



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Células Fotovoltaicas Estado da Arte e Perspetivas Futuras

João Eduardo Santos Ruivo da Silva

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Tessaleno Devezas

Covilhã, junho de 2014

Agradecimentos

O aluno, João Eduardo Silva, gostaria de agradecer ao Exmo. Professor Doutor Tessaleno Devezas, pela sua crucial orientação em todas as fases da conceção deste documento. As suas sugestões guiaram o aluno várias vezes, em especial no que tocava à melhor abordagem para expor certos tópicos do trabalho.

O aluno também gostaria de agradecer ao Departamento de Engenharia Eletromecânica pela sua assistência assim como a disponibilidade das suas instalações de modo a tornar a concretização deste trabalho uma realidade.

Prefácio

O sol é uma das três principais fontes de energia de afetam o clima terrestre, para além das alterações na órbita do planeta e da sua atividade geológica.

Em um segundo o planeta Terra recebe cerca de 174 petajoule (10^{15} J) de energia sob a forma de radiação solar, ou seja uma potência de 174 petawatt (10^{15} W). Cerca de 30% dessa energia é refletida para o espaço, sendo a restante absorvida pelos oceanos, massas terrestres e nuvens. A parte do espectro a que pertence grande parte desta radiação corresponde à radiação visível e próxima do infravermelho, no entanto, uma porção mais reduzida também se encontra próxima do ultravioleta.

A quantidade de energia solar que incide no planeta torna-a demasiado importante para que seja ignorada. Por outro lado, a radiação que incide no planeta e a quantidade de energia que se consegue converter são realidades completamente diferentes, pois o rendimento de conversão energética não é elevado o suficiente de modo a permitir que a energia solar possa competir com fontes de energia convencionais.

A superação desta desvantagem tem sido o objetivo maior ao longo das décadas para todas as entidades públicas e privadas que participam neste mercado, pois os potenciais ganhos são colossais. O principal obstáculo não reside na aquisição da matéria-prima e na criação de instalações dispendiosas, mas sim na manufatura de dispositivos de conversão baratos o suficiente de modo a que o tempo de amortização seja insignificante, pois a fonte de energia é gratuita.

Ao longo das décadas, a energia provinda de fontes fotovoltaicas tem-se demonstrado, apesar de tal se encontrar limitado a circunstâncias específicas, como um sector economicamente viável. O derradeiro objetivo de toda e qualquer entidade envolvida neste mercado reside em atingir a paridade de rede ou até ultrapassar esta.

Resumo/Objetivos

Foram sete os principais objetivos deste trabalho, descritos seguir:

1: A identificação dos principais fatores que têm definido e limitado o rendimento das várias tecnologias fotovoltaicas ao longo das décadas, juntamente com a identificação de novas abordagens tecnológicas que permitirão ultrapassar estas limitações. Estas novas tecnologias possuem características térmicas, mecânicas e elétricas que se encontram normalmente associadas a moléculas individuais, bem como a partículas atómicas individuais, ao contrário de tecnologias mais convencionais que, devido às suas macroestruturas cristalinas, possuem propriedades associadas a materiais semicondutores convencionais.

2: Outro objetivo igualmente importante constituiu a análise do sector fotovoltaico, que tem revelado uma tendência para custos cada vez menores, não só de manufatura, como também operacionais, acompanhada ao mesmo tempo por uma tendência inversamente proporcional no que toca aos níveis dos rendimentos de conversão. As evoluções dos rendimentos de várias tecnologias em cada geração também serão apresentadas. Infelizmente, em muitas tecnologias presentes no mercado, tem havido uma estagnação no crescimento do rendimento de conversão.

3: Igualmente importante para este trabalho é a descrição histórica do preço da energia proveniente de fontes fotovoltaicas e a sua comparação com fontes de energia mais convencionais, com ou sem apoios do estado.

4: A potência instalada, assim como a energia produzida anualmente, mereceram especial atenção neste trabalho, pois os seus valores indicam em última análise a penetração de mercado destas tecnologias.

5: Outro tópico de especial relevância analisado diz respeito à produção de silício, que tem contribuído em grande parte para uma redução dos custos de manufatura. Verifica-se que a escala da produção de Silício é cada vez maior, tendo a China protagonizado um papel cada vez mais relevante neste sector. A distribuição da produção conforme a sua aplicação em cada sector económico também será descrita.

