema monofásico $S_{CA(mono)}$ pode ser calculada pelas equações 38 e 39 respetivamente.

$$S_{CC} = \frac{2L_{CC}I_{n\ ger}^2}{(FP \times P_{FV} - P_M)\kappa} \quad (38)$$

$$S_{CA(mono)} = \frac{2L_{CA}I_{n\ inv(CA)}\cos\varphi}{3\%V_n\kappa} \quad (39)$$

Onde L_{CC} é o comprimento do cabo de corrente contínua, $I_{n\ ger}$ é a corrente nominal do gerador, FP é o fator de perdas (1% ou 2% para tensões reduzidas), P_{FV} é a potência nominal do gerador fotovoltaico, P_M são as perdas na linha (1%), L_{CA} é o comprimento do cabo de corrente alternada, $I_{n\ inv(CA)}$ é a corrente nominal do inversor em CA, $\cos\varphi$ é o fator de potência (entre 0.8 e 1), V_n é a tensão nominal da rede e κ é a condutividade elétrica do material.

Tanto na secção transversal dos cabos CC, quanto dos cabos CA os valores obtidos devem ser arredondados para o maior valor aproximado das secções nominais dos cabos Standard.

2.3.9.3.4 Estimativa da produção de energia

Com os componentes do sistema escolhidos e dimensionados e com a irradiação incidente no módulo fotovoltaico é possível estimar a produção de energia ideal e a real diária (dia típico de um determinado mês). A energia idealmente produzida pelo módulo fotovoltaico (E_{ideal}^{dia}) é a energia teoricamente expectável e pode ser obtida através da equação 40.

$$E_{ideal}^{dia} = F_T P_{MP} H_s \quad (40)$$

Onde P_{MP} é a potência máxima do módulo, H_s é o número de horas de sol equivalente e pode ser calculado pela equação 41 e F_T é o fator de correção de temperatura e é calculado pela equação 42.

$$H_s = \frac{I_\beta (Wh/m^2)}{G_{stc} (W/m^2)} \quad (41)$$

$$F_T = 1 + \frac{\gamma(T_{mod} - 25^\circ C)}{100} \quad (42)$$

Onde I_β é a irradiação incidente sobre um plano inclinado, G_{stc} é a radiação global incidente de acordo com a STC e assume o valor de $1000 W/m^2$, γ é a variação da potência de acordo com a temperatura e T_{mod} é a temperatura do módulo calculada pela equação 28.

Como o sistema fotovoltaico não é composto apenas pelos módulos fotovoltaicos, é necessário contabilizar as perdas energéticas devido ao inversor e aos cabos. Desse modo, a energia real produzida pelo sistema fotovoltaico é calculada pela equação 43.

$$E_{real}^{dia} = F_T P_{MP} H_s PR \quad (43)$$

Onde $PR = \eta_{inv}F_c$ é o índice de desempenho (do inglês: performance ratio) do sistema, que depende principalmente da eficiência do inversor (η_{inv}) e das perdas de energia devido aos cabos ($F_c = 1 - Perdas_{Cab}$). A eficiência dos inversores é dada pelos fabricantes e é comum adotar o valor de 3% para as perdas energéticas devido aos cabos elétricos.

2.3.9.4 Dimensionamento de um sistema stand-alone

O dimensionamento de um sistema fotovoltaico stand-alone é realizado de acordo com os cálculos simplificados apresentados por Pereira (2013). A metodologia de cálculo é válida para casos de baixo e médio consumo, tanto residenciais quanto para edifícios de comércio ou equipamentos. Para casos de sistemas de grandes dimensões, estudos mais complexos devem ser realizados. Com as necessidades de energia e a irradiação disponível já mensuradas, o dimensionamento do sistema segue as seguintes etapas: cálculo das perdas existentes no sistema, cálculo da potência do sistema fotovoltaico, dimensionamento das baterias, dimensionamento do regulador de carga e o dimensionamento do inversor.

2.3.9.4.1 Perdas existentes no sistema

As perdas existentes no sistema fotovoltaico podem ocorrer nos cabos elétricos e no inversor. O fator de perda (F_c) nos sistemas autônomos devido aos cabos elétricos pode ser calculado pela equação 44. As perdas ($Perdas_{Cab}$) podem chegar a 3% nos sistemas stand-alone.

$$F_c = 1 - Perdas_{Cab} \quad (44)$$

Já a perda devido a conversão é dada por $F_{conv} = 1 - \eta_{conv}$, em que a eficiência de conversão do módulo fotovoltaico (η_{conv}) é fornecida pelo fabricante.

2.3.9.4.2 Potência do sistema fotovoltaico

Devido à diferença na irradiação disponível durante as estações do ano, é necessário determinar o número de sol equivalente para os meses de maior e menor irradiação. O H_s pode ser calculado através da equação 41. Através da equação 45, determina-se a potência do sistema fotovoltaico (P_{PV}).

$$P_{PV} = \frac{W_D}{F_c \times F_{conv} \times H_s} \quad (45)$$

Onde W_D é o consumo total diário de energia em Wh/dia

No caso de o sistema ser dimensionado para funcionar o ano inteiro, deve-se utilizar o valor de H_s para a estação de inverno, pois é a situação mais desfavorável à produção de energia. Ao optar pela estação de inverno, o sistema estará sobredimensionado para estação de maior produção de energia.

2.3.9.4.3 Dimensionamento da bateria

Para realizar o dimensionamento da bateria é necessário saber a corrente consumida diariamente (I_{sist}), a profundidade de descarga máxima da bateria ($K_{desc.}$) e a eficiência da bateria ($K_{bat.}$). Outro fator importante é o número de dias (N_D) em que o sistema deverá ser autônomo no caso de não haver produção solar suficiente. A capacidade de carga necessária das baterias então, pode ser dimensionada pela equação 46.

$$C_{Bat (Ah)} = \frac{I_{sist} \times N_D}{K_{bat.} \times K_{desc.}} \quad (46)$$

A partir da $C_{Bat (Ah)}$ é possível determinar o conjunto de baterias necessárias para que o sistema seja autônomo, para isso, deve-se utilizar os dados técnicos fornecidos pelos fabricantes. Em sistemas com potência do consumo menor que 1500 W se utiliza baterias de 12 V, em sistemas de 1500 W até 5000 W a tensão do sistema é de 24 V ou

48 V e para sistemas com potência maior que 5000 W utiliza-se tensões de 120 V ou 300 V.

Como a adição de baterias ao sistema o torna mais caro e aumenta a manutenção, não se deve sobre dimensionar o valor possível da carga armazenada na bateria.

2.3.9.4.4 Dimensionamento do regulador de carga

A escolha do regulador de carga deve ser feita com base no valor da corrente nominal do sistema ($I_{máx\ CC}$), que pode ser obtida pela equação 47.

$$I_{máx\ CC} = N_{fileiras} \times I_{fileira} \quad (47)$$

Onde $N_{fileiras}$ é o número de fileiras que o sistema possui e $I_{fileira}$ é a corrente nominal de cada fileira. O regulador de carga deve suportar uma corrente nominal acima da corrente nominal máxima do sistema.

2.3.9.4.5 Dimensionamento do inversor

A escolha do inversor para o sistema stand-alone deve partir do pressuposto que todos os equipamentos estão em funcionamento ao mesmo tempo. Para isso, utiliza-se a potência máxima do sistema, que é o somatório das potências de todos os equipamentos. A partir da potência e da tensão do sistema é realizada a escolha do inversor, de acordo com os dados técnicos fornecidos pelo fabricante.

Segundo GreenPro (2014), uma das tarefas mais importantes em se planejar um sistema stand-alone é equilibrar o consumo e a produção de energia. Os sistemas autônomos se tornam mais complexos quando há necessidade de fornecer energia ao longo de todo o ano, isso ocorre porque a radiação disponível no inverno é menor do que a radiação disponível no verão. O dimensionamento dos cabos elétricos para os sistemas stand-alone segue o mesmo raciocínio apresentado na secção 2.3.8.2.4.

2.3.10 Manutenção

Uma das grandes vantagens dos sistemas fotovoltaicos, de acordo com a Solar Terra, é que necessitam de pouca manutenção. O vidro de proteção existente na parte frontal do painel garante resistência contra choques mecânicos e devido ao ângulo de inclinação eles são auto limpantes. Contudo, é conveniente limpar a superfície frontal dos módulos sempre que haja acumulação de pó ou outras sujidades para evitar perda de eficiência. Deve-se verificar, anualmente, se as ligações elétricas estão bem ajustadas e se não há sinais de oxidação.

2.3.11 Autoconsumo

Em Portugal, o Decreto-Lei n° 153/2014 de 20 de outubro regulamenta o regime jurídico aplicável à produção de eletricidade destinada ao autoconsumo, com ou sem ligação à rede elétrica de serviço público (RESP) através de unidades de produção para autoconsumo (UPAC). A energia elétrica produzida para o autoconsumo deve ser predominantemente consumida na instalação associada à unidade de produção, podendo ser vendido o excedente à RESP. O produtor beneficia quando a unidade produtora é dimensionada para atender às necessidades de consumo da instalação.

De acordo com o Decreto-Lei n° 153/2014, as unidades de produção para autoconsumo com potência instalada superior a 1 MW necessitam de licença de produção e exploração. As UPAC com potência instalada superior a 200 W e igual ou inferior a 1,5 kW ou cujas unidades não estão ligadas à RESP estão, apenas, sujeitas a comunicação prévia de exploração dirigida à DGEG através do SERUP. As unidades ligadas à rede pública de serviço público com potência instalada igual ou inferior a 1,5 kW necessitam de registro prévio e de certificado de exploração. As UPAC cuja potência é igual ou inferior a 200 W estão isentas de controlo prévio.

2.3.12 Amortização de sistemas fotovoltaicos

O período de amortização, segundo Jäger (2014) é o tempo necessário para recuperar os custos de um investimento e pode ser calculado pela equação 48. Também

conhecido como “payback time”, o tempo de amortização de um sistema fotovoltaico é o período que leva para recuperar o custo do sistema com a diminuição dos gastos com a energia elétrica.

$$\text{Período de amortização} = \frac{\text{Investimento inicial}}{\text{retorno anual}} \quad (48)$$

De acordo com Jäger (2014), o período de amortização é extremamente influenciado pela radiação anual incidente no painel fotovoltaico, uma vez que a variação da radiação tem relação direta com a quantidade de energia produzida. Em geral, pode-se afirmar que lugares com maior incidência solar terão um período de amortização menor. Outros fatores que influenciam o “payback” é o custo da energia elétrica, quando maior o custo menor será o período de “payback”. A equação 48 é uma maneira simplificada de calcular o período de amortização e não leva em consideração fatores como a inflação monetária, políticas e subsídios em sistemas de energias renováveis.

2.4 Aquecimento, ventilação e ar condicionado em edifícios

Até a segunda Guerra Mundial, os sistemas de ar condicionado eram considerados apenas questões de luxo. Com o passar dos anos, os sistemas de climatização passaram a ser vistos pela praticidade em tornar as vidas mais saudáveis e produtivas, além de proporcionar conforto térmico. Percebeu-se que em condições de temperatura e humidade controladas em um espaço, as produções se tornaram mais eficazes devido ao melhor desempenho dos funcionários. Atualmente, grande parte das residências e dos edifícios de comércio possuem sistemas de tratamento de ar afim de melhorar o conforto e a qualidade do ar (McQuiston & Parker, 1994).

Até aos anos de 1970, de acordo com McQuiston & Parker (1994), a maioria dos sistemas de climatização não se preocupavam com os gastos de energia, uma vez que os combustíveis eram abundantes e baratos. Com a crise do petróleo e consequentemente o aumento no custo dos combustíveis, a busca por sistemas

energeticamente eficientes tornou-se uma prioridade. A eficiência energética aliada ao crescimento da importância do conforto e da qualidade do ar para a saúde e performance e o desenvolvimento da indústria eletrônica potenciaram o desenvolvimento de sistemas AVAC (Aquecimento, ventilação e ar condicionado) de alta tecnologia, eficiência e controle.

Ainda segundo McQuiston & Parker (1994), o termo ar condicionado durante muito tempo se referiu ao aquecimento ou arrefecimento do ar num determinado espaço. Nos tempos modernos, o termo passou a se referir ao controle da temperatura, humidade, pureza, qualidade e circulação do ar requerida pelos ocupantes, pelo processo ou pelo produto.

2.4.1 Conceitos fundamentais

Basicamente, os conceitos que abrangem o desenvolvimento de projetos AVAC estão relacionados com a termodinâmica, a mecânica dos fluidos e a transferência de calor. As funções mais importantes para realizar o tratamento do ar são: aquecimento, humidificação, arrefecimento, desumidificação, purificação e circulação do ar. Estas funções serão explicadas brevemente, de acordo com o apresentado por McQuiston & Parker (1994) para os sistemas AVAC.

Aquecimento: é a transferência de energia para o ar de um espaço através da diferença de temperatura da fonte de energia e do ar. Esse processo pode ser feito de diversas formas, como por exemplo: o aquecimento direto do ar circulado ou da circulação de água quente num permutador de calor. A transferência de calor aumenta a temperatura do ar e, também, é designada por transferência de calor sensível.

Humidificação (teórica): é a transferência de vapor de água para o ar atmosférico e ocorre através da transferência de calor latente, ou seja, não há mudança na temperatura do ar. O processo pode ocorrer através da introdução de vapor de água ou de um spray de gotículas de água.

Arrefecimento: é o contrário do processo de aquecimento, a transferência de calor ocorre do ar circulado para uma superfície mantida a uma baixa temperatura.

Desumidificação: é a remoção de vapor de água presente no ar. Geralmente esse processo ocorre com a circulação do ar sobre uma superfície com temperatura suficiente para causar a condensação do vapor de água presente no ar.

Purificação: é a remoção das impurezas do ar, quando não há gases contaminantes no ar exterior é realizada através da adição de ar novo no ambiente e da filtragem. Quando há gases contaminantes é necessário utilizar de técnicas como absorção ou adsorção.

Circulação do ar: é a movimentação do ar para garantir as condições de temperatura e renovação de ar necessárias. A circulação do ar ocorre do sistema AVAC para o ambiente a ser climatizado e vice-versa com velocidade controlada.

2.4.2 Qualidade do ar interior e Conforto térmico

De acordo com a ASHRAE Standard 55 apud McQuiston & Parker (1994), o conforto térmico é “o estado de espírito que expressa a satisfação do indivíduo com o ambiente térmico”. Num edifício, para haver conforto térmico, é necessário que 80% dos ocupantes não expressem insatisfação, uma pessoa saudável está em conforto térmico quando o seu corpo pode facilmente se manter em equilíbrio térmico com a vizinhança.

Ainda de acordo com a ASHRAE Standard 55 apud McQuiston & Parker (1994), são seis os fatores, divididos em duas classes, que influenciam o conforto térmico. Na classe dos parâmetros ambientais a temperatura, a humidade e a velocidade do ar, além da temperatura média radiante dos objetos têm influência no conforto térmico. Na classe dos parâmetros individuais, a atividade física desenvolvida e o vestuário têm influência no conforto térmico.

Manter a Qualidade do ar interior (QAI) significa ter o ar interior livre gases e partículas contaminantes (monóxido e dióxido de carbono, microrganismos, alergénicos, e etc.), em concentrações danosas para a saúde dos ocupantes e que a maioria das pessoas expostas não expresse insatisfação. O controlo adequado da temperatura, da humidade, da velocidade do ar, da temperatura das superfícies e dos contaminantes do ar garantem o conforto e a saúde dos ocupantes. A contaminação do ar interior pode ocorrer devido às atividades metabólicas dos ocupantes, pela liberação de

contaminantes pelo mobiliário e acessórios de decoração e pela insuflação do ar exterior contaminado (McQuiston & Parker, 1994).

De acordo com Roriz (2007), as preocupações energéticas levaram o aumento da estanquicidade dos novos edifícios. A redução das infiltrações, no entanto, faz com que o caudal de ar novo necessário para garantir as condições de conforto e qualidade de ar sejam maiores. Assim sendo, é necessário recorrer a ventilação mecânica para atingir as taxas de renovação de ar pretendidas. A não garantia da QAI pode resultar na síndrome do edifício doente, o ar se torna um meio de difusão de agentes alérgicos e patogénicos devido a ineficiência ou a não existência do sistema de filtragem.

Em Portugal, a Portaria n.º. 353-A/2013 de 4 de dezembro, tem como objetivo estabelecer os valores mínimos de caudal de ar novo interior para edifícios de comércio e serviços, bem como os limiares de proteção e as condições de referência para os poluentes. Para garantir os valores de caudal mínimo de ar novo exigidos pelo Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) é necessária a existência de soluções de ventilação, tanto natural, quanto mecânica que garantam a eficácia da remoção de poluentes na zona ocupada. A tabela 3 mostra os valores de eficácia (ϵ_v) para diferentes estratégias de ventilação.

Tabela 3 - Valores da eficácia para diferentes métodos de ventilação.
Fonte: Portaria n.º. 353-A/2013 de 4 de dezembro.

Configuração da distribuição de ar na zona	ϵ_v
Insuflação pelo teto, ar frio	1
Insuflação pelo teto e extração junto ao pavimento, ar quente	1
Insuflação pelo teto, de ar quente pelo menos 8°C acima da temperatura do local e extração/retorno pelo teto	0,8
Insuflação pelo teto, de ar quente pelo menos 8°C acima da temperatura do local e extração/retorno pelo teto, desde que o jato de ar de insuflação, tenha velocidade superior a 0,8m/s e alcance até 1,4m do pavimento (nota: para velocidades mais baixas, $\epsilon_v = 0,8$)	1
Insuflação de ar frio junto ao pavimento e extração/retorno junto ao teto, desde que o jato de ar de insuflação com uma velocidade de 0,8m/s, tenha um alcance de 1,4m ou mais, em relação ao pavimento.	1
Insuflação de ar frio a baixa velocidade junto ao pavimento e extração junto ao teto, numa estratégia de ventilação do tipo deslocamento, proporcione um fluxo unidirecional e estratificação térmica	1,2

Tabela 3 – Valores da eficácia para diferentes métodos de ventilação, continuação.
 Fonte: Portaria n°. 353-A/2013 de 4 de dezembro.

Configuração da distribuição de ar na zona	ϵ_v
Insuflação de ar quente junto ao pavimento e extração junto ao pavimento, no lado oposto do compartimento	1
Insuflação de ar quente junto ao pavimento e extração/retorno junto ao teto	0,7
Admissão natural de ar no lado oposto do compartimento em relação ao ponto de extração/retorno mecânica	0,8
Admissão natural de ar junto ao ponto de extração/retorno mecânica	0,5
Insuflação de ar quente junto ao pavimento e extração/retorno junto ao teto, no mesmo lado do compartimento ou em localização próxima	0,5
Insuflação de ar frio junto ao teto e extração/retorno junto ao pavimento, do mesmo lado do compartimento ou em localização próxima	0,5

O valor do caudal de ar novo corrigido pela eficácia (Q_{ANf}) em m³/h é calculado pela equação 49. Onde Q_{AN} é o valor do caudal de ar novo, em m³/h.

$$Q_{ANf} = \frac{Q_{AN}}{\epsilon_v} \quad (49)$$

De acordo com aquela, o Q_{AN} pode ser determinado através do método prescritivo, que garante a diluição da carga de poluentes devido ao número de ocupantes e sua atividade física e em relação ao próprio edifício e aos tipos de materiais de construção utilizados. O valor do caudal de ar novo mínimo devido aos ocupantes do edifício pode ser calculado pela equação 50, para diferentes taxas de metabolismo. Onde Q_{REF} é o caudal de ar novo de referência para diferentes taxas de metabolismo e N°_{ocup} é o número de ocupantes.

$$Q_{AN} = N^{\circ}_{ocup} Q_{REF} \quad (50)$$

Na tabela 4, estão presentes os valores do Q_{REF} determinado em função da carga de poluente devido à ocupação.