6: A análise do caso português também se apresentou como um objetivo importante para este trabalho. Regista-se que a evolução deste sector em Portugal não diverge muito do que tem sido apresentado pelos demais países da União Europeia e do mundo. Regista-se um rápido aumento da potência instalada em Portugal; todavia, este crescimento poderá não se manter indefinidamente devido à natureza da legislação em vigor.

7: Finalmente uma breve análise do estado da indústria fotovoltaica a nível mundial será apresentada. Existem, efetivamente, certos indícios que apontam que o presente ênfase neste sector pode ser quase inteiramente o resultado da legislação que promove o seu crescimento através da aplicação de subsídios. Igualmente importante são os maus hábitos adquiridos por certas entidades privadas com apoios financeiros diretos dos governos respetivos aos países onde se encontram, assim como as inevitáveis consequências associadas.

Palavras-chave

Energia Solar, Conversão Energética, Rendimento energético, Semicondutores, Nanotecnologia, Eletrônica Impressa, Produção e Consumo de Silício, Produção e Consumo de Energia Fotovoltaica, Microprodução, Macroprodução, Potência instalada, Legislação.

Abstract

The main seven objectives of this paper are as follows:

1: The identification of the main factors that have defined and limited the efficiency of various photovoltaic technologies throughout the decades, along with the identification of new technological approaches which will allow these limits to be overtaken. These new technological approaches possess thermal, mechanical and electrical characteristics which are normally associated to discreet molecules as well as individual atomic particles, unlike other more conventional technologies, which due to their macrocrystalline structures, possess properties more akin to conventional semiconductor materials.

2: Another equally important objective is the analysis of the photovoltaic sector, which has presented a tendency for lower costs not just of manufacture but also operational, followed at the same time by a proportional inverse tendency when it comes to the conversion levels. The evolution of efficiencies of several technologies in each generation will also be presented. Unfortunately, most of the technologies currently on the market have been stagnated when it comes to the growth of their efficiency.

3: Also important is the evolution of the price of energy provided by photovoltaic sources and its comparison with more conventional sources of energy, with or without any financial support from the state.

4: The installed power, as well as the annually produced energy, deserves a special attention in this paper, for their values ultimately point out the market penetration of these technologies.

5: Another topic of special relevance concerns the production of silicon, which has contributed in large part for an ever great reduction of manufacturing costs. It is shown that its scale of production is increasingly larger, which China being the main protagonist, having an ever larger role in this sector. The distribution of production in accordance with its applications in each sector will also be described.

6: The analysis of the Portuguese case also presents itself as an important objective for this paper. The evolution of this sector in Portugal do not deviate significantly from the case of other countries of the European Union, as well as globally. A rapid growth of the installed base is being observed in Portugal, but unfortunately this growth may not hold indefinitely due to the nature of the uphold legislation.

7: Finally, a brief analysis of the state of the global photovoltaic industry will be presented. There are hints which suggest that the present emphasis and progress in this sector may be due almost entirely to the result of the current legislation in place, which promotes its growth through the application of subsidies. Equally important are the bad habits that some private entities acquire through the providence of state financial programs belonging to the respective countries where they are doing business in, and its inevitable associated consequences.

Keywords

Solar Energy, Energy Conversion, Energy Efficiency, Semiconductors, Nanotechnology, Printed Electronics, Production and Consumption of Silicon, Production and Consumption of Photovoltaic Energy, Microproduction, Macroproduction, Installed Power, Legislation.

Índice

| | |
|---|------|
| Resumo | viii |
| Abstract | x |
| | |
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1 Descrição geral de uma célula fotovoltaica | 1 |
| 1.2 Efeito fotovoltaico | 3 |
| 1.3 Evolução histórica | 4 |
| 1.4 Matérias-primas aplicadas | 6 |
| 1.5 Objetivos | 7 |
| 2 Conceitos Teóricos | 9 |
| 2.1 Fundamentos teóricos e esquema equivalente | 9 |
| 2.1.1 Junção PN | 11 |
| 2.2 Limite de Shockley-Queisser | 11 |
| 2.3 Exceder o Limite | 13 |
| 2.3.1 Células multijunção | 13 |
| 2.3.2 Concentração de luz | 15 |
| 2.3.3 Impurezas em células fotovoltaicas | 15 |
| 2.3.4 Recaptura de fótons | 15 |
| 2.3.5 Captura de elétrons | 16 |
| 2.3.6 Geração de múltiplos elétrons excitados | 15 |
| 2.3.7 Células termo-fotovoltaicas | 16 |
| 3 Comparações entre as várias gerações de células fotovoltaicas | 19 |
| 3.1 Tecnologia de Primeira Geração | 19 |
| 3.1.1 Silício monocristalino | 19 |
| 3.1.2 Células policristalino | 20 |
| 3.1.3 Células solares de multijunção | 22 |
| 3.2 Tecnologia de Segunda Geração | 26 |
| 3.2.1 Filme fino amorfo | 26 |
| 3.3 Tecnologia de Terceira Geração | 30 |
| 3.3.1 Células Orgânicas | 30 |
| 3.3.2 Pontos quânticos | 34 |
| 3.3.3 Grafeno | 36 |
| 3.3.4 Nanotubos de carbono | 37 |
| 4 Fatores que definem o rendimento | 39 |

| | |
|---|----|
| 5 Preços | 41 |
| 5.1 Histórico de preços a nível mundial | 41 |
| 5.2 Produção Mundial de Energia | 45 |
| 6 Produção Anual | 47 |
| 6.1 Produção anual em MW | 47 |
| 6.2 Produção anual em toneladas de silício | 50 |
| 7 Consumo por Aplicação | 53 |
| 7.1 Sílica | 53 |
| 7.2 Silício | 53 |
| 7.3 Relação entre a produção mundial de Silício e a população mundial | 56 |
| 8 Caso Português | 59 |
| 8.1 Evolução histórica | 59 |
| 8.2 Exemplos de instalações em Portugal | 63 |
| 8.3 Produção e venda de energia | 63 |
| 8.4 Tempo de amortização | 64 |
| 9 Panorama Mundial | 67 |
| 10. Conclusões | 69 |
| Bibliografia | 71 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Ilustração 1.1 - Estrutura de uma célula solar | 1 |
| Ilustração 1.2 - Disposição das células solares em módulos e painéis | 2 |
| Ilustração 1.3 - Representação do efeito fotovoltaico. | 4 |
| Ilustração 2.1 - Representação de uma célula solar ideal. | 10 |
| Ilustração 2.2 - Representação do esquema equivalente real. | 10 |
| Ilustração 3.1 - Evolução da eficiência total de conversão de Silício Monocristalino. | 20 |
| Ilustração 3.2 - Evolução da eficiência total de conversão de Silício Policristalino. | 22 |
| Ilustração 3.3 - Comparação entre a radiação solar incidente no espaço sideral e na superfície terrestre. | 24 |
| Ilustração 3.4 - Ilustração das perdas por convecção de uma célula solar, assim como a fração de energia convertida e os principais comprimentos de onda absorvidos. | 25 |
| Ilustração 3.5 - Eficiência total de conversão de células de silício de tripla junção. | 26 |
| Ilustração 3.6 - Eficiência total de conversão de Silício Amorfo. | 27 |
| Ilustração 3.7 - Eficiência total de conversão de uma liga de filme fino de Cu(In, Ga)Se ₂ . | 29 |
| Ilustração 3.8 - Eficiência total de conversão de uma liga de CdTe em filme fino. | 29 |
| Ilustração 3.9 - Eficiência total de conversão para células orgânicas. | 31 |
| Ilustração 4.1 - Representação dos vários fatores que limitam a eficiência de conversão. | 40 |
| Ilustração 5.1 - Representação do Efeito Swanson. | 41 |
| Ilustração 5.2 - Ilustração do preço de energia fotovoltaica por Watt. | 42 |
| Ilustração 5.3 - Ilustração de um gráfico parcial do preço por Watt. | 43 |
| Ilustração 5.4 - Ilustração da função inversa relativa ao preço por Watt. | 43 |
| Ilustração 5.5 - Ilustração da evolução do preço de energia fotovoltaica. | 44 |
| Ilustração 5.6 - Comparação entre os custos por Watt entre fontes convencionais e energia solar. | 44 |
| Ilustração 5.7 - Comparação do preço entre sistemas comerciais e residenciais. | 45 |
| Ilustração 5.8 - Representação da produção acumulativa em TWh. | 46 |
| Ilustração 5.9 - Representação da produção total cumulativa anual em MW proveniente de fontes renováveis | 46 |
| Ilustração 6.1 - Produção anual em MW/Ano proveniente de fontes fotovoltaicas. | 47 |
| Ilustração 6.2 - Percentagem do Consumo Mundial de Energia proveniente de Fontes Fotovoltaicas (%). | 48 |
| Ilustração 6.3 - Ilustração de um gráfico parcial da percentagem de energia proveniente de fontes fotovoltaicas. | 49 |