Tabela 4 – Caudal de ar novo determinado em função da taxa de metabolismo dos ocupantes.

Fonte: Portaria n°. 353-A/2013 de 4 de dezembro.

Tipo de atividade	Taxa de metabolismo dos ocupantes - M (met)	Exemplos de tipo de espaço	Caudal de ar novo [m ³ /(hora.pessoa)]
Sono	0,8	Quartos, Dormitórios e similares	16
Descanso	1,0	Salas de repouso, Salas de espera, Salas de conferências, Auditórios e similares, Bibliotecas.	20
Sedentária	1,2	Escritórios, Gabinetes, Secretarias, Salas de aula, Cinemas, Salas de espetáculo, Salas de Refeições, Lojas e similares, Museus e galerias, Salas de convívio, Salas de atividade de estabelecimentos de geriatria e similares.	24
		Salas de jardim de infância e pré-escolar e Salas de creche.	28
Moderada	1,75 (1,4 a 2,0)	Laboratórios, Ateliers, Salas de Desenho e Trabalhos Oficiais, Cafês, Bares, Salas de Jogos e similares.	35
Ligeiramente Alta	2,5 (2,0 a 3,0)	Pistas de dança, Salas em ginásios, Salas de ballet e similares	49
Alta	5,0 (3,0 a 9,0)	Salas de musculação, Salas em ginásios e pavilhões desportivos e similares	98

O valor do caudal de ar novo mínimo devido ao edifício pode ser calculado pela equação 51. Onde Q_{REF} é o caudal de ar novo de referência para a existência ou não de poluentes específicos e A é a área do edifício.

$$Q_{AN} = A \cdot Q_{REF} \quad (51)$$

Na tabela 5, estão presentes os valores do Q_{REF} determinado em função da carga de poluente devido ao edifício.

Tabela 5 – Caudal de ar novo determinado em função da carga poluente devida ao edifício.

Fonte: Portaria n°. 353-A/2013 de 4 de dezembro.

Situação do edifício	Caudal de ar novo [m ³ /(hora.m ²)]
Sem atividades que envolvam a emissão de poluentes específicos	3
Com atividades que envolvam a emissão de poluentes específicos	5

Realizados os cálculos pelos dois métodos, utiliza-se como critério de caudal mínimo de ar novo o maior valor entre eles.

Segundo a Portaria n°. 353-A/2013 de 4 de dezembro, excluem-se do cumprimento de valores de caudal mínimo de ar novo os espaços sem ocupação permanente ou espaços que são ocupados ocasionalmente e por períodos de tempo inferiores a duas horas por dia.

2.4.3 Sistemas AVAC

Um sistema AVAC, segundo ASHRAE Handbook (2012), mantém as condições necessárias num espaço através do controlo da temperatura, da humidade e da circulação do ar e, cada aplicação deve ser analisada de forma diferente, com o objetivo de utilizar a melhor solução para as atender os critérios do projeto. Além disso, na seleção dos equipamentos, deve-se levar em conta aspetos como a sustentabilidade do sistema e seu impacto ambiental.

Os sistemas AVAC podem ser classificados, de acordo com Roriz (2017), em função da área climatizada e em função do fluido de térmico como apresentado a seguir.

Em relação a área climatizada, o sistema pode ser centralizado ou descentralizado. Nos sistemas centralizados os equipamentos produtores de energia térmica estão, geralmente, dispostos num único lugar, a que apenas tem acesso os responsáveis técnicos do equipamento, e servem a totalidade do edifício. Já no sistema descentralizado, um conjunto de equipamentos atendem às necessidades do edifício. Por vezes a classificação de sistema semi-centralizado também é utilizada, esses sistemas conjugam os componentes do sistema centralizado com o descentralizado.

Em relação ao fluido térmico, pode ser classificado em: sistemas tudo-ar, ar-água e tudo-água. Nos sistemas tudo-ar, a climatização do local ocorre através do ar previamente aquecido ou arrefecido em unidades de tratamento de ar (UTAs), esses sistemas podem possuir uma conduta utilizada tanto para o ar quente como para o ar frio (não simultâneo) ou um sistema de dupla conduta onde em uma passa apenas ar frio e na outra apenas ar quente. Nos sistemas tudo-água, a climatização do espaço é realizada através da água previamente aquecida ou arrefecida, esses sistemas podem possuir 1 circuito (2 tubos) onde pode circular apenas água refrigerada ou aquecida e 2 circuitos (4 tubos) em que a água aquecida circula em um circuito e a refrigerada circula no outro. Dessa maneira é possível aquecer e arrefecer simultaneamente lugares diferentes no edifício. Nos sistemas ar-água são utilizados simultaneamente a água e o ar para climatização do espaço. Os sistemas em que o fluido térmico é um fluido refrigerante, como nas unidades split, são chamados de tudo-refrigerante ou de expansão direta.

2.4.3.1 Componentes dos sistemas AVAC

Os componentes de um sistema AVAC, de acordo com McQuiston & Parker (1994), podem ser agrupados em cinco categorias: Unidades de tratamento de ar, equipamentos de aquecimento, equipamentos de refrigeração, bombas e controlo e instrumentação. Cada um desses itens será brevemente abordado a seguir de acordo com os autores.

As Unidades de Tratamento de Ar (UTAs) são equipamentos que podem incluir em sua configuração ventiladores, unidades de aquecimento e arrefecimento de ar, filtros, humidificadores e sistemas de controlo. Em sua grande maioria, são modulares e se adaptam às necessidades de cada projeto. As UTAs serão melhor discutidas na seção 2.4.3.2.

Os equipamentos de aquecimento são caldeiras de vapor ou de água superaquecida para baixa ou alta pressão. Podem ser utilizados para aquecer um ambiente com auxílio das unidades de tratamento de ar, ventiladores ou através de sistemas radiantes.

Os equipamentos de refrigeração são compostos basicamente por compressor, condensador, evaporador, válvula de expansão e sistema de controlo. Os Chillers são exemplos de equipamento de refrigeração utilizados nos sistemas AVAC.

As bombas utilizadas nos sistemas AVAC, são usualmente bombas centrífugas e sua aplicação no sistema é de movimentar o fluido térmico nas tubagens. Os tubos podem ser divididos em duas partes, o sistema de distribuição no equipamento AVAC (circuito primário) e o sistema de distribuição do edifício (circuito secundário).

Como as cargas térmicas variam nos edifícios, e nos espaços que os compõem, ao longo do dia, é necessário um sistema de controlo para informar o sistema AVAC das condições necessárias de climatização do ambiente. Como o sistema é projetado para as condições extremas, porém em grande parte do tempo funcionam em condições intermédias, o uso de um sistema de controlo permite garantir as condições de conforto e qualidade do ar com maior eficiência e menor custo. Instrumentos como termostato, medidores de caudal, pressóstato e sondas de CO₂ são utilizados nos sistemas de controlo.

2.4.3.2 Unidades de tratamento de ar

Nos sistemas AVAC a união de diversos equipamentos numa determinada sequência é denominada de Unidade de Tratamento de Ar (UTA). A UTA pode ser constituída de ventiladores, filtros, baterias de aquecimento e arrefecimento, recuperadores de calor e etc. As unidades de tratamento de ar são, em sua grande maioria, modulares, facilitando a adição de equipamentos de acordo com as necessidades do projeto e a manutenção dos componentes (Roriz, 2007).

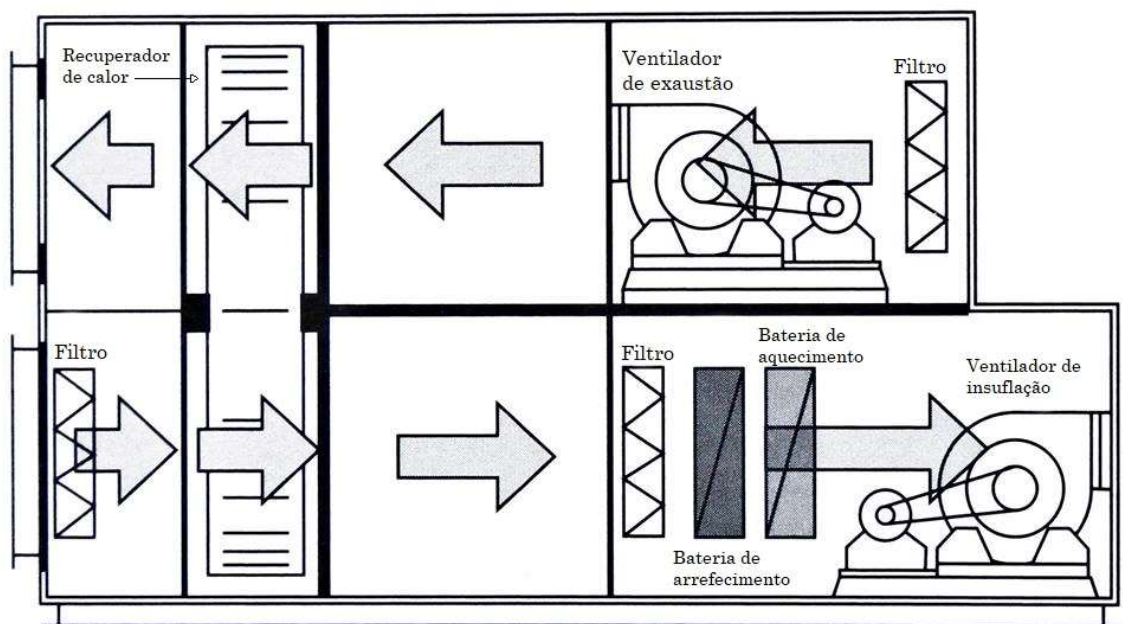


Figura 22 – Unidade de Tratamento de Ar.
Fonte: adaptado de Roriz (2007)

As unidades de tratamento de ar, segundo Wang (2000), podem ser verticais ou horizontais. Nas unidades horizontais, os ventiladores, os filtros e as baterias de aquecimento e arrefecimento são instaladas no mesmo plano, necessitando assim de um maior espaço para instalação. Já nas unidades verticais, como na figura 22, os componentes são instalados em planos diferentes, necessitando assim menos espaço para instalação.

Wang (2000), classifica a instalação das unidades de tratamento de ar como: Rooftop e Indoor. As UTAs Rooftop são instaladas no exterior dos edifícios, geralmente no telhado e por esse motivo devem ser resistentes à ação de intempéries. As UTAs Indoor são geralmente instaladas em tetos falsos do espaço a ventilar ou a climatizar.

2.4.3.3 Componentes das UTAS

De acordo com Roriz (2007) as Unidades de Tratamento de Ar são basicamente constituídas por: ventiladores, baterias de aquecimento e arrefecimento, filtros, bombas, recuperadores de calor, válvulas e sistema de controlo. Cada um desses itens será brevemente explicado a seguir.

Os ventiladores, segundo McQuiston & Parker (1994), são utilizados para realizar a movimentação do ar pelas condutas do sistema e no espaço a ser climatizado, sendo assim componentes essenciais nas UTAs. Os ventiladores centrífugos são os mais utilizados devido à capacidade de mover de forma eficiente grandes ou pequenas quantidades de ar em uma ampla variedade de pressões, hoje em dia, tem crescido a utilização de ventiladores centrífugos sem envolvente (plug fan), muitas vezes acoplados com motores de comutação eletrónica, aumentando ainda mais a eficiência do conjunto. Os ventiladores axiais têm a capacidade de mover grande quantidade de ar em baixas pressões e geralmente produzem maior ruído que os ventiladores centrífugos. As perdas de carga no sistema devem ser levadas em consideração na determinação da potência dos ventiladores. Na figura 23, estão representados um modelo de ventilador centrífugo e um modelo de ventilador axial.

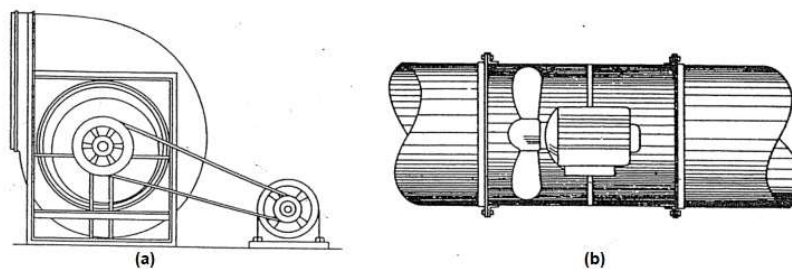


Figura 23 – (a) ventilador centrífugo com transmissão por acoplamento direto, (b) ventilador axial.
Fonte: adaptado de Matos (2016)

Devido à grande quantidade de partículas suspensas tanto no ar interno como externo é necessário a utilização de filtros para garantir a qualidade do ar desejada. Os filtros variam de acordo com o tamanho, formato e com a eficiência mínima de filtragem e, além disso, induzem a um aumento da perda de carga nos sistemas (McQuiston & Parker, 1994). Na figura 24, está representado um filtro do tipo Z-line utilizado para filtrar grandes quantidades de poeira ou como pré-filtro para filtros menores.



Figura 24 – Filtro tipo Z-Line da TROX Technik.
Fonte: Catálogo de filtro TROX Technik

De acordo com a Portaria nº. 353-A/2013 de 4 de dezembro, é necessária a existência nas UTAs que movimentem mais de 1500 m³/h de no mínimo um filtro nas seguintes condições: classificação mínima⁷ M5 antes de qualquer bateria ou recuperador de calor, classificação mínima F7 a jusante de ventiladores com motores e transmissão por correias em contacto com o ar circulante e classificação mínima F7 a jusante de atenuadores acústicos, com exceção dos casos onde exista certificação que ateste a não degradação do elemento acústico.

Nas UTAs, segundo Wang (2000), há baterias de arrefecimento e aquecimento. As baterias de arrefecimento são responsáveis por arrefecer o ar com o objetivo de assegurar a temperatura pretendida para o espaço a ser climatizado. Em sua maioria, utilizam água gelada como fluido refrigerante para arrefecer ar, contudo, também podem utilizar fluidos frigoríficos. As baterias de aquecimento, são responsáveis por aquecer o ar, podendo ser elétricas ou a água. As que utilizam água possuem construção similar às de arrefecimento, contudo, é utilizado água quente para aquecer o ar de insuflação. As baterias de aquecimento elétrico são bobinas feitas com fio de níquel e cromo, e são divididas em mais de um estágio para melhor controlo da temperatura de aquecimento.

⁷ Está em curso a alteração do referencial normativo relativo à classificação dos filtros. A partir de julho de 2018, a classificação utilizada (EN 779) será completamente substituída pela ISO 16890.

As válvulas, segundo Roriz (2007), são utilizadas nas unidades de tratamento de ar para controlo dos sistemas hidráulicos. Para regular o caudal de ar utilizam-se registros de regulação de caudal, que podem ser de controlo automático ou manual.

Os sistemas de recuperação de calor nas UTAs, ou permutadores de calor, segundo McQuiston & Parker (1994), são importantes para evitar o desperdício de energia causado pela renovação do ar no ambiente climatizado. Aproveita-se a energia do ar de exaustão para aquecer ou pré-aquecer o ar novo a insuflar, o mesmo pode ser feito nos sistemas em que a água é utilizada como fluido para aquecer o ar. Esses sistemas também podem ser aproveitados quando funcionam em modo de arrefecimento.

Os permutadores de calor podem ser configurados de acordo com a direção do fluxo de ar e de acordo com o design. As configurações serão abordadas, a seguir, de acordo com a ASHRAE Handbook (2016).

A direção do fluxo de ar pode ser: paralelo, contra fluxo, fluxo cruzado e multi passagens. Na figura 25 estão representados cada um dos sistemas. No fluxo paralelo, tanto o ar de exaustão quanto de insuflação se movem de forma paralela ao longo do permutador de calor, a efetividade máxima teórica do sistema é de 50%. No sistema de contra fluxo, o ar de exaustão e o ar de insuflação se movem ao longo do permutador de calor em direções opostas, a efetividade máxima teórica se aproxima dos 100%. Nas unidades de fluxo cruzado, o ar de exaustão e o ar de insuflação se cruzam no permutador de calor, contudo, não há mistura entre os fluxos. A efetividade real desse sistema é de 50% a 70%. Por último, os sistemas de multi passagens são dois ou mais permutadores de calor do tipo fluxo cruzados conectados em série, aumentando assim a efetividade (60% a 85%).

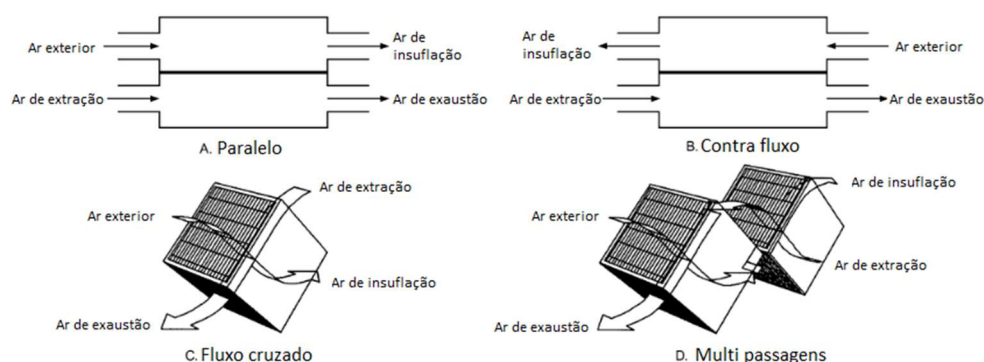


Figura 25 – Direção do fluxo de ar no permutador de calor.

Fonte: adaptado de ASHRAE Handbook Cap 26 (2016)

Os permutadores de calor mais comuns nas unidades de recuperação de energia de unidades de tratamento de ar são do tipo de placas fixas, rodas giratórias e tubos. Existem ainda outras variedades de permutadores de calor que podem ser encontradas na ASHRAE Handbook 2016. A eficácia nesses sistemas é dada pela razão da quantidade de energia ou umidade real recuperada pela quantidade máxima possível. A performance também leva em conta parâmetros como a queda de pressão e a potência dos ventiladores.

Os permutadores de calor do tipo placa fixa são construídos com variados tipos de matérias, como o alumínio, o aço e polímeros e possuem diversas configurações, tamanhos e padrões de fluxo. Normalmente recuperam apenas o calor sensível, ou seja, só há troca de calor e não de umidade. Os permutadores de placa fixa podem atingir altas taxas de recuperação, possuindo efetividade de até 75% no caso de fluxo cruzado (figura 26). Como os recuperadores são estruturas fixas, possuem a vantagem de haver pouco ou nenhum vazamento entre os fluxos de ar.

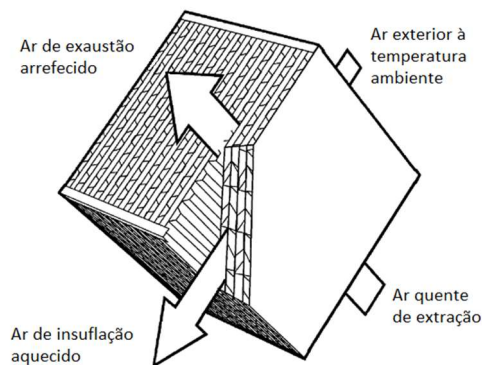


Figura 26 – Permutador de calor de placas fixas e fluxo cruzado.
Fonte: adaptado de ASHRAE Handbook (2016)

Os permutadores de calor do tipo roda giratória, figura 27, possuem um cilindro giratório cujo interior possui uma grande superfície interna para troca de calor. Os fluxos de ar de exaustão e insuflação são contrários, ou seja, do tipo contra fluxo. As rodas giratórias podem recuperar tanto calor sensível, quanto calor latente de maneira simultânea. O calor sensível é transferido através do aquecimento da superfície permutadora de calor, já o calor latente é transferido através da absorção do vapor da água da corrente com maior umidade e adsorvido pela corrente de ar com menor

humidade. Para que esse efeito ocorra, um material dessecante é revestido no permutador de calor, dessa maneira, o ar húmido é seco e o ar seco é humidificado. Nem todas as rodas giratórias possuem revestimento dessecante e ocorre misturas entre os fluxos de ar que podem ser reduzidas com a utilização de sopradores ou purgadores.

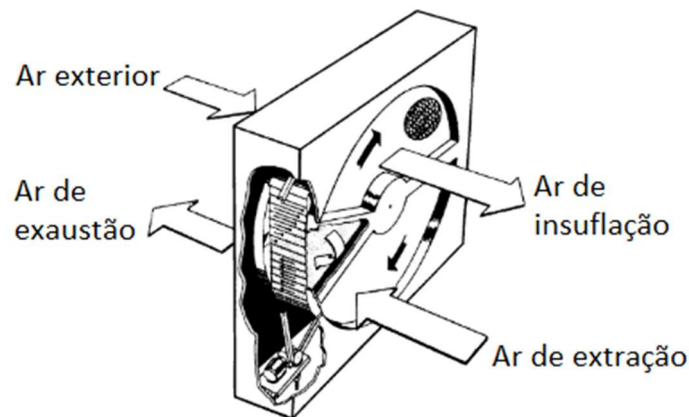


Figura 27 – Permutador de calor do tipo roda giratória.
Fonte: adaptado de ASHRAE Handbook (2016)

Nos permutadores de calor do tipo tubos, figura 28, o ar quente passa pelo evaporador vaporizando o fluido de trabalho. O vapor condensado se desloca devido ao diferencial de pressão até a zona em que o fluxo de ar frio cruza o condensador. O fluido condensado retorna para o evaporador onde é novamente vaporizado completando assim o ciclo. A eficácia típica desses equipamentos é de 15% a 35% e apenas calor sensível é trocado.

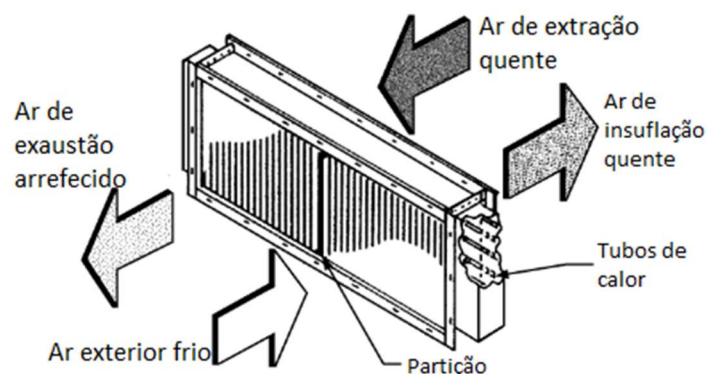


Figura 28 – Permutador de calor do tipo tubos.
Fonte: adaptado de ASHRAE Handbook (2016)

2.4.3.4 *Unidades de ventilação de duplo fluxo com recuperação de energia do tipo Ar-Ar*

As unidades de ventilação com recuperação de energia, de acordo com o artigo publicado pela Natural Resources Canada (2012), são pequenas unidades de tratamento de ar compactas, constituídas por ventiladores de insuflação e de exaustão, permutadores de calor, filtros e sistema de controlo e que têm como função realizar a ventilação mecânica e tratamento do ar em um ambiente além de recuperar calor e/ou humidade entre duas correntes de ar com diferentes temperaturas e humidades. Esse processo tem baixos custos energéticos e reduzem a energia total consumida de um sistema AVAC garantindo a QAI.

As unidades que recuperam apenas a energia sob a forma de calor sensível, de acordo com a ASHRAE Handbook (2016), são conhecidas por ventiladores de recuperação de calor (VRC) já as unidades que recuperam tanto o calor sensível como latente (humidade) são conhecidas por ventiladores de recuperação de energia (VRE). Tanto as VRC quanto as VRE podem funcionar de forma independente como também podem fazer parte de um sistema AVAC. Segundo a ASHRAE Handbook (2016), os sistemas de recuperação podem ser classificados de acordo com a aplicação em três categorias: processo – processo, processo – conforto e conforto – conforto. As duas primeiras são mais utilizadas em aplicações industriais, na grande maioria há apenas a recuperação de calor sensível (temperatura). São exemplos de aplicação secadores e fornos para a primeira categoria e chaminés e incineradores para a segunda categoria. A terceira categoria, conforto – conforto possui aplicações residenciais ou em edifícios de comércio e serviços, nela há tanto a recuperação de energia latente como sensível (temperatura e humidade). Nessa categoria, os VRC são mais utilizados em piscinas e em lugares onde há a exaustão de gases químicos já os VRE possuem aplicações como residências, escolas e escritórios. A seleção dos VRC e VRE estão disponíveis como permutadores de calor ou em sistemas completos. A seleção de tais unidades é ditada principalmente pela quantidade de ar de ventilação.

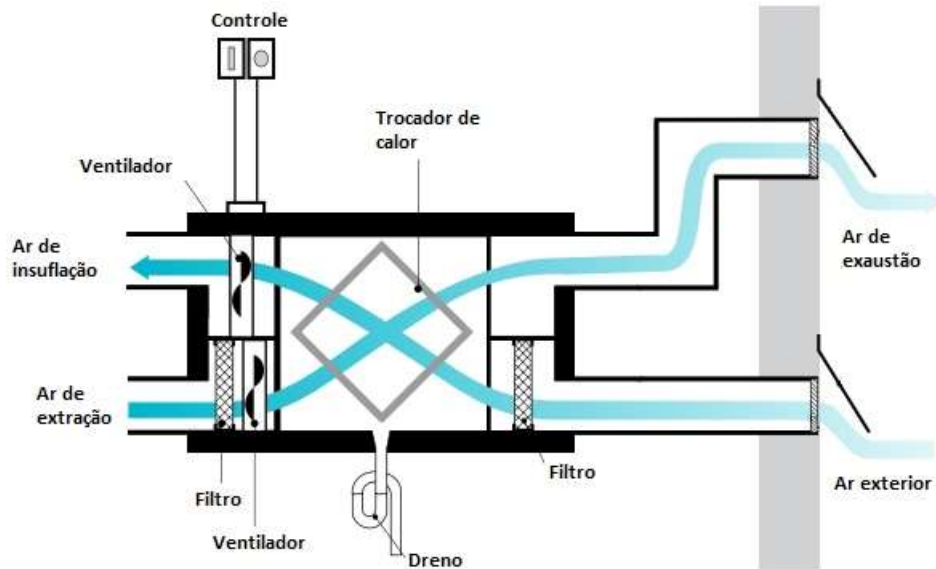


Figura 29 – Ventilador de recuperação de energia.
Fonte: adaptado de Natural Resources Canada (2012)

De acordo com Natural Resources Canada (2012), na estação de aquecimento, a unidade de ventilação com recuperação de energia recupera parte do calor presente no ar de exaustão para pré aquecer o ar de insuflação. Já durante a estação de arrefecimento, a unidade faz o processo contrário, arrefece o ar de insuflação permutando o calor para o ar de exaustão. Devido às trocas de calor, em alguns casos, é necessário a existência de dreno para retirada

2.4.3.5 Aspectos económicos

Os sistemas de recuperação de calor do tipo Ar - Ar, de acordo com a ASHRAE Handbook (2016), podem ser instalados tanto em equipamentos novos como em upgrades de equipamentos já em funcionamento. Os sistemas devem ser projetados de acordo com cada aplicação para terem o melhor custo benefício e taxa de amortização. Os custos de energia operacional são funções integradas ao longo do tempo, porque os horários de utilização do edifício podem impor taxas diferentes de ventilação ao longo do dia. Nos cálculos devem ser levadas em conta variáveis como a taxa de fluxo, a queda de pressão, a eficiência dos ventiladores o custo de energia e a taxa de recuperação de calor.

Ainda de acordo com a ASHRAE Handbook (2016), a efetividade total do sistema deve ser alta, contudo, implica custos de investimentos maiores. A eficiência dos ventiladores e bombas e a redução dos materiais de construção das unidades são fatores importantes para diminuir a taxa de amortização do sistema. Nos sistemas conforto – conforto, os sistemas trabalham com uma diferença pequena de temperatura entre os fluxos de ar, fazendo com que os recuperadores de calor sejam projetados para ter a maior eficiência possível. Nos sistemas AVAC, a energia recuperada pelo recuperador de energia pode ser usada para reduzir a capacidade das baterias de aquecimento e resfriamento, reduzindo o custo e melhorando a eficiência final do projeto.

2.4.4 Eficiência energética para sistemas AVAC em edifícios de comércio e serviços

Os sistemas AVAC a instalar em edifícios de comércio e serviço devem cumprir os requisitos gerais de dimensionamento, independente do tipo de sistema instalado, de acordo com a Portaria n°. 17-A/2016 de 4 de fevereiro. As soluções adotadas devem respeitar os seguintes requisitos: é obrigatória a existência de projeto AVAC em instalações de climatização com potência térmica global superior a 25 kW; se o somatório dos caudais de ar de insuflação for maior que 10.000 m³/h nos sistemas de climatização tipo Tudo-Ar é obrigatório a existência de free-cooling; se a potência térmica de rejeição na estação de aquecimento for maior que 80 kW é obrigatória a recuperação de energia do ar de rejeição com eficiência mínima de 50%; em sistemas dotados com ventilação mecânica e potência instalada superior a 100 kW, que climatizam espaços com ocupação permanente e com média inferior a 50% da ocupação máxima é obrigatório a instalação de sistema de caudal de ar novo variável com controlo em função do CO₂ e/ou detectores de presença.

De acordo com a Portaria n°. 17-A/2016 de 4 de fevereiro, os sistemas de ar condicionado, bombas de calor e chillers devem obedecer os requisitos mínimos de eficiência indicados na tabela 6.

Tabela 6 – Requisitos mínimos de eficiência das unidades de produção térmicas.
Fonte: Portaria n.º 17-A/2016

Tipo de equipamento	Classe de eficiência mínima após...	
	entrada em vigor	31 dez 2015
Split, multisplit, VRF e compacto	C	B
Unidades do tipo <i>Rooftop</i>		
Unidades do tipo <i>Chiller</i> de compressão		
(Bomba de calor)		

As unidades de tratamento de ar devem respeitar aos requisitos mínimos de eficiência energética indicados na tabela 7.

Tabela 7 – Requisitos mínimos de eficiência das unidades de tratamento de ar.
Fonte: Portaria n.º 17-A/2016.

Tipo de equipamento	Classe de eficiência mínima após...	
	entrada em vigor	31 dez 2015
Unidades de tratamento de ar	D	C

Os equipamentos propulsores de fluidos de transporte devem cumprir os requisitos de eficiência energética indicados na tabela 8.

Tabela 8 – Requisitos de eficiência energética de bombas e ventiladores.
Fonte: Portaria n.º 17-A/2016.

Equipamento	Função	Potência [kW]	Motor elétrico - Classe IEC ⁽²⁾		Potência específica [W/(m ³ /s)]	
			entrada em vigor	1 de janeiro 2015	entrada em vigor	1 de janeiro 2015
Bombas	Climatização e AQS	0,75 a 7,5	IE2	IE2	-	
		≥ 7,5		IE3 ⁽¹⁾		
Ventiladores	UTA e UTAN	0,75 a 7,5	IE2	IE2	SFP5 ≥2000 - 3000	SFP4 ≥1250 - 2000
	Extração e Exaustão	≥ 7,5				

Ainda de acordo com a Portaria n.º 17-A/2016, as UTAs que possuem baterias de aquecimento e/ou arrefecimento devem possuir isolamento com espessura mínima de 50 mm. Se a instalação for em espaço interior e não fortemente ventilado, a espessura de isolamento mínima pode ser de 25 mm.

O Regulamento (EU) n.º 1253/2014 da comissão de 7 de julho de 2014 que aplica a Diretiva 2009/125/CE tem como objetivo estabelecer os requisitos de concepção ecológica dos equipamentos de ventilação para a sua colocação no mercado. Nele são definidas duas fases, a primeira com entrada em vigor em 1 de janeiro de 2016 e a segunda em 1 de janeiro de 2018. Na tabela 9 estão definidos os requisitos de concepção ecológica das unidades de ventilação não residenciais (UVNR) bidirecionais para a ErP 2016.

Tabela 9 – Requisitos específicos de concepção ecológica aplicáveis às UVNR para a ErP 2016.
Fonte: Adaptado de Regulamento (EU) n.º 1253/2014

Unidades de Ventilação não Residenciais		ErP 2016
Recuperador de calor		Obrigatório
Sinalizador de troca dos filtros		-
Variação de velocidade nos ventiladores		Obrigatório
Correção dos Filtros F [W/(m ³ /s)]	Configuração de referência estiver completa	0
	Se faltar o filtro médio	160
	Se faltar o filtro fino	200
	Se faltar o filtro médio e fino	360
Eficiência térmica mínima η_t [%]	Sistema de recuperação de calor móveis	63
	Outros sistemas de recuperação de calor	67
Bônus de eficiência E nos recuperadores de calor [W/(m ³ /s)]	Sistema de recuperação de calor móveis	$(\eta_t - 0,63) * 3000$
	Outros sistemas de recuperação de calor	$(\eta_t - 0,67) * 3000$

Tabela 9 - Requisitos específicos de concepção ecológica aplicáveis às UVNR para a ErP 2016, continuação.
 Fonte: Adaptado de Regulamento (EU) n.º 1253/2014

Potência interna máxima específica de ventilação dos componentes de ventilação ($SFP_{int\ max}$) [W/(m ³ /s)]	Sistema de recuperação de calor móveis [q < 2 m ³ /s]	$1700 + E - 300 * \left(\frac{q}{2}\right) - F$
	Sistema de recuperação de calor móveis [q ≥ 2 m ³ /s]	$1400 + E - F$
	Outros sistemas de recuperação de calor [q < 2 m ³ /s]	$1200 + E - 300 * \left(\frac{q}{2}\right) - F$
	Outros sistemas de recuperação de calor [q < 2 m ³ /s]	$900 + E - F$

Na tabela 10 estão definidos os requisitos de concepção ecológica das unidades de ventilação não residenciais (UVNR) bidirecionais para a ErP 2018.

Tabela 10 - Requisitos específicos de concepção ecológica aplicáveis às UVNR para a ErP 2018.
 Fonte: Adaptado de Regulamento (EU) n.º 1253/2014

Unidades de Ventilação não Residenciais	ErP 2018	
Recuperador de calor	Obrigatório	
Sinalizador de troca dos filtros	Obrigatório	
Variação de velocidade nos ventiladores	Obrigatório	
Correção dos Filtros F [W/(m ³ /s)]	Configuração de referência estiver completa	0
	Se faltar o filtro médio	150
	Se faltar o filtro fino	190
	Se faltar o filtro médio e fino	340
Eficiência térmica mínima η_t [%]	Sistema de recuperação de calor móveis	68
	Outros sistemas de recuperação de calor	73
Bônus de eficiência E nos recuperadores de calor [W/(m ³ /s)]	Sistema de recuperação de calor móveis	$(\eta_t - 0,68) * 3000$
	Outros sistemas de recuperação de calor	$(\eta_t - 0,73) * 3000$

Tabela 10 - Requisitos específicos de concepção ecológica aplicáveis às UVNR para a ErP 2018, continuação.
 Fonte: Adaptado de Regulamento (EU) n.º 1253/2014

Potência interna máxima específica de ventilação dos componentes de ventilação ($SFP_{int\ max}$) [W/(m ³ /s)]	Sistema de recuperação de calor móveis [q < 2 m ³ /s]	$1600 + E - 300 * \left(\frac{q}{2}\right) - F$
	Sistema de recuperação de calor móveis [q ≥ 2 m ³ /s]	$1300 + E - F$
	Outros sistemas de recuperação de calor [q < 2 m ³ /s]	$1100 + E - 300 * \left(\frac{q}{2}\right) - F$
	Outros sistemas de recuperação de calor [q < 2 m ³ /s]	$800 + E - F$

O Regulamento (EU) n.º 1253/2014 ainda define os requisitos de informação aplicáveis as unidades de ventilação, que deverão ser fornecidas sobre o produto e o procedimento de verificação para efeitos de fiscalização do mercado.

DESENVOLVIMENTO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

3.2 UNIDADE DE VENTILAÇÃO COM RECUPERAÇÃO DE ENERGIA

3.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO – LEVANTAMENTO DE DADOS

3.4 ENERGIA SOLAR DISPONÍVEL

3.5 DIMENSIONAMENTO TEÓRICO DO SISTEMA

3.6 OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA

3.7 SISTEMA ECOEVO HE EC 10

3.8 ESTUDO DE VIABILIDADE PARA O SISTEMA STAND ALONE

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo serão apresentadas as seguintes etapas do desenvolvimento do projeto:

- Caracterização do problema;
- Seleção do equipamento de ventilação com recuperação de energia;
- Análise de mercado;
- Procura e consumo de energia elétrica;
- Energia solar disponível;
- Seleção do painel fotovoltaico com a melhor relação custo/benefício;
- Seleção da quantidade de painéis fotovoltaicos para o sistema;
- Dimensionamento do sistema;
- Análise da viabilidade de aplicação de baterias.

3.1 Caracterização do problema

A partir do objetivo proposto pela empresa de analisar a viabilidade de implementação de painéis solares fotovoltaicos em uma gama de seus produtos de ventilação com recuperação de energia, foram levantadas questões em relação às possíveis soluções.

- O sistema de produção de energia fotovoltaica pode tornar o equipamento autossuficiente sem a utilização de baterias?
- O período de amortização torna o investimento viável?
- Qual a viabilidade do sistema para autoconsumo?
- Qual a viabilidade de utilização de um sistema stand-alone?

Para responder essas questões, foram realizados cálculos e simulações da viabilidade em se implementar o sistema solar fotovoltaico para fornecer energia elétrica ao equipamento de ventilação com recuperação de energia em três regiões de Portugal.

3.2 Unidade de ventilação com recuperação de energia

Dentro da gama das unidades de ventilação com recuperação de energia produzidas pela ARFIT, foi escolhida para o projeto a gama ECOEVO HE EC. A escolha dessa unidade foi motivada devido a sua alta eficiência e ao facto de já estar em acordo com os requisitos do Regulamento (EU) n.º 1253/2014 da ErP 2018.