| | |
|---|----|
| Ilustração 6.4 - Ilustração da produção Mundial de Silício em kton.. | 50 |
| Ilustração 6.5 - Ilustração da produção mundial e chinesa de Silício. | 51 |
| Ilustração 7.1 - Ilustração da produção mundial de silício metálico e Ferrosilício. | 54 |
| Ilustração 7.2 - Ilustração do consumo de silício metálico pelas várias aplicações presentes. | 56 |
| Ilustração 7.3 - Ilustração da Intensidade de Uso ou Consumo <i>per Capita</i> . | 57 |
| Ilustração 8.1 - Evolução da produção de eletricidade entre 1999 e 2013. | 59 |
| Ilustração 8.2 - Peso das fontes de produção de eletricidade em Portugal em 2013. | 60 |
| Ilustração 8.3- Peso das fontes de produção de eletricidade em Portugal. | 60 |
| Ilustração 8.4 - Produção de eletricidade por fonte em Portugal Continental em 2012. | 61 |
| Ilustração 8.5 - Produção de eletricidade por fonte em Portugal Continental em 2013. | 62 |
| Ilustração 8.6 - Capacidade instalada em Portugal (MW). | 62 |

Lista de Acrónimos

| | |
|---------------|--|
| GRP | Gabinete de Relações Públicas |
| UBI | Universidade da Beira Interior |
| Junção PN | Junção Positiva-Negativa |
| h | Constante de Planch |
| E | Energia |
| ν | Frequência |
| c | Velocidade da Luz |
| λ | Comprimento de Onda |
| I_{MPP} | Corrente durante o Valor de Potência Máxima |
| V_{MPP} | Tensão durante o Valor de Potência Máxima |
| I_{SC} | Corrente em Curto-Circuito |
| V_{OC} | Tensão em Circuito Aberto |
| k | Constante de Boltzman |
| T | Temperatura (Kelvin ou Celcius) |
| C | Celcius |
| K | Kelvin |
| n | Fator de um díodo ideal |
| V | Volt |
| eV | Volt Eletrão |
| K | Kelvin |
| p.p.m. | Partes por Milhão |
| m | Metros |
| cm | Centímetros |
| μm | Micrómetro |
| nm | Nanómetros |
| MOSFET | Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor |
| MOS | Metal Oxide Semiconductor |
| CMOS | Complementary Metal-Oxide Semiconductor |
| LPCVD | <i>Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition</i> |
| a | Constante Estrutural |
| E_g | Energia de Absorção |
| α | Coeficiente de Absorção |
| τ_p | Tempo de vida dos agentes transportadores de carga |
| μ_n | Mobilidade dos agentes transportadores de carga |
| m | Massa |
| ϵ_r | Constante Dielétrica |
| μ | Massa Reduzida |
| € | Euro |
| \$ | Dólar |

| | |
|-------|---------------------------------------|
| MA | Massa Atmosférica |
| W | Watt |
| MW | Megawatt |
| MToE | <i>Million Tons of Oil Equivalent</i> |
| J | Joule |
| €/kWh | Euro por kilowatt-hora |
| ... | |

Capítulo 1

Introdução

1.1 Descrição geral de uma célula fotovoltaica

Uma célula solar, também denominada célula fotovoltaica, é um dispositivo que converte diretamente a luz solar em energia elétrica através de um fenômeno denominado por “efeito fotoelétrico”. As características da célula solar podem variar conforme a intensidade de luz que se espera incidir sobre esta, assim como os comprimentos de onda do espectro que compõem a luz em termos de fração energética.