As unidades de ventilação com recuperação de calor ECOEVO HE EC, figura 30, são equipamentos de duplo fluxo de ar de alta eficiência com possibilidade de instalação interior ou exterior, insonorizada e disponível com diferentes acessórios e configurações. Possuem recuperador de calor do tipo fluxo cruzado com eficiências de até 93% e com by pass incorporado. Os ventiladores da unidade são centrífugos do tipo PLUG FAN acionados através de motores EC, um ventilador para insuflação de ar e outro para extração. As unidades podem ser equipadas com filtros da classe M5, F7 e F9 nos módulos de admissão de ar.



Figura 30 – Unidade de Recuperação de Calor ECOEVO HE EC da empresa ARFIT.
Fonte: Arfit – Catálogo ECOEVO HE EC

As unidades ECOEVO HE EC estão disponíveis com cinco capacidades de insuflação de ar novo diferentes, variando de 870 m³/h até 5000 m³/h, operam em corrente alternada (CA) e com tensão de 230 V e 50 Hz

3.2.1 Consumo energético

O perfil de consumo de energia elétrica das unidades de ventilação com recuperação de calor ECOEVO HE EC foi traçado de acordo com o método apresentado na seção 2.3.9 da revisão bibliográfica. Na tabela 11, estão presentes o caudal máximo de ar novo insuflado, a corrente e a potência total dos motores de cada unidade ECOEVO HE

EC. A potência e corrente foram fornecidas pela ARFIT e é relativa às unidades com filtros F7 na admissão de ar novo e M5 na exaustão de ar. O caudal está presente no manual técnico do equipamento.

Tabela 11 – Características técnicas da ECOEVO HE EC.
Fonte: Arfit – Catálogo ECOEVO HE EC

Modelo	Caudal (m ³ /h)	Potência (W)	Corrente (A)
ECOEVO HE EC-10	870	281	1,22
ECOEVO HE EC-16	1510	808	3,51
ECOEVO HE EC-23	2250	952	4,14
ECOEVO HE EC-39	3400	1614	7,02
ECOEVO HE EC-54	5000	2340	10,17

Para realizar o cálculo do consumo diário de energia houve a necessidade de definir um perfil de utilização para o equipamento. Como os painéis fotovoltaicos só produzem energia quando há sol, um perfil em que a utilização do equipamento fosse o máximo possível durante as horas de sol foi escolhido. Além disso, optou por um perfil que fosse típico nas vendas das unidades pela empresa. No âmbito de conciliar estes dois fatores, o perfil de utilização em escritórios foi o que melhor se adequou às exigências, sendo o escolhido para o projeto.

Um possível padrão de referência de ocupação em escritórios é o apresentado na tabela 12 (vide perfis de utilização in Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios aprovado pelo Decreto de Lei n.º 79/2006 de 4 de abril).

Tabela 12 – Padrão de referência de ocupação em escritórios.
Fonte: Adaptado de Decreto de Lei n.º 79/2006

horas	% de Ocupação	
	Segunda a sexta	Fins de semana
0h as 1h	0	0
1h as 2h	0	0
2h as 3h	0	0
3h as 4h	0	0
4h as 5h	0	0
5h as 6h	0	0
6h as 7h	10	0
7h as 8h	20	0
8h as 9 h	50	0
9h as 10h	90	0
10h as 11h	100	0
11h as 12h	100	0

Tabela 12 – Padrão de referência de ocupação em escritórios, continuação.
 Fonte: Adaptado de Decreto de Lei n.º 79/2006

horas	% de Ocupação	
	Segunda a sexta	Fins de semana
12h as 13h	50	0
13h as 14h	70	0
14h as 15h	90	0
15h as 16h	100	0
16h as 17h	80	0
17h as 18h	50	0
18h as 19h	20	0
19h as 20h	10	0
20h as 21h	0	0
21h as 22h	0	0
22h as 23h	0	0
23h as 24h	0	0

Segundo o padrão típico de ocupação de escritórios, tabela 12, a ocupação do edifício tem início as 6 horas e fim as 20 horas durante os dias da semana. Já durante o final de semana não há utilização do edifício, logo a unidade de tratamento de ar não entra em funcionamento.

Com o perfil típico de utilização definido e com as potências das unidades de ventilação com recuperação de energia fornecidas pela empresa, foi determinado o consumo diário de hora em hora e o consumo diário total de cada configuração das unidades ECOEVO HE EC, os valores estão presentes na tabela 13.

Tabela 13 – Consumo diário horário e diário total das unidades de recuperação de energia ECOEVO HE EC.

Horário	Perfil de utilização (%)	HE EC 10		HE EC 16		HE EC 23		HE EC 39		HE EC 54	
		Q (m³/h)	P (W)	Q (m³/h)	P (W)	Q (m³/h)	P (W)	Q (m³/h)	P (W)	Q (m³/h)	P (W)
0h as 1h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1h as 2h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2h as 3h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3h as 4h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4h as 5h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5h as 6h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6h as 7h	10	87	4,54	151	7,8	225	9,35	340	27	500	26,7
7h as 8h	20	174	11,74	302	24,7	450	29,6	680	59	1000	89
8h as 9h	50	435	55,6	755	147,8	1125	177,2	1700	311	2500	497
9h as 10h	90	783	214	1359	608	2025	718	3060	1227	4500	1786
10h as 11h	100	870	281	1510	808	2250	952	3400	1614	5000	2340
11h as 12h	100	870	281	1510	808	2250	952	3400	1614	5000	2340
12h as 13h	50	435	55,6	755	147,8	1125	177,2	1700	311	2500	497
13h as 14h	70	609	115,3	1057	321	1575	381	2380	663	3500	998
14h as 15h	90	783	214	1359	608	2025	718	3060	1227	4500	1786
15h as 16h	100	870	281	1510	808	2250	952	3400	1614	5000	2340
16h as 17h	80	696	158,8	1208	448	1800	531	2720	918	4000	1347
17h as 18h	50	435	55,6	755	157,5	1125	177,2	1700	311	2500	497
18h as 19h	20	174	11,74	302	24,7	450	29,6	680	59	1000	89
19h as 20h	10	87	4,54	151	7,8	225	9,35	340	27	500	26,7
20h as 21h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21h as 22h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22h as 23h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23h as 24h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Na tabela 13, multiplicou-se o caudal de ar novo máximo de cada unidade (tabela 11) pela percentagem de ocupação do edifício, obtendo assim o caudal necessário em cada hora de utilização do equipamento. A potência dos ventiladores varia de acordo com o caudal a ser insuflado, logo o consumo varia ao longo do dia. O pico de potência máxima consumida durante o dia ocorre quando a ocupação é de 100%, quando o caudal utilizado é o máximo disponível. A soma do consumo elétrico ao longo do dia é o consumo total diário do equipamento.

Na tabela 14 estão presentes o consumo de pico, o consumo diário e o consumo anual de cada equipamento. Pelo perfil utilizado, o equipamento só funciona nos dias úteis do ano, para obter o consumo anual multiplicou-se o valor do consumo diário pela que média de dias uteis no ano, 261.

Tabela 14 – Consumo elétrico das unidades ECOEVO HE EC.

ECOEVO	HE EC 10	HE EC 16	HE EC 23	HE EC 39	HE EC 54
Consumo de pico (Wh)	281	808	952	1614	2340
Consumo total diário (Wh)	1744,46	4927,1	5813,5	9982	14659,4
Consumo total anual (Wh)	$455,30 \times 10^3$	$1285,97 \times 10^3$	$1517,32 \times 10^3$	$2605,30 \times 10^3$	$3826,10 \times 10^3$

Com o objetivo de obter melhor visualização do consumo energético ao longo do dia, traçou-se a curva de carga de cada unidade (figura 31).

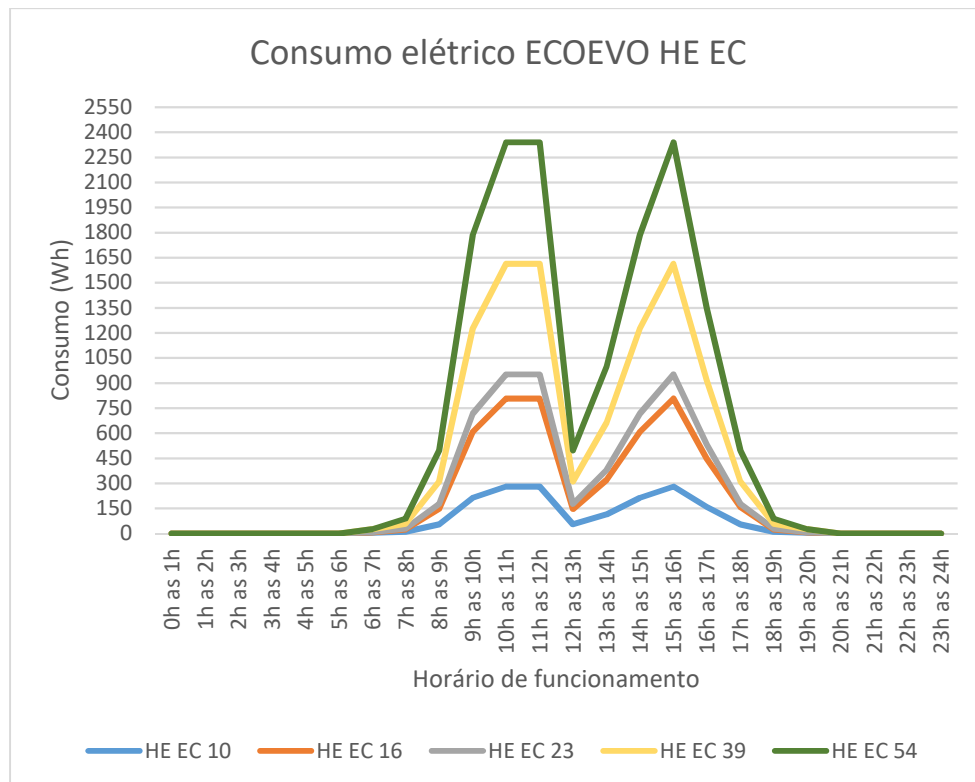


Figura 31 – Curva de carga das unidades ECOEVO HE EC.

As curvas de carga de cada unidade ECOEVO HE EC facilitam a visualização do perfil de consumo em escritórios. A procura máxima de energia ocorre em dois picos, o primeiro entre as 10 e 12 horas e o segundo das 15 as 16 horas. Das 12 horas até 13 horas há uma queda significativa do consumo de energia, e a partir das 13 horas o consumo volta a aumentar até atingir o segundo pico de procura máximo.

De acordo com a figura 31 e com as cartas solares de cada cidade apresentadas nas figuras 32, 33 e 34, percebe-se que a energia elétrica gerada pelos painéis fotovoltaicos não torna o equipamento autossuficiente. Isso ocorre, devido ao facto de que em grande parte do ano o equipamento de recuperação de energia começa a funcionar antes de haver sol e continua funcionando após o por do sol. Nesses períodos, o painel fotovoltaico não gera energia para fornecer ao equipamento, impossibilitando assim a autossuficiência.

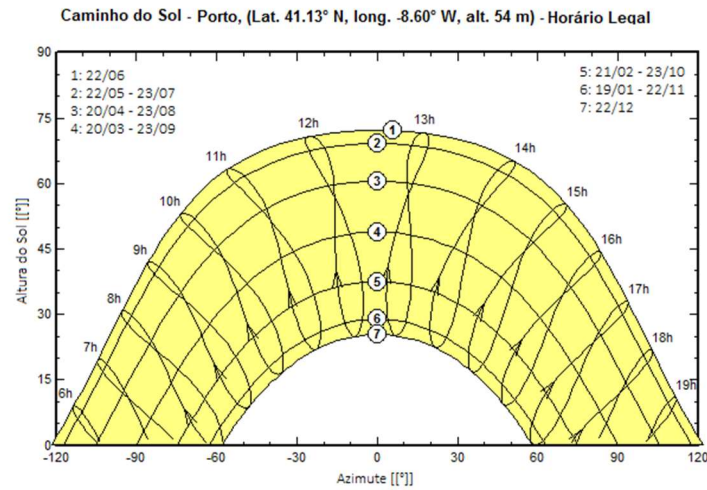


Figura 32 – Carta Solar – Porto.
Fonte: Adaptado de PVSyst 6.0.2

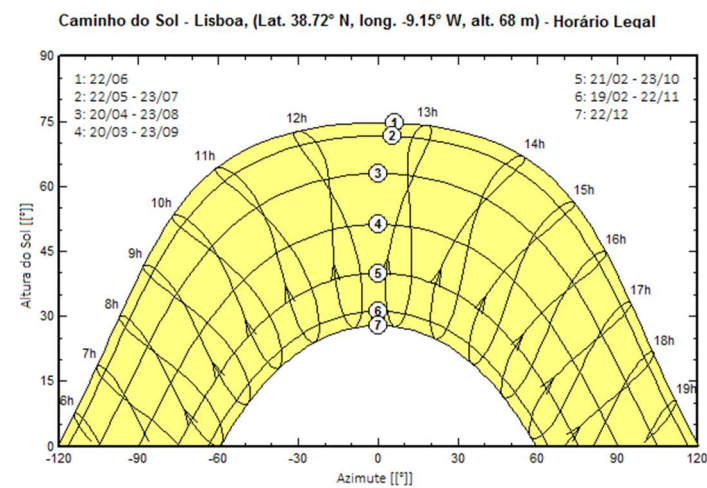


Figura 33 - Carta solar – Lisboa.
Fonte: adaptado de PVSyst 6.0.2.

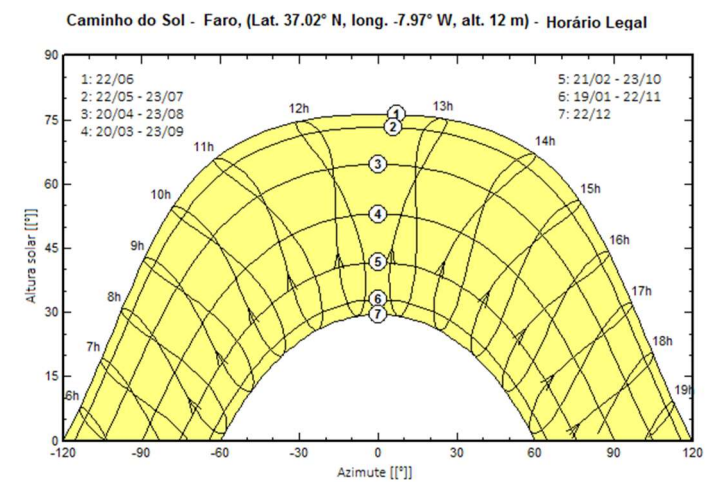


Figura 34 – Carta solar – Faro.
Fonte: adaptado de PVSyst 6.0.2.

De acordo com as cartas solares das cidades de Porto, Lisboa e Faro apenas entre as datas de 20/04 até 23/08 há possibilidade de produção de energia fotovoltaica entre as 6 horas e as 19 horas. No restante do ano, devido aos horários de nascer e por do sol a produção de energia elétrica não é possível no começo da manhã e no final da tarde. Durante o inverno, período em que há menos horas de sol, há produção de energia apenas das 8 horas até as 17 horas. Dessa forma, a autossuficiência não é possível para o equipamento quando utilizado em perfis de escritório nas cidades escolhidas para análise.

3.2.2 Enquadramento regulamentar

Para garantir a qualidade do ar e o conforto térmico dos ocupantes no escritório, de acordo com a Portaria n°. 353-A/2013 de 4 de dezembro, deve existir um caudal de ar novo mínimo a ser insuflado no edifício. Como o caudal é limitado pelo equipamento, o critério de limitação deve ser a área máxima ou a quantidade de pessoas máxima que podem estar no edifício para que o equipamento em questão forneça a quantidade de ar novo necessária para estar de acordo com a legislação.

O caudal de ar novo corrigido (Q_{ANf}) foi calculado pela equação 49, utilizando o valor de eficácia de ventilação, disponível na tabela 3, para insuflação pelo teto, de ar quente pelo menos 8 °C acima da temperatura local e extração/retorno pelo teto ($\varepsilon_v = 0,8$). A área e o número de ocupantes máximo para cada unidade foi calculada através das equações 51 e 50 respetivamente. No critério da área, utilizou-se $Q_{REF} = 3 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$, ou seja, para atividades sem emissão de poluentes específicos (tabela 5). Já no critério de ocupação do edifício, utilizou $Q_{REF} = 24 \text{ m}^3/\text{h.pessoa}$ para atividade sedentária (tabela 4). Os resultados estão presentes na tabela 15.

Tabela 15 – Caudal de ar novo segundo a Portaria n°. 353-A/2013 de 4 de dezembro.

ECO EVO HE EC	Q_{AN} (m ³ /h)	Q_{ANf} (m ³ /h)	Área (m ²)	Ocupação (n° de pessoas)
HE EC 10	870	696	232	29

Tabela 15 - Caudal de ar novo segundo a Portaria n°. 353-A/2013 de 4 de dezembro, continuação.

ECOECO HE EC	Q_{AN} (m ³ /h)	Q_{ANf} (m ³ /h)	Área (m ²)	Ocupação (n° de pessoas)
HE EC 16	1510	1208	402,66	50
HE EC 23	2250	1800	600	75
HE EC 39	3400	2720	906,67	113
HE EC 54	5000	4000	1333,33	166

De acordo com os dados presentes na tabela 15, observa-se que para o modelo ECOECO HE EC 10, quando em funcionamento máximo, o limite de ocupantes no edifício é 29. Acima desse valor, o equipamento não cumpre os requisitos de qualidade do ar interior e o mesmo ocorre para a área. O raciocínio anterior é válido para as outras unidades ECOECO HE EC.

3.3 Sistema fotovoltaico – levantamento de dados

Para obter resultados de amortização do sistema mais próximos do real, realizou-se um levantamento de dados de mercado dos painéis fotovoltaicos, dos inversores e dos suportes em três empresas fornecedoras de equipamentos solares. Foram selecionados seis modelos de painéis fotovoltaicos, três modelos de inversores e um modelo de suporte. Na tabela 16, estão presentes os equipamentos e seus custos.

Tabela 16 – Equipamentos do sistema solar fotovoltaico e seus custos.

Fonte: adaptado do catálogo das fabricantes

Equipamento	Modelo	Potência (Wp)	Preço [€]
Módulo Fotovoltaico	Open Renewables ME60 250W Mono	250	184,50
	Open Renewables ME60 265W Mono	265	195,57
	Sunmodule Plus SW 260 Poly	260	225,61
	Sunmodule Plus SW 290 Mono	290	292,60
	Sunmodule Plus SW 300 Mono	300	321,77
	Luxor Eco Line P60/250 Poly	250	196,80

Tabela 16 - Equipamentos do sistema solar fotovoltaico e seus custos, continuação.
 Fonte: adaptado do catálogo das fabricantes

Equipamento	Modelo	Potência (Wp)	Preço [€]
Inversores	Envertech 250W	Até 300	120,85
	ABB micro inverter 300W	Até 320	243,54
	APS 500W	Até 310 (2x)	208,49
Suportes	Pole Mount Pm 1-1		248,46
	Pole Mount Pm 1-2		287,82
	Pole Mount Pm 1-3		325,95
	Pole Mount Pm 1-4		364,08
	Pole Mount Pm 1-5		402,21
	Pole Mount Pm 1-6		441,57

Na seleção dos painéis fotovoltaicos, optou-se pelos módulos de silício mono e policristalinos. A escolha dessas tecnologias teve como princípio, de acordo com a seção 2.3.7, a alta confiabilidade e a baixa degradação de eficiência dos módulos, uma vez que são tecnologias maduras no mercado. Os inversores foram selecionados com base nas características técnicas dos painéis solares e possuem alta eficiência e proteções contra humidade e altas temperaturas. O suporte para montagem dos painéis foi selecionado levando em consideração a possibilidade de montagem com o ângulo ótimo para cada região.