O termo “fotovoltaico” tem a sua origem no nome grego “*phos*” que significa “luz” e “*volt*” que por sua vez representa a unidade da força electromotriz. As células fotovoltaicas são compostas por uma classe especial de materiais denominados por semicondutores e entre estes materiais o mais aplicado é o silício devido à sua abundância.

Uma célula fotovoltaica requer três atributos base:

- A absorção da luz, de modo a gerar eletrões.
- A excitação dos eletrões, gerando o agente de carga e um “buraco” com uma carga oposta (ou seja, um “excitação”) (1).
- A extração dos eletrões para um circuito externo.

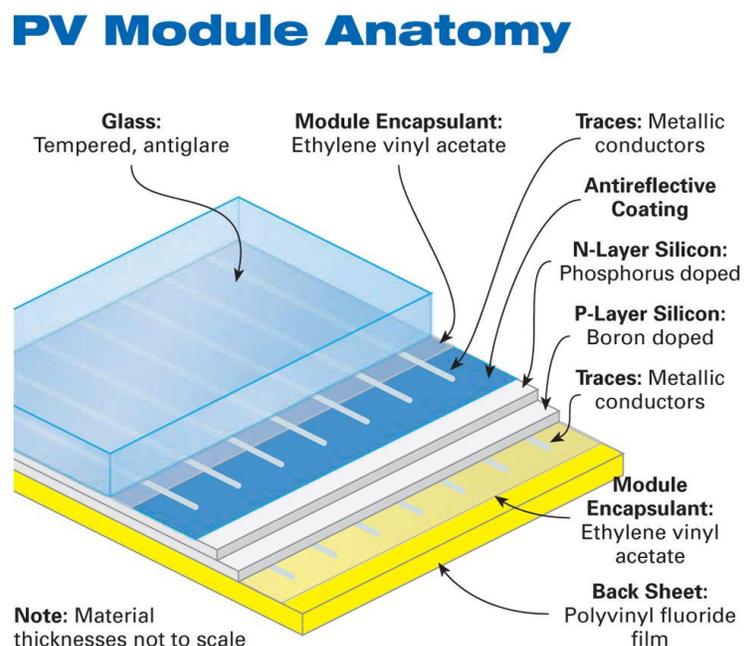


Ilustração 4.1 - Estrutura de uma célula solar (2).

Uma célula fotovoltaica é uma estrutura com vários estratos. À superfície encontra-se uma camada de vidro antirefletor. Por baixo desta encontra-se uma camada que serve como encapsulamento do módulo. Esta camada de encapsulamento encontra-se tanto por cima como por baixo dos finos condutores (3).

A estrutura interna da célula fotovoltaica contém vários traçados compostos por condutores tanto sob como sobre a junção PN, sendo estes o mais finos possível (de modo a não bloquear a luz que incide na célula). A “célula” por si própria, mais especificamente a junção PN, encontra-se no centro.

Suportando a célula encontra-se um substrato normalmente rígido, apesar de modelos mais recentes pertencentes à terceira geração serem de natureza flexível.

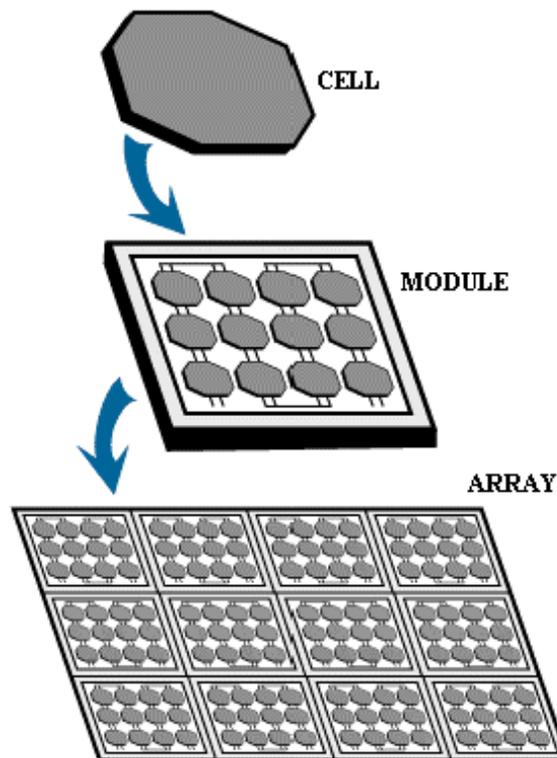


Ilustração 1.5 - Disposição das células solares e módulos e painéis

Um número de células montadas e conectadas eletricamente umas com as outras é denominado por módulo (3). Cada módulo encontra-se normalmente concebido para providenciar eletricidade a uma tensão específica como por exemplo a tensão comum de 12V.