As características técnicas dos equipamentos presentes na tabela 16 estão no anexo 6.1.

3.4 Energia solar disponível

A radiação solar média mensal incidente em superfícies inclinadas na superfície terrestre (I_{β}^{dm}) foi calculada para três regiões diferentes em Portugal, com o intuito de identificar as diferenças na quantidade de produção de energia em cada localização. As cidades escolhidas foram Porto, Lisboa e Faro nas regiões norte, centro e sul respetivamente.

A metodologia de cálculo está presente na seção 2.2. A latitude (ϕ) de cada cidade, o ângulo ótimo de inclinação (β_s) do painel e o albedo (ρ) de cada cidade foram obtidos através da base de dados do software PVSyst 6.0.2 e estão presentes na tabela 17.

Tabela 17 – Latitude, ângulo ótimo e albedo para Porto, Lisboa e Faro.
Fonte: Adaptado de PVSyst 6.0.2

Cidade:	Porto	Lisboa	Faro
ϕ	41,13°	38,72°	37,02°
β_s	35°	33°	33°
ρ	0,2	0,2	0,2

O índice de claridade (K_T) e a média da temperatura ambiente (T_{amb}) mensal para cada cidade também foram obtidos através da base de dados meteorológicos do software PVSyst 6.0.2 e estão presentes na tabela 18.

Tabela 18 – Índices de claridade e temperatura ambiente média mensal para Porto, Lisboa e Faro.
Fonte: Adaptado de PVSyst 6.0.2

Mês	Porto		Lisboa		Faro	
	K_T	T_{amb}	K_T	T_{amb}	K_T	T_{amb}
Janeiro	0,444	10	0,510	11,1	0,570	10,9
Fevereiro	0,509	10,8	0,523	12	0,600	12,3
Março	0,520	12,8	0,563	14,1	0,613	15,2
Abril	0,543	13,6	0,585	14,9	0,652	16,8
Mai	0,582	16,1	0,619	17,8	0,662	20
Junho	0,603	18,8	0,653	21	0,693	23,2
Julho	0,624	19,6	0,672	22,4	0,719	24,9
Agosto	0,604	20,3	0,667	23,1	0,697	24,6
Setembro	0,594	18,8	0,610	21,1	0,652	21,6
Outubro	0,467	16,7	0,550	18,5	0,611	19,2
Novembro	0,469	12,7	0,493	13,9	0,582	14,5
Dezembro	0,400	10,6	0,475	11,6	0,530	12,1

O índice de claridade influencia diretamente a quantidade de energia disponível, quanto maior for, maior a radiação que chega à superfície. A latitude de cada cidade, o ângulo de inclinação, o albedo e o índice de claridade foram utilizados no cálculo da radiação média incidente em uma superfície inclinada na superfície da terra que seguiu as seguintes etapas:

- Determinação da radiação solar incidente fora da atmosfera terrestre durante cada dia do ano (S_{oh}^d) através da equação 4. Com os valores diários estimou-se a radiação diária média mensal sobre uma superfície extraterrestre (S_{oh}^{dm}) para cada cidade.
- Determinação da radiação média mensal solar incidente sobre um plano horizontal em relação a superfície da terra (G_h^{dm}) utilizando a equação 6 e o índice de claridade presente na tabela 18.
- Determinação da radiação solar média mensal incidente sobre um plano inclinado na superfície da terra (I_β^{dm}) através da equação 7 e do ângulo ótimo de inclinação para cada cidade disponível na tabela 17.

Os valores obtidos para S_{oh}^{dm} , G_h^{dm} e I_β^{dm} foram divididos por $3,6 \times 10^6$ para transformar de J/m^2 para kW/m^2 e multiplicados pelo número de dias de cada mês para se obter a média de energia disponível mensalmente.

Na tabela 19 estão presentes as radiações S_{oh}^m , G_h^m , I_β^{dm} e I_β^m para a cidade do Porto.

Tabela 19 - S_{oh}^m , G_h^m , I_β^{dm} e I_β^m para a cidade do Porto - Portugal.

Mês	S_{oh}^m (kWh/m ² .mês)	G_h^m (kWh/m ² .mês)	I_β^{dm} (kWh/m ² .dia)	I_β^m (kWh/m ² .mês)
Janeiro	125,41	55,68	3,09	95,69
Fevereiro	152,74	77,74	4,10	114,79
Março	231,73	120,50	4,72	146,41
Abril	286,10	155,35	5,36	160,88
Maiο	340,90	198,40	5,99	185,72

Tabela 19 - S_{oh}^m , G_h^m , I_{β}^{dm} e I_{β}^m para a cidade do Porto – Portugal, continuação.

Mês	S_{oh}^m (kWh/m ² .mês)	G_h^m (kWh/m ² .mês)	I_{β}^{dm} (kWh/m ² .dia)	I_{β}^m (kWh/m ² .mês)
Junho	347,90	209,78	6,27	188,03
Julho	349,51	218,09	6,43	199,31
Agosto	311,73	188,28	6,05	187,47
Setembro	244,90	145,47	5,60	167,96
Outubro	187,30	87,47	3,83	118,65
Novembro	130,59	61,25	3,39	101,56
Dezembro	112,26	44,91	2,59	80,44
Radiação anual (kWh/m ² .ano)				1746,91

Na tabela 20 estão presentes as radiações S_{oh}^m , G_h^m , I_{β}^{dm} e I_{β}^m para a cidade de Lisboa

Tabela 20 - S_{oh}^m , G_h^m , I_{β}^{dm} e I_{β}^m para a cidade de Lisboa- Portugal.

Mês	S_{oh}^m (kWh/m ² .mês)	G_h^m (kWh/m ² .mês)	I_{β}^{dm} (kWh/m ² .dia)	I_{β}^m (kWh/m ² .mês)
Janeiro	138,15	70,46	3,76	116,43
Fevereiro	163,45	85,49	4,32	121,03
Março	241,15	135,77	5,24	162,48
Abril	291,43	170,49	5,85	175,58
Maio	342,51	212,01	6,39	198,01
Junho	347,51	226,93	6,77	203,02
Julho	350,05	235,23	6,92	214,52
Agosto	315,68	210,56	6,74	208,81
Setembro	252,67	154,13	5,83	174,86
Outubro	198,40	109,12	4,72	146,39
Novembro	142,70	70,35	3,69	110,73
Dezembro	125,10	59,42	3,30	102,39
Radiação anual (kWh/m ² .ano)				1934,25

Na tabela 21 estão presentes as radiações S_{oh}^m , G_h^m , I_β^{dm} e I_β^m para a cidade de Faro.

Tabela 21 - S_{oh}^m , G_h^m , I_β^{dm} e I_β^m para a cidade de Faro - Portugal.

Mês	S_{oh}^m (kWh/m ² .mês)	G_h^m (kWh/m ² .mês)	I_β^{dm} (kWh/m ² .dia)	I_β^m (kWh/m ² .mês)
Janeiro	147,11	83,85	4,42	136,98
Fevereiro	170,88	102,53	5,18	145,02
Março	247,55	151,75	5,82	180,54
Abril	294,90	192,27	6,56	196,90
Maio	343,36	227,31	6,78	210,22
Junho	346,99	240,47	7,09	212,75
Julho	350,17	251,77	7,33	227,13
Agosto	318,18	221,77	7,03	217,82
Setembro	257,88	168,14	6,31	189,23
Outubro	206,05	125,89	5,42	168,05
Novembro	151,19	87,99	4,62	138,66
Dezembro	134,16	71,11	3,90	120,80
Radiação anual (kWh/m ² .ano)				2144,10

A radiação solar disponível em Faro é maior que em Lisboa e em Porto principalmente pelo facto do índice de claridade ser maior em Faro. O I_β^m será utilizado para calcular a energia elétrica produzida pelos painéis solares fotovoltaicos.

3.5 Dimensionamento teórico do sistema

Visto que a autossuficiência não é possível sem a utilização de baterias, realizou-se o dimensionamento apresentado a seguir buscando o autoconsumo, ou seja, a energia produzida pelo sistema fotovoltaico é consumida pelo equipamento de ventilação e nas horas em que não há sol, ou quando a energia produzida não é suficiente para o funcionamento dos equipamentos, a energia é consumida da rede elétrica. No caso de

existir excedente de energia produzida, a mesma é injetada na rede elétrica do edifício para o consumo de outros equipamentos. Dessa forma, toda energia produzida pelos módulos fotovoltaicos é consumida. No dimensionamento, não foram contabilizadas as perdas devido ao sombreamento, uma vez que variam de projeto para projeto. A metodologia de dimensionamento de sistemas para autoconsumo é a mesma de sistemas ligados a rede apresentada na seção 2.3.9.3.

Os cálculos apresentados a seguir são realizados para o equipamento ECOEVO HE EC 10, a análise dos demais equipamentos está presente no anexo 6.3 e seguem a mesma metodologia de cálculo. O dimensionamento dos demais componentes do sistema é realizado posteriormente a seleção do painel solar. O estudo de viabilidade é realizado na cidade com menor radiação solar disponível (Porto), desse modo, será selecionado o painel solar na situação menos favorável analisada.

3.5.1 Número de módulos fotovoltaicos

A primeira etapa da análise de viabilidade visa selecionar o painel solar fotovoltaico com a melhor relação custo benefício, dentre os seis disponíveis no orçamento. Com o consumo elétrico da unidade ECOEVO HE EC 10 obtido na seção 3.5, é possível saber a quantidade de módulos fotovoltaicos necessários para suprir as necessidades energéticas diárias do equipamento. Para isso, utiliza-se consumo de pico do equipamento, ou seja, a energia consumida quando o uso é de 100%.

O número de painéis é obtido através da divisão da potência de pico do equipamento pela potência do painel solar fotovoltaico. O arredondamento é sempre feito para o maior valor aproximado. A quantidade de painéis fotovoltaicos para unidade ECOEVO HE EC 10 está presente na tabela 22.

Tabela 22 – Quantidade de painéis fotovoltaicos para unidade ECOEVO HE EC 10.

Módulos	ME60-250	ME60-265	SW 260	SW 290	SW 300	P60-250
Quantidade	2	2	2	1	1	2

Definido o número de módulos fotovoltaicos, verificou-se, através das características técnicas dos inversores e dos painéis solares (anexo 6.1), se a corrente elétrica gerada pelos módulos é a necessária para o funcionamento dos motores.

O inversor APS 500W, quando conectado a dois painéis solares em paralelo, gera corrente elétrica de até 2,17 A com tensão de 230 V. O micro inversor ABB 300W, quando conectado a um painel solar, gera corrente elétrica de até 1,3 A com tensão de 230 V.

Da análise dos dados técnicos das unidades de ventilação com recuperação de energia, fornecidos pela ARFIT e presentes na tabela 11, tem-se que as configurações dimensionadas para a ECOEVO HE EC 10 atendem os requisitos elétricos para o funcionamento dos motores dos ventiladores quando o consumo é máximo.

A quantidade de painéis fotovoltaicos para as demais unidades está presente no anexo 6.2.

3.5.2 Seleção do modelo do painel fotovoltaico

Com a quantidade de painéis fotovoltaicos necessária para o autoconsumo do equipamento de recuperação de energia definido e com o consumo de energia anual e a radiação solar disponível, é possível calcular a energia ideal e a energia real produzida pelos módulos fotovoltaicos.

O cálculo da energia diária média mensal ideal produzida por cada painel solar fotovoltaico foi realizada nos seguintes passos:

- Determinação das horas de Sol equivalente, através da equação 41, utilizando os valores de I_{β}^{dm} disponíveis na tabela 19;
- Determinação do fator de correção de temperatura, através da equação 42, utilizando a temperatura média dos módulos calculada pela equação 28 com a temperatura média ambiente disponível na tabela 18 e com o γ fornecido por cada fabricante dos painéis fotovoltaicos (anexo 6.1);
- Cálculo da energia diária média mensal ideal através da equação 40.

O valor de E_{ideal}^{dia} foi multiplicado pelo número de dias de cada mês para obter a energia produzida mensalmente, por fim, a somatória da energia produzida em cada mês é a energia produzida anualmente por cada painel solar fotovoltaico.

A energia real produzida diariamente é determinada através da equação 43, multiplicando a energia ideal pelo índice de performance (eficiência do inversor multiplicada pela eficiência dos cabos). De acordo com a seção 2.3.9.3.3, assumiu-se o valor de 3% de perdas nos cabos, ou seja, eficiência de 97% e a eficiência dos inversores (vide anexo 6.1) é de 95%.

A energia real gerada pelos módulos é consumida pelo equipamento nas horas em que há consumo, e nas horas em que não há, o excedente é injetado na rede elétrica do edifício para ser consumida por outros equipamentos. A partir dessa hipótese, considera-se que toda energia gerada pelo sistema fotovoltaico será consumida. A figura 35 mostra a produção mensal real de energia versus o consumo mensal de energia da unidade ECOEVO HE EC 10.

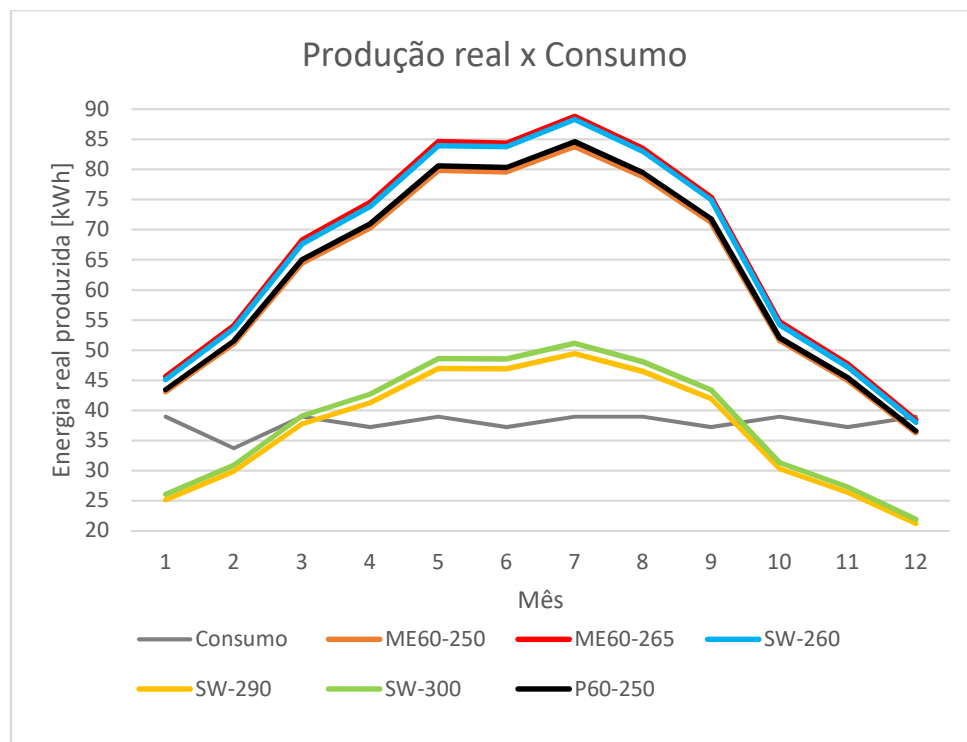


Figura 35 – Produção de energia real versus consumo ECOEVO HE EC 10.

O consumo mensal foi calculado através da multiplicação do consumo diário pelo número de dias úteis de cada mês. Através da figura 35, observa-se que os painéis SW-290 e SW-300 produzem menos energia do que o consumido entre outubro e março, já os outros painéis apenas não produzem mais do que o consumido no mês de dezembro. O excesso de energia produzido pelos painéis é injetado na rede.

O cálculo do período de amortização, equação 48, envolve o investimento inicial e o retorno anual. O primeiro é relativo aos custos de implementação do sistema fotovoltaico e o segundo é relativo a economia gerada pela produção de energia para o autoconsumo.

O retorno anual é calculado com base nos preços no mercado liberalizado de energia elétrica e gás natural em Portugal continental disponibilizado pela Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE). Para efeito de cálculo, foi selecionada a potência contratada de 10,35 kVA, bi-horário, com custo de 0,1981 €/kWh. Ao valor da energia deve ser adicionado 23% equivalente ao Imposto sobre Valor Acrescentado (IVA) que se aplica em Portugal, ou seja, o valor final utilizado para o cálculo é de 0,2437 €/kWh.

O cálculo do custo do sistema fotovoltaico levou em consideração o preço do painel fotovoltaico, o custo dos inversores e o custo do sistema de fixação. Foi ainda adicionado um valor de 100 € para as cabalagens e outros custos necessários.

Na tabela 23 estão presentes os valores da energia ideal e real anual produzida pelos seis módulos fotovoltaicos com a quantidade de painéis ideal para o autoconsumo da unidade de ventilação com recuperação de energia ECOEVO HE EC 10. A escolha dos inversores foi feita com base no apresentado na seção 2.3.9.3.2, em que a potência nominal do inversor deve estar no intervalo de 0,7 a 1,2% da potência do módulo fotovoltaico. Com exceção dos módulos SW 290 M e 300 M em que foram utilizados um inversor ABB Micro 0.3, foram utilizados um inversor APS 500W a cada dois painéis.

Tabela 23 – Energia produzida pelos módulos fotovoltaicos para ECOEVO HE EC 10.

ECOEVO HE EC 10	Nº painéis	E_{ideal}^{ano} (kWh/ano)	E_{real}^{ano} (kWh/ano)	Economia (€)	Custo do sistema (€)	Amortização (anos)
ME60-250	2	819,23	754,92	183,97	965,31	5,25
ME60-265	2	868,39	800,22	195,01	987,45	5,06
SW 260 P	2	861,12	793,52	193,38	1047,53	5,42
SW 290 M	1	481,52	443,72	108,13	884,6	8,18
SW 300 M	1	498,13	459,02	111,86	913,77	8,17
P60-250	2	826,86	761,95	185,69	989,91	5,33

A partir da análise dos dados obtidos para o período de amortização dos sistemas solares para a unidade ECOEVO HE EC 10 observa-se que os módulos ME60-250, ME60-265, SW 260P e P60-250 possuem período de amortização e custo estimado do sistema semelhantes, sendo o painel da fabricante Open Renewables ME60 de 265 Wp com menor período de amortização. Devido ao elevado custo dos painéis e do inversor, os sistemas com os módulos SW 290M e 300M, mesmo possuindo um painel a menos que os outros, possuem taxa de amortização significativamente maior.

3.5.2.1 ECOEVO HE EC 16, 23, 39 e 54

A seguir, serão apresentados os resultados de amortização para as unidades de recuperação de energia ECOEVO EC HE 16, 23, 39 e 54. A metodologia adotada de cálculo é a mesma adotada para a unidade HE EC 10. O resultado das contas de produção de energia ideal e real, economia e custo e configuração do sistema estão presentes no anexo 6.3.

Tabela 24 – Período de amortização ECOEVO HE EC 16, 23, 39 e 54.

Amortização (anos)	HE EC 16	HE EC 23	HE EC 39	HE EC 54
ME60-250	4,40	4,40	4,39	4,12
ME60-265	4,26	4,26	4,26	4,08

Tabela 24 - Período de amortização ECOEVO HE EC 16, 23, 39 e 54, continuação.

Amortização (anos)	HE EC 16	HE EC 23	HE EC 39	HE EC 54
SW 260 P	4,61	4,61	4,60	4,43
SW 290 M	6,27	4,74	4,50	4,58
SW 300 M	6,32	4,85	4,62	4,74
P60-250	4,49	4,49	4,48	4,22

Da tabela 24, observa-se que o painel ME60-265 apresentou o melhor período de amortização para todas as outras unidades ECOEVO HE EC.

A partir dos resultados obtidos nas tabelas 23 e 24, concluiu-se na primeira etapa da análise da viabilidade que o painel solar fotovoltaico Open Renewables ME60-265 possui o melhor custo benefício entre os orçados, logo, será o painel utilizado no restante da análise realizada no projeto.

3.5.3 Validação dos resultados

Os resultados obtidos através da metodologia de cálculo apresentada nas seções anteriores foram validados através do programa SCE.ER, versão 1.5, disponibilizado pela Direção Geral de Energia e Geologia de Portugal. Comparado os dados simulados com os dados calculados, obteve-se valores em média superiores de 2,79% a mais na produção de energia calculada e por consequência, uma taxa de amortização 2,76% inferior nos resultados calculados. A figura 36 mostra a comparação da energia anual real simulada e calculada da unidade de ventilação com recuperação de calor ECOEVO HE EC 10

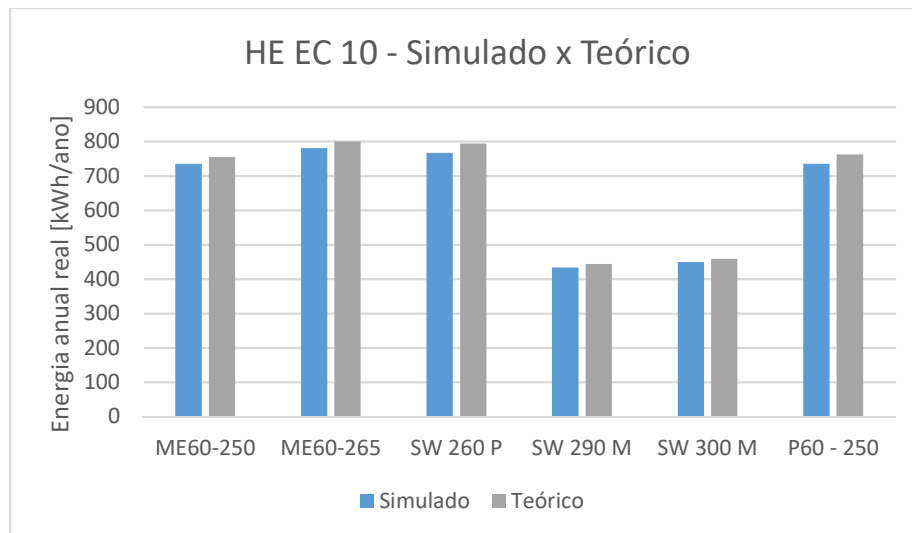


Figura 36 – Energia anual real simulada vs. Teórica – ECOEVO HE EC 10.

As diferenças existentes entre os dados calculados e os dados simulados se devem, possivelmente, a diferença de base de dados meteorológicas utilizadas e as perdas energéticas consideradas ao longo do processo.

Como a diferença percentual não tem representação significativa nos resultados obtidos, consideram-se validados os cálculos. Os resultados obtidos para a simulação das unidades ECOEVO HE EC 16, 23, 39 e 54 estão presentes no anexo 6.4.

3.6 Otimização do sistema

O painel solar fotovoltaico com o menor período de amortização foi selecionado considerando o número ideal de módulos para suprir o consumo energético de pico das unidades de ventilação com recuperação de energia. Nessa seção, é realizado o estudo para verificar se a quantidade de painéis previamente definida na seção 3.5.1 é a com melhor relação custo benefício para a empresa e seus clientes. Também, decidiu-se junto a empresa, que, por motivos de logística de estoque, será utilizado apenas um modelo de inversor, o APS 500W. A utilização deste modelo de inversor, mesmo quando utilizado com apenas um módulo fotovoltaico de 265 Wp, não aumenta os custos do projeto e o período de amortização de forma significativa.

A análise foi realizada com a mesma metodologia apresentada na seção anterior para a unidade ECOEVO HE EC 10, contudo, calculou-se o período de amortização do sistema com um painel a menos e um painel a mais do que o ideal para o modelo ME60-265. A

análise foi realizada para as três cidades escolhidas (Porto, Lisboa e Faro) e está presente na tabela 25.

Tabela 25 – Amortização para os diferentes sistemas analisados.

Cidade	Nº de painéis	E_{real}^{ano} (kW/ano)	Economia (€)	Custo do sistema (€)	Amortização (anos)
Porto	1	400,11	97,51	666,88	6,84
	2	800,22	195,01	991,45	5,08
	3	1200,33	292,52	1348	4,61
Lisboa	1	487,28	118,75	666,88	5,62
	2	974,56	237,50	991,45	4,17
	3	1461,84	356,25	1348	3,78
Faro	1	537,65	131,03	666,88	5,09
	2	1075,30	262,05	991,45	3,78
	3	1612,95	393,08	1348	3,43

Para a configuração com um módulo solar, a energia média mensal produzida é inferior a energia consumida durante seis meses do ano, com isso, a economia de energia diminui e conseqüentemente o período de amortização aumenta. A energia média mensal produzida para a configuração do sistema com três módulos fotovoltaicos é muito superior a energia consumida ao longo do ano, sendo assim, o sistema pode ser considerado superdimensionado. O sistema composto por dois painéis solares fotovoltaicos tem produção de energia média mensal acima do consumo energético do equipamento durante o ano inteiro, sendo assim, a configuração ideal para o sistema.

O gráfico apresentado na figura 37 compara a energia real produzida mensalmente, para cada configuração apresentada na tabela 25, com o consumo energético mensal da unidade de ventilação ECOEVO HE EC 10 para a cidade do Porto.

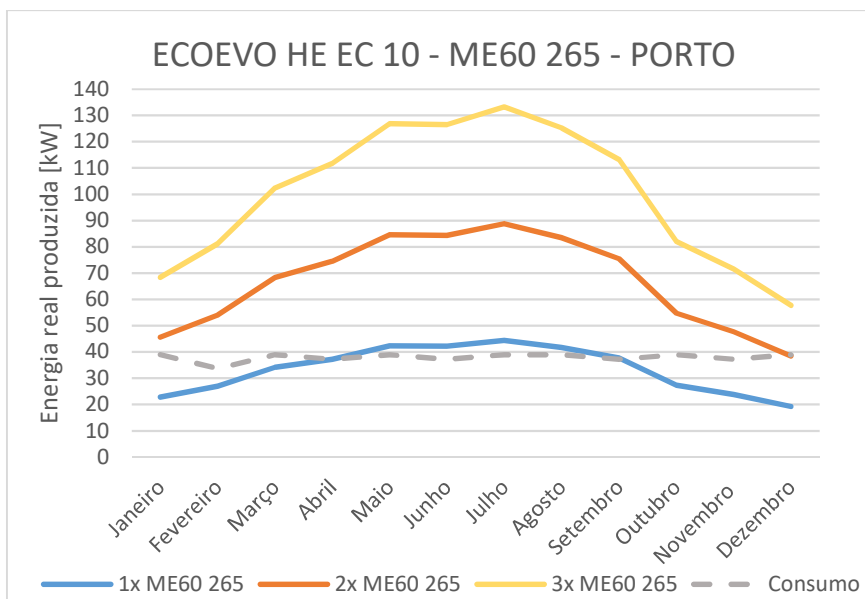


Figura 37 – Produção de energia com diferentes configurações do sistema.

Na figura 37, é visto que no sistema composto por dois módulos fotovoltaicos a energia gerada é sempre maior que a consumida. Contudo, não é verdadeiro afirmar que, devido a isso, o sistema é autossuficiente. Em consequência do padrão de referência de ocupação em escritórios, a utilização do equipamento nas horas em que há maior produção de energia é baixa, sendo a energia excedente injetada na rede do edifício para ser consumida por outros equipamentos, além disso, fatores climáticos podem influenciar na produção de energia. Para melhorar a visualização do efeito comentado acima, calculou-se a energia real produzida hora a hora utilizando os dados horários do índice de claridade e temperatura disponíveis na base de dados do software PVSyst 6.0.2. A metodologia de cálculo é a mesma apresentada na seção 3.5. A figura 38 mostra a comparação do consumo diário com a produção hora a hora nos solstícios e equinócios na cidade do Porto.

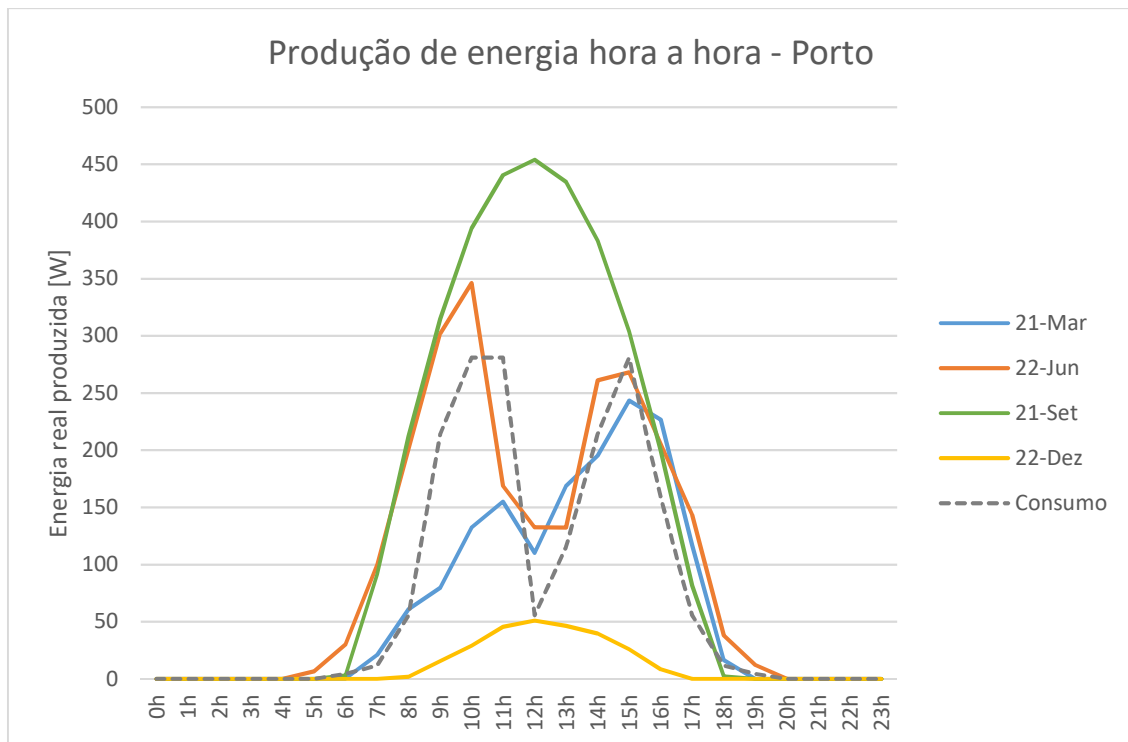


Figura 38 – Produção de energia hora a hora na cidade do Porto.

Através da comparação da energia produzida em diferentes dias do ano, apresentada na figura 38, percebe-se que a produção energética dos módulos fotovoltaicos é irregular, variando de acordo com as condições meteorológicas do dia. No dia 21 de setembro (equinócio de outono) a produção durante o dia é maior que o consumo. Nos dias 22 de junho (solstício de verão) e 21 de março (equinócio de primavera) a produção de energia varia ao longo do dia e por último, no dia 22 de dezembro (solstício de inverno) a produção de energia é sempre inferior ao consumo da unidade de ventilação. Fatores como a temperatura, a velocidade do vento e, principalmente o índice de claridade tem influência direta na produção de energia. Com isso, conclui-se que, é necessário que a unidade de ventilação com recuperação de energia esteja conectada a rede de energia elétrica, para que funcione nos períodos em que os módulos fotovoltaicos não forneçam a energia necessária.

3.6.1 ECOEVO HE EC 16, 23, 39 e 54

A mesma análise foi realizada para as unidades ESCOEVO HE EC 16, 23, 39 e 54, os cálculos estão presentes no anexo 6.5 e os resultados na tabela 26.

Tabela 26 – ECOEVO HE EC 16, 23, 39 e 54 para a cidade do Porto.

ECOEVO HE EC	16	23	39	54
Nº de painéis	3	3	5	5
Amortização (anos)	4,89	4,89	4,32	4,32

Para as unidades ECOEVO HE EC 16 e 23, optou-se por reduzir em uma unidade a quantidade de painéis solares fotovoltaicos, visto que, com um módulo a menos, o investimento inicial é menor e o período de amortização não aumenta significativamente (aumento de aproximadamente 14%). Devido ao artigo 4.º, da seção I do Decreto-Lei n.º 153/2014, as unidades para autoconsumo cuja potência instalada seja superior a 200 W e igual ou inferior a 1,5 kW estão sujeitas a mera comunicação prévia aos órgãos competentes. Dessa forma, as unidades ECOEVO HE EC 39 e 54 foram limitadas a apenas 5 painéis cada para não ultrapassar o limite de 1,5 kW, com o isso, o período de amortização teve um acréscimo de 1,41% para a unidade ECOEVO HE EC 39 e 5,88% para a ECOEVO HE EC 54.

A redução do número de módulos fotovoltaicos nas unidades ECOEVO HE EC 16, 23, 39 e 54 em relação ao número teórico ideal calculado para autoconsumo presente no anexo 6.2, faz com que a corrente elétrica disponível nas horas de máxima produção de energia elétrica não seja suficiente para manter os motores dos ventiladores em funcionamento nas horas de máxima utilização. Para solucionar esse problema, as unidades de ventilação com recuperação de energia estarão sempre conectadas à rede elétrica do edifício, desse modo, quando a corrente elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos não for suficiente, o inversor utilizará a energia da rede para suprir as necessidades de corrente elétrica.

3.6.2 Dimensionamento do inversor

Com as configurações de cada conjunto (unidade de ventilação mais sistema fotovoltaico) definidas, dimensionou-se o inversor para verificar se as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante foram respeitadas.

A relação de potências, o número máximo de módulos para máxima e mínima tensão e o número de fileiras foram calculados de acordo com o apresentado na secção 2.3.9.3.2 através das equações 29, 30, 33 e 36. Os resultados estão presentes na tabela 27.

Tabela 27 – Dimensionamento inversor.

Relação de Potências	85,48%
$0,7P_{FV} < P_{max}^{INV} < 1,2P_{FV}$	
N_{max}	7
N_{min}	6
$N_{Fileira}$	2

Nos cálculos, considerou-se dois módulos fotovoltaicos conectados ao inversor. A relação de potências está de acordo com o normatizado. O número painéis máximo de módulos conectados quando em máxima e mínima tensão e o número de fileiras também estão de acordo com as características técnicas do fabricante. Assim, o sistema é válido.

3.6.3 Dimensionamento dos cabos elétricos

O dimensionamento dos cabos elétricos do sistema solar fotovoltaico é dividido em três partes: o cálculo da secção dos cabos de fileira, secção dos cabos de corrente contínua e secção dos cabos de corrente alternada.

De acordo com GreenPro (2004), secção 2.3.9.3.3, os cabos de corrente contínua devem ser vermelhos para o contacto positivo e pretos para o contacto negativo. Já os cabos elétricos de corrente alternada devem ser azuis para o contacto neutro, verde-amarelo para a ligação terra e castanho ou outra cor que não as mesmas já utilizadas para a outra fase. Os materiais mais utilizados como condutores elétricos são o cobre e o alumínio.

O procedimento de calculo está presente na secção 2.3.9.3.3 e segue os seguintes passos.

- Determinar o comprimento de cada cabo elétrico;

- Determinar a corrente suportada pelo cabo da fileira ($I_{nFileira} = 1,25I_{SC}$);
- Determinar a corrente nominal do fusível ($I_{nFusível} \geq 1,25 I_{nFileira}$);
- Determinar a secção transversal dos cabos de fileira através da equação 37;
- Determinar a secção transversal dos cabos de corrente contínua através da equação 38;
- Determinar a secção transversal dos cabos de corrente alternada através da equação 39;

Os cabos elétricos de cobre ($\kappa = 56 \text{ m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$) foram dimensionados para o conjunto de dois painéis fotovoltaicos e um inversor, como os comprimentos dos cabos variam de acordo com cada projeto, estipulou-se valores apenas para fins demonstrativos ($L_{fi} = 5 \text{ m}$, $L_{CC} = 2 \text{ m}$, $L_{CA} = 30 \text{ m}$). Os resultados e os dados utilizados para os cálculos estão presentes na tabela 28.

Tabela 28 – Dimensionamento dos cabos elétricos.

$I_{SC} (2x)$	18,6 A
$V_{MP} (2x)$	61 V
$I_{n ger}$	8,6 A
$I_{n inv(CA)}$	2,17 A
$I_{nFileira}$	23,25 A
$I_{nFusível}$	29,06 A
S_{Fi}	6,81 mm ²
S_{CC}	2,00 mm ²
$S_{CA(mono)}$	0,27 mm ²

O valor do fator de perda ($FP = 0,01$), das perdas nas linhas ($P_M = 0,01$) e do fator de potência ($\cos\varphi = 0,8$) foram utilizados de acordo com o apresentado por Greenpro (2014). A potência nominal dos geradores fotovoltaicos (P_{FV}) é de 265 W e a tensão nominal da rede (V_n) é de 230 V.

Os valores obtidos devem ser arredondados para o maior valor aproximado das secções nominais de cabos Standard.

Segundo as Regras Técnicas de Instalações Elétricas de Baixa Tensão (RTIEBT) da Direção Geral de Energia, as secções dos condutores de fase nos circuitos de corrente alternada e dos condutores ativos nos circuitos de corrente contínua não devem ser inferiores a $1,5 \text{ mm}^2$ para o material condutor cobre quando a utilização do circuito for para potência.

3.7 Sistema ECOEVO HE EC 10

O sistema solar fotovoltaico para autoconsumo dimensionado para a unidade de ventilação com recuperação de calor ECOEVO HE EC 10 é composto por dois módulos do modelo ME60-265 fotovoltaicos da Open Renewable, um inversor YC500 A da empresa APS e um suporte PM 1-2. O sistema possui período de amortização de 5,08 anos, com baixo nível de manutenção e ótima relação custo/benefício. Na figura 39 está presente a representação esquemática simplificada do sistema.