Múltiplos módulos podem ser ligados em conjunto de modo a criar um painel. Módulos fotovoltaicos produzem sempre energia em corrente contínua. Os módulos podem ser ordenados em série ou em paralelo.

1.2 Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico foi primeiro exposto por A.E. Becquerel em 1839, que construiu também a primeira célula fotovoltaica. Todavia foi apenas a partir de 1888 que o físico russo Aleksandr Stoletov criou a primeira célula fotovoltaica baseada no efeito fotoelétrico externo, baseando-se nos resultados de Heinrich Hertz em 1887.

Outra contribuição igualmente importante foi a de Max Planck através da criação da constante de Planck ($h = 6.626 * 10^{-34} Js$). Este valor é uma constante física sendo originalmente descrita como uma “constante proporcional entre a energia (E) de um elemento atômico oscilante no limite de um corpo negro e a frequência (ν) associada à sua onda eletromagnética”.

Esta relação é representada através da relação de Planck:

$$E = h\nu \quad (1)$$

Ou alternativamente, se for necessário representar a mesma expressão em função do comprimento de onda:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

Em que λ representa o comprimento de onda e c representa a velocidade da luz. Tal relação é especialmente útil de modo a determinar a energia associada a cada fóton através de uma análise da sua frequência.

Todavia foi apenas em 1905 que Albert Einstein primeiro descreveu a natureza da luz assim como as suas implicações durante o efeito foto-elétrico, um feito que lhe garantiu o premio Nobel da Física em 1922. Einstein desenvolveu os conceitos já expostos por Planck, mais especificamente o conceito de “Quanta” de modo a quantificar a energia associada a um número de fótons (4).

O efeito fotovoltaico é descrito como sendo a criação de uma tensão ou corrente elétrica em um material quando este se encontra exposto à luz solar. Todavia este fenômeno apenas pode ocorrer se a radiação eletromagnética incidente no material possui uma intensidade energética equivalente ou superior à energia de valência. Como resultado, os elétrons que absorverão esta energia, tornar-se-ão excitados e libertar-se-ão da camada de valência.

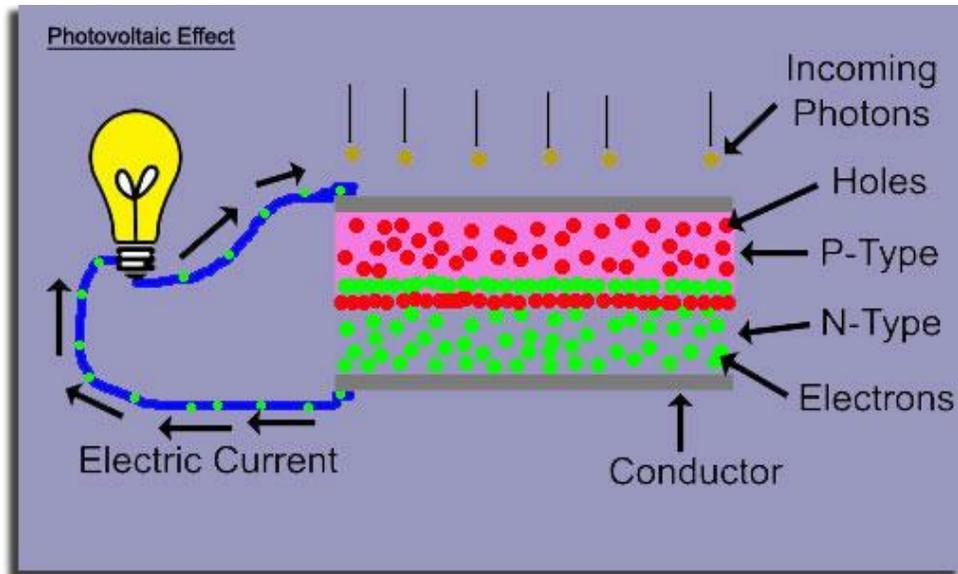


Ilustração 1.6 - Representação do efeito fotovoltaico (4).