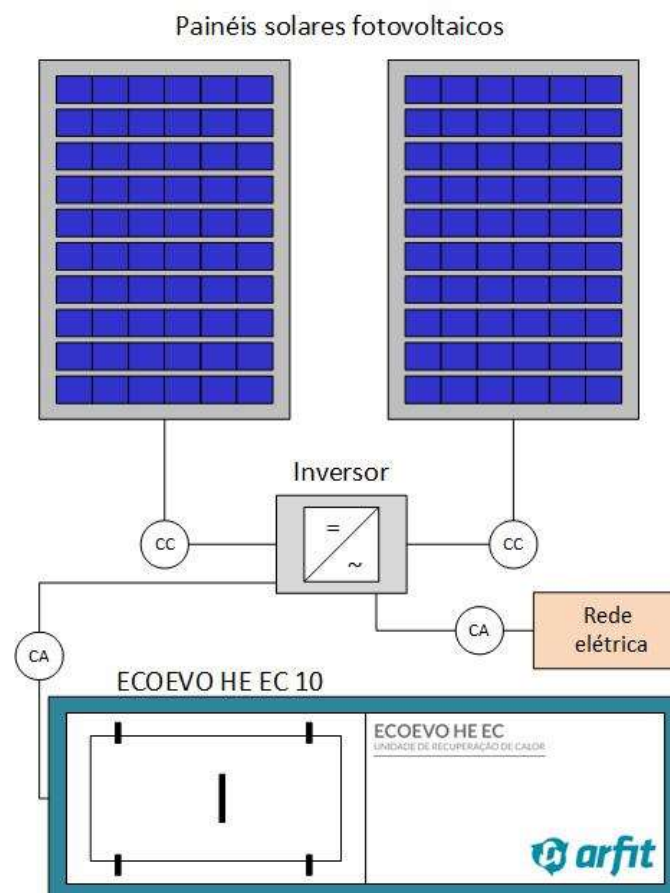


Figura 39 - Representação esquemática simplificada do sistema solar para autoconsumo da ECOEVO HE EC 10.

A unidade de ventilação com recuperação de calor é conectada ao sistema fotovoltaico e a rede de energia do edifício, uma vez que o sistema solar fotovoltaico não torna o equipamento autónomo.

3.8 Estudo de viabilidade para o sistema stand-alone

O dimensionamento do sistema stand-alone, ou não conectado a rede, tem como objetivo principal verificar o aumento no período de amortização do sistema. A análise realizada é simples e não visa projetar o sistema stand-alone de forma completa, para isso, estudos mais complexos devem ser realizados. A metodologia de cálculo utilizada é a apresentada por Pereira (2013), presente na 2.3.9.4.

O estudo foi realizado para a unidade ECOEVO HE EC 10 e utiliza o mesmo módulo solar fotovoltaico escolhido na secção anterior (ME60-265). O dimensionamento seguiu as seguintes etapas: determinação das perdas, potência do sistema, dimensionamento da bateria e dimensionamento do regulador de carga, dimensionamento do inversor.

Primeiramente, calculou-se as perdas existentes no sistema através dos cabos elétricos (F_c) e da conversão de energia (F_{conv}). Considerou-se as perdas pelos cabos elétricos igual a 3% e a eficiência de conversão foi obtida através do manual técnico do painel solar fotovoltaico. Com as perdas calculadas, determinou-se a potência (P_{PV}) necessária, através da equação 45, para manter a unidade de ventilação com recuperação de energia funcionando de forma autónoma. O consumo total diário (W_D) está disponível na tabela 14. Utilizou-se o valor mensal mais baixo das horas de sol (H_s) para a cidade do Porto, dessa forma, projetou-se o sistema para a situação menos favorável. Os valores calculados estão presentes na tabela 29.

Tabela 29 – Potência do sistema fotovoltaico não conectado a rede.

F_c	0,97
F_{conv}	0,838
H_s inverno	2,595 h/dia
P_{PV}	831,53 Wp

O número de módulos fotovoltaicos necessários para suprir o consumo diário da unidade de ventilação é obtido através da divisão da potência do sistema (P_{PV}) pela potência de pico do módulo. Para o sistema estudado, o número de painéis fotovoltaicos é quatro, uma vez que o valor deve ser sempre arredondado para o maior número.

O dimensionamento da bateria segue os seguintes passos: cálculo da corrente consumida diariamente (I_{sist}), determinação do número de dias de reserva (N_D) no caso de não haver produção de energia solar, obtenção da profundidade de descarga ($K_{desc.}$) e da eficiência da bateria ($K_{bat.}$) e por fim, a capacidade de carga da bateria ($C_{Bat (Ah)}$).

A I_{sist} é obtida através da divisão do consumo total diário da unidade de ventilação pelo (W_D) número de horas do dia, o resultado é obtido em ampere-hora (Ah). Os valores de $K_{desc.}$ e $K_{bat.}$ utilizados nos cálculos são os valores genéricos para as baterias de Chumbo/ácido apresentados por Pereira (2013). O número de dias de reserva de energia no caso de não haver produção de energia elétrica pelos painéis solares foi definido como três. Calculou-se a capacidade de carga da bateria através da equação 46, os resultados estão presentes na tabela 30. O dimensionamento do controlador de carga deve ser feito de maneira que suporte a corrente nominal do circuito ($I_{máx CC}$), que é obtida através da equação 47, pela multiplicação da corrente na potência máxima do painel fotovoltaico (I_{MP}) pelo número de fileiras de módulos ($N_{fileiras}$), os resultados estão presentes na tabela 30.

Tabela 30 – Capacidade de carga da bateria e corrente Máxima do controlador de carga.

I_{sist}	72,69 Ah
$K_{desc.}$	0,6
$K_{bat.}$	0,65
N_D	3 dias
$C_{Bat (Ah)}$	559,12 Ah
$N_{fileiras}$	4
I_{MP}	8,7 A
$I_{máx CC}$	34.8 A

Com a capacidade de carga calculada, determinou-se o modelo da bateria utilizada no sistema. Segundo Jäger et. al (2014), para sistemas com potência menores que 1500 W se utiliza baterias de 12 V, sendo as de Chumbo/ácido as mais comuns em sistemas fotovoltaicos devido a maturidade no mercado e por apresentar a melhor relação custo-benefício. Contudo, são maiores, mais pesadas e sofrem envelhecimento. A bateria selecionada é a Rolls S-260 com 12 V e 200 Ah, para o sistema proposto são utilizadas três unidades. O regulador de carga selecionado com base na corrente máxima e na potência do conjunto de painéis solares fotovoltaicos, o modelo selecionado foi o FM-80 da empresa Outback Power.

Realizou-se o dimensionamento do inversor de acordo com o apresentado na secção 2.3.9.4.5, utilizando o consumo de pico da unidade ECOEVO HE EC 10 como referência. O modelo selecionado foi o AJ 500-12 da empresa Studer.

Na tabela 31, estão presentes os dados relativos a amortização do sistema. A energia e gerada pelos painéis fotovoltaicos, a economia que o sistema proporciona e o período de amortização foram calculados com a mesma metodologia utilizada para o sistema de autoconsumo.

Tabela 31 – Amortização do sistema off-grid para ECOEVO HE EC 10 na cidade do Porto.

Energia produzida	1600,43 kW/ano
Economia	390,02 euros
Módulo ME60-265 (4x)	782,28 euros
Suporte Pole Mount 1-4	364,08 euros
Inversor AJ 500-12	582,71 euros
Controlador de carga FM-80	711,66 euros
Bateria Rolls S-260 (3x)	1466,19 euros
Cabos e outros	100 euros
Custo total do sistema	4006,92 euros
Amortização	10,27 anos

O período de amortização do sistema fotovoltaico para a unidade ECOEVO HE EC 10 dobra com a utilização de acumuladores de energia, chegando ao período de 10 anos.

O aumento no período de amortização tem como principal causa o alto custo das

baterias e do controlador de carga utilizado no sistema. Além disso, o sistema stand-alone requer maior manutenção do que o sistema solar fotovoltaico para autoconsumo. Desse modo, não é viável a utilização do sistema fotovoltaico não conectado a rede para o objetivo proposto pela empresa.

O estudo simplificado do sistema não conectado a rede mostra que é possível energizar a unidade de ventilação com recuperação de energia apenas com a energia gerada pelos módulos fotovoltaicos, sendo uma possível aplicação do sistema a utilização em regiões onde há a necessidade de ventilação, contudo, não há energia elétrica ou o seu acesso é difícil.

A figura 40 apresenta uma representação esquemática simplificada do sistema stand-alone para a unidade ECOEVO HE EC 10.

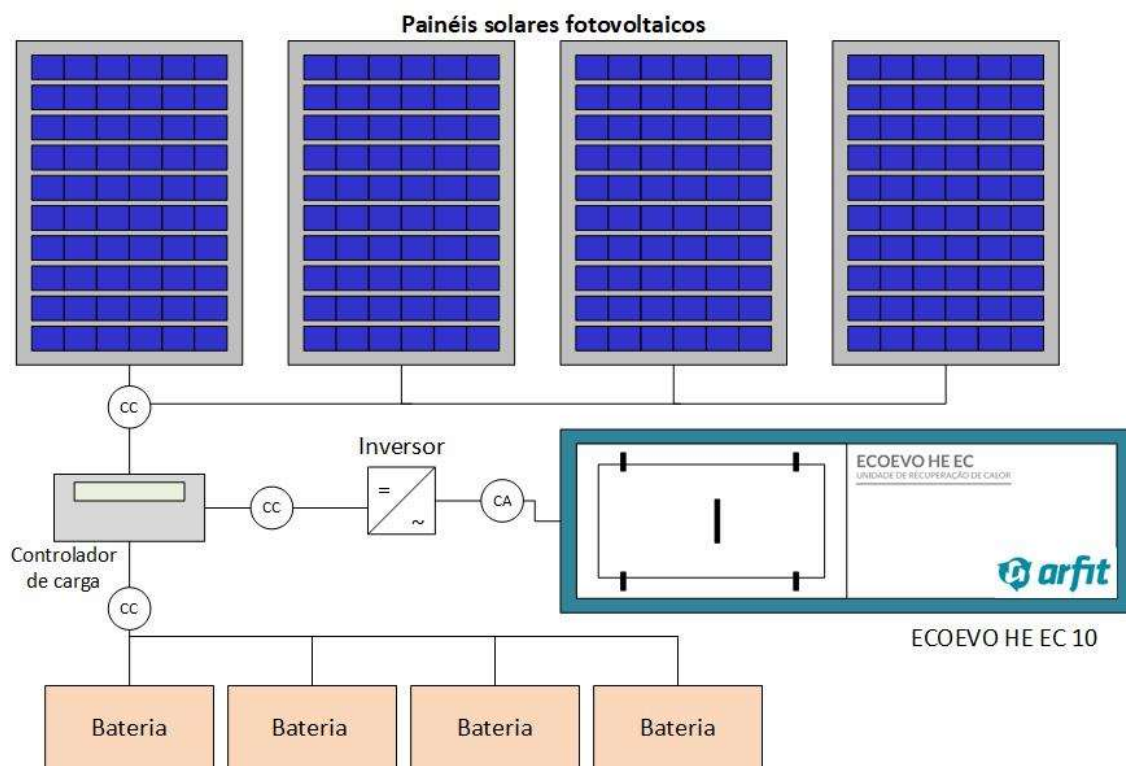


Figura 40 – Representação esquemática simplificada do sistema solar stand-alone para ECOEVO HE EC 10.

CONCLUSÕES

4.1 CONCLUSÕES

4.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 CONCLUSÕES

Através da análise da eficiência energética e a viabilidade de implementação de painéis solares fotovoltaicos nas unidades de ventilação com recuperação de energia ECOEVO HE EC, comercializadas pela empresa ARFIT, conclui-se que:

- Devido ao perfil de consumo e as condições meteorológicas das cidades escolhidas, a energia elétrica gerada pelos painéis solares fotovoltaicos não torna as unidades ECOEVO HE EC autossuficientes;
- A autossuficiência só é obtida para o sistema estudado com a utilização de acumuladores de energia;
- A implementação dos módulos solares fotovoltaicos na gama de unidades de ventilação com recuperação de energia ECOEVO HE EC é viável quando o sistema é dimensionado para autoconsumo;
- A utilização de um sistema stand-alone (não conectado a rede) não é viável para os objetivos propostos pela empresa devido ao longo período de amortização e a manutenção gerada pelo sistema.

Pode se afirmar que o projeto desenvolvido cumpriu os objetivos propostos pela empresa, uma vez que o estudo mostrou ser viável economicamente a implementação de módulos fotovoltaicos com o objetivo de gerar energia elétrica para o acionamento dos motores dos ventiladores das unidades ECOEVO HE EC quando o sistema é projetado para o autoconsumo. Sendo uma ótima opção ao cliente devido ao baixo período de amortização e a baixa manutenção gerada pelo sistema.

4.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Como proposta de trabalhos futuros, sugere-se a continuidade dos estudos através da implementação do sistema para realização de testes práticos, comparando assim os dados obtidos através das medições da produção de energia dos painéis solares fotovoltaicos e do consumo energético das unidades de ventilação com recuperação de energia com os resultados teóricos neste trabalho.

Também sugere-se como proposta de trabalhos futuros, o estudo da viabilidade de implementação do sistema em outros equipamentos comercializados pela empresa.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

ABB. **Microinverter – 0.25/0.3 – I – OUTD**. Disponível em: <https://library.e.abb.com/public/3b4b2359a4986e2685257dff005e1834/MICRO-0.25-0.3-0.3HV-Rev0.1.pdf>. Acesso em:

APS. **YC500A Microinverter**. Disponível em: <https://usa.apsystems.com/solar-microinverters/>. Acesso em: 05 de maio de 2015

ARFIT. **Catálogo de Produtos Arfit 2017/2018**. Disponível em: <http://www.arfit.pt/>, acesso em: 02 de março de 2017

ARFIT. **ECOevo HE EC: Unidade de Recuperação de Calor**. Disponível em: <http://www.arfit.pt/>, acesso em: 02 de março de 2017

ARNUF JÄGER-WALDAU; **PV Status Report 2016**; EUR 28159 EN; doi: 10.2790/682995

ASHRAE. Hanbook: **HVAC Systems and Equipment (SI)**. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Inc., Atlanta, 2012

ASHRAE. Hanbook: **HVAC Systems and Equipment (SI)**. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Cap 26. Inc., Atlanta, 2016

COLARES-PEREIRA, M.; RABL, A. **The Average Distribution of Solar Radiation: Correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values**. Solar Energy, Great Britain, vol. 22, pp. 155-164, 1979

COOPER, P. I. **The Absorption of Radiation in Solar Stills**. Solar Energy, Great Britain, vol. 12, pp. 333-346, 1969

Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de Abril. Diário da República N.º 67, 1.ª série. Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações

Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de Agosto. Diário da República N.º 159, 1.ª série. Ministério da Economia e do Emprego

Decreto-Lei n.º 153/2014 de 20 de Outubro. Diário da República N.º 202, 1.ª série. Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia

Despacho n.º 3156/2016 de 1 de março de 2016. Diário da República N.º 42 – 2ª série. Direção-Geral de Energia e Geologia

DGEG. **SCE.ER: Dados e cálculos padronizados para sistemas de aproveitamento de energias renováveis**. Disponível em: <http://www.dgeg.gov.pt/>. Acesso em: 08 de março de 2017

DGEG. **Regras técnicas de instalações elétricas de baixa tensão**. Disponível em: <https://www.certiel.pt/web/certiel/instalacoes-de-utilizacao>. Acesso em: 02 de outubro de 2017

Directiva 2005/32/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 6 de julho de 2005 relativa à criação de um quadro para definir os requisitos de concepção ecológica dos produtos que consomem energia e que altera as Directivas 92/42/CEE do Conselho e 96/57/CE e 2000/55/CE do Parlamento Europeu e do Conselho

Directiva 2009/125/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 21 de outubro de 2009 relativa à criação de um quadro para definir os requisitos de concepção ecológica dos produtos relacionados com o consumo de energia

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. New Jersey: Wiley, 2013

ENVERTECH. **Microinverter Model EVT248**. Disponível em: <http://www.envertec.com/Microinverter/EVT248en.htm>. Acesso em: 05 de maio de 2017

ERSE. **Preços no Mercado Liberalizado de Energia Elétrica e Gás Natural em Portugal continental (14/06/2017)**. Disponível em: http://www.erse.pt/pt/Simuladores/Documents/Pre%C3%A7osRef_BTN.pdf, Acesso em: 19 de junho de 2017

FONDATION NICOLAS HULOT. **Photovoltaic Solar Power: 25% of the world's electricity low-carbon in 2050**. FNH, 2015

GOSWAMI, D. Y. **Principles of Solar Engineering**. 3. Ed. New York: CRC Press, 2015

GREENPRO. **Energia Fotovoltaica: manual sobre tecnologias, projecto e instalação**. Portugal: Portal Energia, 2004

HULD T., MÜLLER R., GAMBARELLA A., 2012. **A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa**. Solar Energy, 86, 1803-1815.

IRENA (2017), **REthinking Energy 2017: Accelerating the global energy transformation**. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

JÄGER, K. et al. **Solar Energy: Fundamentals, Technology, and Systems**. Delft University of Technology, 2014

LABOURET, A.; VILLOZ, M. **Solar Photovoltaic Energy**. 4. Ed. United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2010

LORENTZ. **Pole Mount PM-1-x**. Disponível em: http://www.ffiSolar.com/products/pdf/lorenz_pole_mount_pm_1_6.pdf. Acesso em 05 de maio de 2017

LUXOR. **Eco Line P60/230-250W.** Disponível em: http://www.luxorsolar.com/products/solar_modules/eco_line_60.htm. Acesso em 05 de maio de 2017

MATOS, R. S. **Climatização.** Paraná: UFPR, 2016

MCQUISTON, F. C.; PARKER, J. D. **Heating, Ventilating, and Air Conditioning: analysis and design.** 4. Ed. New York: John Wiley & Sons, 1994

NATURAL RESOURCES CANADA. **Heat Recovery Ventilators.** Canada's Office of Energy Efficiency, 2012. Disponível em: http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/pdf/energystar/HRV_EN.pdf. Acesso em: 03 de junho de 2017

OLIVEIRA FILHO, K. S.; SARAIVA, M. F. O. **Astronomia e Astrofísica.** Porto Alegre: UFRGS, 2014

OPEN RENEWABLES. **Open 2xx – ME60.** Disponível em: <http://www.openrenewables.com/pt-pt/>. Acesso em: 05 de maio de 2017

OUTBACK. **Flexmax FM80 Charge controller.** Disponível em: <http://www.outbackpower.com/outback-products/make-the-power/flexmax-series-charge-controllers/item/flexmax-6080>. Acesso em: 27 de julho de 2017

PATEL, M. R. **Wind and Solar Power Systems.** CRC Press, 1999

PEREIRA, F. **Dimensionamento de um Sistema FV Autónomo para uma moradia unifamiliar.** Renováveismagazine, Portugal, pp. 102- 105, 2013

PINHO, J.T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: CEPTEL-CRESESB, 2014

POLMAN, A. et al. **Photovoltaic materials: present efficiencies and future challenges.** ScienceMag, vol 352, issue 6283, pp. aad4424, abril 2016

Portaria n.º 353-A/2013 de 4 de Dezembro. Diário da República N.º 235 – 1.ª série. Ministérios do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia, da Saúde e da Solidariedade, Emprego e Segurança Social.