Os elétrons excitados espalham-se e alguns atingem a junção PN que marca a fronteira com um outro material, que por sua vez possui um potencial de *Galvani*. Como resultado uma força eletromotriz é gerada.

O fenômeno de foto-geração pode também ser provocado através do calor gerado como subproduto do processo de conversão. O aumento de temperatura é acompanhado por gradientes térmicos, que por sua vez geram uma tensão através do efeito de *Seebeck*.

1.3 Evolução Histórica

A primeira célula fotovoltaica “prática” foi criada em 1954 nos laboratórios Bell por Daryl Chapin, Calvin Souther Fuller e Gerald Pearson. Foi usada uma junção p-n difusa de silício que conseguia atingir um rendimento de aproximadamente 6% em comparação com as primeiras células de selênio que apenas atingiam 0.5%.

Selênio foi primeiro usado por Willoughby Smith em 1873, tendo sido ele que primeiro determinou que a resistência elétrica do selênio encontra-se dependente da luz ambiente. Os primeiros produtos comerciais a usar selênio foram desenvolvidos por Werner Siemens na década de 1870. Selênio transmite uma corrente elétrica proporcional à quantidade de luz que incide sob a sua superfície.

Estas propriedades tornaram-no um excelente material semicondutor para a indústria eletrônica. A utilização de retificadores de selênio teve início na década 1930 ao substituírem os já presentes retificadores de óxido de cobre, tendo sido comercializados até à década de 1970 a partir do qual foram substituídos pelos mais eficientes retificadores de silício.

Entre 1954 e 1960 Hoffman melhorou o rendimento das células solares de 2% para 14%, infelizmente estas células implicavam preços na ordem dos \$250 por watt, em comparação com os \$2 a 3\$ por watt para uma central a carvão.

A verdadeiramente necessária redução de preço primeiro ocorreu com Elliot Berman durante a década de 60. O primeiro melhoramento foi a realização de que as células da altura eram baseadas em processos de manufatura normalizados para semicondutores, algo que não era ideal para as células solares. Inicialmente utilizaram “*boules*”, cortando-os em discos ou “*wafers* individuais”, polindo-os e depois por necessidade aplicavam uma camada anti-refletora.

Berman reparou que uma superfície demasiado polida nas *wafers* resultava em elevados índices de reflexão de luz, ou seja, o silício era “bom demais” para ser utilizada em *wafers*, sendo que uma superfície mais rugosa e irregular era necessária de modo a diminuir os índices de reflexão. Plantando os elétrodos diretamente nesta superfície rugosa permitiria simplificar o processo de manufatura.

Este método de manufatura permitiu que ao longo de 10 anos os preços das “*wafers*” descessem desde \$100 por watt até \$20 por watt, uma vez que as células fotovoltaicas podiam ser feitas de materiais que não passavam pelos testes de qualidade na indústria da eletrónica, sendo estes vendidos a preços relativamente baixos.

Com o tempo vários melhoramentos nos métodos de produção permitiram que o preço de manufatura fosse baixado para os \$2, resultando no fato de que o preço de venda começou a incluir todos os procedimentos e custos para trazer o painel para o cliente e não apenas a produção do painel.

Algo que contribuiu em muito para esta redução de preço foi o fato que durante os anos 90, as células de silício começaram a ser compostas por vários cristais de silício. Estas células oferecem um menor rendimento do que células compostas por um único cristal de silício, todavia por um preço muito menor, sendo estas produzidas em enormes fornos, permitindo assim uma produção a larga escala. Células solares com vários cristais de silício, ou policristalinas, dominam o mercado de baixo custo.

Vários esforços foram realizados de modo a diminuir os requisitos materiais necessários para manufaturar uma célula fotovoltaica. É necessário apontar que muitas das despesas presentes durante o processo de manufatura têm origem durante a aquisição e processamento dos materiais requeridos.