Portaria n.º 17-A/2016 de 4 de Fevereiro. Diário da República N.º 24 – 1.ª série. Ministérios do Trabalho, Solidariedade e Segurança Social e Economia.

Protocolo de Quioto: à Convenção sobre Mudança do Clima. Brasília. Ministério da Ciência e Tecnologia. Disponível em: http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/Protocolo_Quito.pdf. Acesso em: 23 de março de 2017

Regulamento (EU) N.º 1253/2014 da Comissão de 7 de Julho de 2014 que aplica a Diretiva 2009/125/CE do Parlamento Europeu e do Conselho no que diz respeito aos requisitos de conceção ecológica das unidades de ventilação.

ROCHA, C. **Manual do Ecodesign: Innovation and eco-design in the ceramic industry.** Portugal, 2011

ROLLS. **Flooded deep cycle batteries S-260.** Disponível em: http://www.rollsbattery.com/renewable_energy/. Acesso em: 27 de julho de 2017

RORIZ, L. **Climatização: concepção, instalação e condução de sistemas.** Alfragide: Edições Orion, 2007

SOLARTERRA. **Energia Solar Fotovoltaica: guia prático.** São Paulo. Disponível em: www.solarterra.com.br. Acesso em: 15 de maio de 2017

SOLARWORLD. **Sunmodule Plus SW 260 Poly.** Disponível em: <https://www.solarworld.de/en/products/sunmodule-plus/>. Acesso em: 05 de maio de 2017

SOLARWORLD. **Sunmodule Plus SW 290/300 Mono.** Disponível em: <https://www.solarworld.de/en/products/sunmodule-plus/>. Acesso em: 05 de maio de 2017

STUDER. **Inverter AJ Series.** Disponível em: <http://www.studer-innotec.com/en/products/aj-series/>. Acesso: 27 de julho de 2017

ŠÚRI M., HULD T.A., DUNLOP E.D. OSSENBRINK H.A., 2007. **Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries.** Solar Energy, 81, 1295–1305, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>.

TROX TECHNIK. **Z-Line filters: Type ZL.** Disponível em: <https://www.trox.de/en/products/filter-elements-and-filter-units-df2fc073994c90b3>. Acesso em: 30 de maio de 2017

TWIDELL, J.; Weir, T. **Renewable Energy Resources.** 2. Ed. Taylor & Francis, 2006.

VIEIRA, C.; ALVES, J.; ROQUE, M. **Manual Prático de Ecodesign.** Portugal: Associação Empresarial de Portugal, 2013

WANG, S. K. **Hanbook of Air Conditioning and Refrigeration.** 2. Ed. New York: McGraw-Hill, 200

WENHAM, S.R. et al. **Applied Photovoltaics.** 2. Ed. Cornwall: FSC, 2007

ANEXOS

6.1 ANEXO A

6.2 ANEXO B

6.3 ANEXO C

6.4 ANEXO D

6.5 ANEXO E

6 ANEXOS

6.1 ANEXO A

No anexo A será apresentada as características técnicas dos painéis fotovoltaicos e dos inversores utilizados na presente dissertação. Maiores informações podem ser encontradas nos websites das fabricantes.

A seguir serão apresentadas as características técnicas em condições normalizadas de teste (STC) dos painéis fotovoltaicos da empresa Open Renewables.

Características técnicas dos painéis solares Open Renewables ME60-250 e ME60-265.
Fonte: Adaptado do catálogo Open Renewables

Fabricante	Open Renewables	
Modelo	ME60	ME60
Potência [Wp]	250	265
Material	Monocristalino	
Comprimento [mm]	1659.5 ± 3	
Largura [mm]	988 ± 3	
V _{mpp} [V]	29.90	30.50
I _{mpp} [A]	8.35	8.70
V _{oc} [V]	36.90	37.90
I _{sc} [A]	8.70	9.30
α (I _{sc}) [%/K]	0.043	
β (V _{oc}) [%/K]	-0.305	
γ (P _{mpp}) [%/K]	-0.432	
T _{NOCT} [°C]	48.0	

A seguir serão apresentadas as características técnicas em condições normalizadas de teste (STC) dos painéis fotovoltaicos da empresa Sunmodule.

Características técnicas dos painéis solares Sunmodule SW-260, SW-290 e SW-300.

Fonte: Adaptado do catálogo Sunmodule

Fabricante	Sunmodule		
Modelo	Plus SW 260	Plus SW 290	Plus SW 300
Potência [Wp]	260	290	300
Material	Policristalino	Monocristalino	
Comprimento [mm]	1675		
Largura [mm]	1001		
V _{mpp} [V]	31.4	31.9	32.6
I _{mpp} [A]	8.37	9.20	9.31
V _{oc} [V]	38.4	39.6	40.0
I _{sc} [A]	8.94	9.75	9.83
α (I _{sc}) [%/K]	0.051	0.070	
β (V _{oc}) [%/K]	-0.31	-0.29	
γ (P _{mpp}) [%/K]	-0.41	-0.39	
T NOCT [°C]	46		

A seguir, serão apresentadas as características técnicas em condições normalizadas de teste (STC) dos painéis fotovoltaicos da empresa Luxor.

Características técnicas dos painéis solares Luxor Eco Line P60.

Fonte: Adaptado do catálogo Luxor

Fabricante	Luxor
Modelo	Eco Line P60
Potência [Wp]	250
Material	Policristalino
Comprimento [mm]	1640
Largura [mm]	992
V _{mpp} [V]	30.75
I _{mpp} [A]	8.14

Características técnicas dos painéis solares Luxor Eco Line P60.

Fonte: Adaptado do catálogo Luxor

Fabricante	Luxor
Voc [V]	37.31
Isc [A]	8.59
α (Isc) [%/K]	0.05
β (Voc) [%/K]	-0.32
γ (Pmpp) [%/K]	-0.45
T NOCT [°C]	45 \pm 2

A seguir, serão apresentadas as características técnicas em condições normalizadas de teste (STC) dos inversores utilizados na presente dissertação.

Características técnicas dos inversores EVT248, Micro-0.3-I-OUTD e YC500AA.

Fonte: Adaptado do catálogo Envertech, ABB e APS

Fabricante	Envertech	ABB	APS
Modelo	EVT248	Micro-0.3-I-OUTD	YC500A
Potência de entrada [W]	Até 300	Até 320	Até 2x 310
Potência de saída [W]	248	300	500
Tensão de saída [V]	220/230/240	180 até 264	240
Corrente máxima de saída [A]	1.07	1.5	2.08
Eficiência [%]	95	95.5	95

A seguir, serão apresentadas as características técnicas em condições normalizadas de teste (STC) dos componentes do sistema solar fotovoltaico stand-alone.

O inversor selecionado para o sistema é o modelo AJ500-12 da empresa Studer.

Características técnicas do inversore Studer AJ 500-12.

Fonte: Adaptado do catálogo Studer – AJ Series

Fabricante	Studer
Modelo	AJ 500-12
Tensão nominal da bateria [V]	12
Potência contínua @25°C [VA]	400
Eficiência máxima [%]	93
Tensão de saída [V]	230

A bateria selecionada no sistema foi S-260 da empresa Rolls.

Características técnicas da bateria S - 260.

Fonte: Adaptado do catálogo Rolls – Flooded deep cycle batteries

Fabricante	Rolls
Modelo	S – 260
Tensão [V]	12
Células	9
Capacidade [Ah]	200

O controlador de carga selecionado para o sistema foi o FM 80, da empresa Out Back Power

Características técnicas do inversor FM 80.

Fonte: Adaptado do catálogo Out Back Power – Flex max

Fabricante	Out Back Power
Modelo	FM 80 – 150 VDC
Tensão nominal da bateria [V]	12
Potência máxima do sist. Solar [W]	1250 W @ 12 V
Corrente máxima de saída [A]	80 @ 40°C

6.2 ANEXO B

O número de painéis fotovoltaicos ideal para o autoconsumo das unidades de recuperação de energia ECOEVO HE EC 16,23,39 e 54 são apresentadas na a seguir. A metodologia de cálculo é a mesma apresentada na seção 3.5.1 para a unidade HE EC 10.

Número de painéis solares fotovoltaicos ideal para as unidades ECOEVO HE EC 16, 23, 39 e 54.

Módulos	HE EC 16	HE EC 23	HE EC 39	HE EC 54
ME60-250	4	4	7	10
ME60-265	4	4	7	9
SW 260 P	4	4	7	9
SW 290 M	3	4	6	9
SW 300 M	3	4	6	8
P60-250	4	4	7	10

6.3 ANEXO C

No anexo C estão presentes a análise teórica da produção e o período de amortização das unidades ECOEVO HE EC 16, 23, 39 e 54. Os valores da energia ideal e real produzida, a economia gerada pelo sistema, o custo do sistema e o período de amortização das unidades ECOEVO HE EC 16, 23, 39 e 54 seguem a mesma metodologia de cálculo demonstrada na seção 3.5.2.

Na tabela a seguir, estão presentes os valores da energia ideal e real anual produzida pelos seis diferentes modelos de módulos fotovoltaicos com a quantidade de painéis ideal para o autoconsumo da unidade recuperadora de energia ECOEVO HE EC 16. Nos módulos ME60-250 e 265, SW 260P e P60-250 foram utilizados um inversor APS 500W a cada dois painéis. Nos módulos SW 290 e 300 M foram utilizados 3 inversores ABB Micro-0.3 para cada painel.

Período de amortização para a unidade ECOEVO HE EC 16.

ECOEVO HE EC 16	N° painéis	E_{ideal}^{ano} (kW/ano)	E_{real}^{ano} (kW/ano)	Economia (€)	Custo do sistema (€)	Amortização (anos)
ME60-250	4	1638.46	1509.84	367.95	1619.06	4.40
ME60-265	4	1736.77	1600.43	390.02	1663.34	4.26
SW 260 P	4	1722.23	1587.04	386.76	1783.5	4.61
SW 290 M	3	1444.57	1331.17	324.41	2034.37	6.27
SW 300 M	3	1494.38	1377.08	335.59	2121.88	6.32
P60-250	4	1653.71	1523.90	371.37	1668.26	4.49

Na tabela a seguir, estão presentes os valores da energia ideal e real anual produzida pelos seis diferentes modelos de módulos fotovoltaicos com a quantidade de painéis ideal para o autoconsumo da unidade recuperadora de energia ECOEVO HE EC 23. Em todos os módulos foram utilizados um inversor APS 500W para cada dois painéis.

Período de amortização para a unidade ECOEVO HE EC 23.

ECOEVO HE EC 23	N° painéis	E_{ideal}^{ano} (kW/ano)	E_{real}^{ano} (kW/ano)	Economia (€)	Custo do sistema (€)	Amortização (anos)
ME60-250	4	1638.46	1509.84	367.95	1619.06	4.40
ME60-265	4	1736.77	1600.43	390.02	1663.34	4.26
SW 260 P	4	1722.23	1587.04	386.76	1783.5	4.61
SW 290 M	4	1926.10	1774.90	432.54	2051.46	4.74
SW 300 M	4	1992.51	1836.10	447.46	2168.14	4.85
P60-250	4	1653.71	1523.90	371.37	1668.26	4.49

Na tabela a seguir, estão presentes os valores da energia ideal e real anual produzida pelos seis diferentes modelos de módulos fotovoltaicos com a quantidade de painéis ideal para o autoconsumo da unidade recuperadora de energia ECOEVO HE EC 39. Nos sistemas com sete painéis solares foi utilizado três inversores APS 500W e um inversor Envertech 250W, nos sistemas com 6 painéis solares foi utilizado 3 inversores APS 500W.

Período de amortização para a unidade ECOEVO HE EC 39.

ECOEVO HE EC 39	Nº painéis	E_{ideal}^{ano} (kW/ano)	E_{real}^{ano} (kW/ano)	Economia (€)	Custo do sistema (€)	Amortização (anos)
ME60-250	7	2867.31	2642.23	643.91	2827.85	4.39
ME60-265	7	3039.35	2800.76	682.55	2905.34	4.26
SW 260 P	7	3013.91	2777.32	676.83	3115.62	4.60
SW 290 M	6	2889.14	2662.35	648.81	2922.64	4.50
SW 300 M	6	2988.77	2754.15	671.19	3097.66	4.62
P60-250	7	2894.00	2666.82	649.90	2913.95	4.48

Na tabela a seguir, estão presentes os valores da energia ideal e real anual produzida pelos seis diferentes modelos de módulos fotovoltaicos com a quantidade de painéis ideal para o autoconsumo da unidade recuperadora de energia ECOEVO HE EC 54. Nos sistemas com dez e com oito painéis foi utilizado cinco e quatro inversores APS 500W respectivamente. Nos sistemas com nove painéis foram utilizados quatro inversores APS 500W mais um inversor Envertech 250W.

Período de amortização para a unidade ECOEVO HE EC 54.

ECOEVO HE EC 54	Nº painéis	E_{ideal}^{ano} (kW/ano)	E_{real}^{ano} (kW/ano)	Economia (€)	Custo do sistema (€)	Amortização (anos)
ME60-250	10	4096.16	3774.61	919.87	3793.1	4.12
ME60-265	9	3907.74	3600.98	877.56	3582.46	4.08
SW 260 P	9	3875.02	3570.83	870.21	3852.82	4.43
SW 290 M	9	4333.72	3993.52	973.22	4455.73	4.58
SW 300 M	8	3985.03	3672.20	894.92	4237.51	4.74
P60-250	10	4134.28	3809.74	928.43	3916.1	4.22

6.4 ANEXO D

No anexo D estão presentes os dados relativos a simulação da produção de energia e do período de amortização das unidades ECOEVO HE EC 16, 23, 39 e 54 utilizando o programa SCE.ER, versão 1.5, disponibilizado pela Direção Geral de Energia e Geologia de Portugal. O conjunto fotovoltaico é o mesmo utilizado nos cálculos presentes no anexo 6.3.

Na tabela a seguir, estão presentes os dados da energia anual real produzida e o período de amortização para as unidades ECOEVO HE EC 16 e 23

Energia anual real simulada e período de amortização ECOEVO HE EC 16 e 23.

ECOEVO	16		23	
Painel	E_{real}^{ano} (kW/ano)	Amortização (anos)	E_{real}^{ano} (kW/ano)	Amortização (anos)
ME60-250	1469	4,52	1469	4,52
ME60-265	1562	4,37	1562	4,37
SW 260 P	1534	4,77	1534	4,77
SW 290 M	1301	6,42	1735	4,85
SW 300 M	1346	6,47	1794	4,96
P60-250	1471	4,65	1471	4,65

Na tabela a seguir, estão presentes os dados da energia anual real produzida e o período de amortização para as unidades ECOEVO HE EC 39 e 54

Energia anual real simulada e período de amortização ECOEVO HE EC 16 e 23.

ECOEVO	39		54	
Painel	E_{real}^{ano} (kW/ano)	Amortização (anos)	E_{real}^{ano} (kW/ano)	Amortização (anos)
ME60-250	2571	4,51	3673	4,24
ME60-265	2733	4,36	3514	4,18
SW 260 P	2685	4,76	3452	4,58

Energia anual real simulada e período de amortização ECOEVO HE EC 16 e 23, continuação.

ECOEVO	39		54	
Painel	E_{real}^{ano} (kW/ano)	Amortização (anos)	E_{real}^{ano} (kW/ano)	Amortização (anos)
SW 290 M	2602	4,61	3904	4,68
SW 300 M	2691	4,72	3588	4,85
P60-250	2574	4,65	3677	4,37

6.5 ANEXO E

No anexo E estão presentes a análise teórica da produção e o período de amortização das unidades ECOEVO HE EC 16, 23, 39 e 54 para a otimização dos sistemas nas cidades de Porto, Lisboa e Faro em Portugal. Os valores da energia ideal e real produzida, a economia gerada pelo sistema, o custo do sistema e o período de amortização seguem a mesma metodologia de cálculo demonstrada na seção 3.5.2.

Na tabela a seguir, estão presentes os valores da energia ideal e real anual produzida pelo módulo fotovoltaico Open Renewables ME60-265W para a unidade de ventilação com recuperação de energia ECOEVO HE EC 16 e 23, utilizando inversores APS 500W.

Amortização para diferente configurações do sistema fotovoltaico para ECOEVO HE EC 16 e 23.

Cidade	Nº de painéis	E_{real}^{ano} (kW/ano)	Economia (€)	Custo do sistema (€)	Amortização (anos)
Porto	3	1200,33	292,52	1429,64	4,89
	4	1600,43	390,02	1663,34	4,26
	5	2000,54	487,53	2105,53	4,32
Lisboa	3	1461,84	356,25	1429,64	4,01
	4	1949,12	475,00	1663,34	3,50
	5	2436,4	593,75	2105,53	3,55
Faro	3	1612,95	393,08	1429,64	3,64
	4	2150,6	524,10	1663,34	3,17
	5	2688,24	655,12	2105,53	3,21

Na tabela a seguir, estão presentes os valores da energia ideal e real anual produzida pelo módulo fotovoltaico Open Renewables ME60-265W para a unidade de ventilação com recuperação de energia ECOEVO HE EC 39, utilizando inversores APS 500W.

Amortização para diferentes configurações do sistema fotovoltaico para ECOEVO HE EC 39.

Cidade	Nº de painéis	E_{real}^{ano} (kW/ano)	Economia (€)	Custo do sistema (€)	Amortização (anos)
Porto	5	2000,54	487,53	2105,53	4,32
	6	2400,65	585,04	2340,46	4,00
	7	2800,76	682,55	2992,98	4,39
	8	3200,87	780,05	3227,91	4,14
Lisboa	5	2436,40	593,75	2105,53	3,55
	6	2923,68	712,50	2340,46	3,28
	7	3410,96	831,25	2992,98	3,60
	8	3898,25	950,00	3227,91	3,40
Faro	5	2688,24	655,12	2105,53	3,21
	6	3225,9	786,15	2340,46	2,98
	7	3763,54	917,17	2992,98	3,26
	8	4301,19	1048,20	3227,91	3,08

Na tabela a seguir, estão presentes os valores da energia ideal e real anual produzida pelo módulo fotovoltaico Open Renewables ME60-265W para a unidade de ventilação com recuperação de energia ECOEVO HE EC 54, utilizando inversores APS 500W.

Amortização para diferentes configurações do sistema fotovoltaico para ECOEVO HE EC 54.

Cidade	Nº de painéis	E_{real}^{ano} (kW/ano)	Economia (€)	Custo do sistema (€)	Amortização (anos)
Porto	5	2000,54	487,53	2105,53	4,32
	8	3200,87	780,05	3227,91	4,00
	9	3600,98	877,56	3670,10	4,39
	10	4001,09	975,07	3903,8	4,14

Amortização para diferentes configurações do sistema fotovoltaico para ECOEVO HE EC 54, continuação.

Cidade	Nº de painéis	de E_{real}^{ano} (kW/ano)	Economia (€)	Custo do sistema (€)	do Amortização (anos)
Lisboa	5	2436,40	593,75	2105,53	3,55
	8	3898,25	950,00	3227,91	3,40
	9	4385,53	1068,75	3670,1	3,43
	10	4872,81	1187,50	3903,8	3,29
Faro	5	2688,24	655,12	2105,53	3,21
	8	4301,19	1048,20	3227,91	3,08
	9	4838,84	1179,23	3670,1	3,11
	10	5376,49	1310,25	3903,8	2,98