Graças a tais esforços/investimentos tornou-se possível criar camadas de semicondutores mais finas assim como a aplicação de elementos concentradores de luz como por exemplo lentes ou espelhos.

Apesar de todos estes progressos o preço por watt atualmente ainda não atingiu um valor baixo o suficiente de modo a que possa competir diretamente com fontes convencionais de geração de energia.

A origem de tal diferença ainda reside no preço associado à matéria-prima/processada necessária, assim como no método de manufatura aplicado. De modo a ultrapassar este obstáculo é necessário conceber um método de produção em massa barato o suficiente e que exija a menor quantidade de matéria-prima/processada possível.

Tal esperança poderá residir na produção em massa de células orgânicas, uma vez que a sua manufatura dependeria de métodos de produção já concebidos para aplicações que exigem a impressão em massa de produtos.

Inicialmente foram aplicadas finas camadas de silício amorfo, todavia esta tecnologia sofre de um relativamente baixo rendimento energético assim como um ritmo de deposição muito lento, o que leva

a custos de manufatura elevados. Tal tecnologia nunca atingiu uma elevada penetração de mercado e tecnologias anteriores à base de silício cristalino ainda preenchem 90% do mercado existente.

Durante este período outras ligas metálicas de filme fino foram desenvolvidas, a mais proeminente sendo uma liga de Cádmio-Telúrio. A sua principal vantagem reside no fato que possui uma largura de banda de aproximadamente 1.5eV, um valor quase coincidente com a distribuição de fótons no espectro solar de modo a atingir um relativamente elevado rendimento de conversão para a criação de eletricidade.

Outra tecnologia descoberta por volta deste período e ainda em desenvolvimento é o filme fino de uma liga de Cobre-Índio-Gálio-Selênio. Atualmente esta liga está a começar de ser produzida em volumes iniciais equivalentes a potências de 1 a 30 megawatt ao ano por certas empresas.

Esta liga promete adquirir alguma presença de mercado devido a rendimentos de conversão muito elevados em células com uma pequena área transversal, permitindo atingir rendimentos de conversão muito próximos de 20% em condições laboratoriais. Sistemas de segunda geração mais proeminentes incluem células compostas por silício amorfo ou Arsenieto de Gálio

Células fotovoltaicas de terceira geração encontram-se definidas como tal devido à sua potencial capacidade de ultrapassarem o limite de Shockley-Queisser (ver secção 2.2) que se encontra dentro de um intervalo desde 31 a 41%, dependendo do tipo de célula fotovoltaica em análise. Pertencente a esta geração encontra-se também uma gama de alterações a células fotovoltaicas presentes no mercado

Outros métodos ainda em fase de desenvolvimento em laboratório incluem por exemplo configurações de pontos quânticos, a aplicação de nanotubos de carbono, assim como de grafeno para potenciais pontos quânticos e a aplicação de substratos à base de polímeros de modo a criar células fotovoltaicas flexíveis.

1.4 Matérias-Primas aplicadas

Apesar de todos os progressos mencionados anteriormente, o silício mantém-se como o candidato ideal para a indústria dos semicondutores e fotovoltaica, sendo abundante e fácil de se extrair. Vários outros processos relacionados com o desenvolvimento de células fotovoltaicas mais baratas têm sido desenvolvidos todavia, muitos destes novos processos continuam a depender de materiais exóticos.

Contudo, devido à raridade de muitos dos materiais envolvidos, os custos associados processo de manufatura são muito elevados.

O elemento Silício não se encontra isolado na natureza. A Sílica, também denominado por Óxido de Silício, é uma substância extremamente abundante na crosta terrestre e por esta razão é o segundo elemento mais comum (5). Este óxido também apresenta uma vasta leque de aplicações como refratário, assim como na indústria metalúrgica.

Paralelamente ao seu crescente uso na indústria metalúrgica e em construção civil, o silício processado e purificado também tem apresentado um crescente uso na indústria dos semicondutores e no setor fotovoltaico. Todavia, o nível de pureza exigido para cada um destes sectores varia, sendo o setor dos dispositivos semicondutores que exigem os mais elevados graus de pureza, na ordem dos 99,9999%.

Atualmente, a indústria fotovoltaica poderá não competir diretamente com fontes energéticas convencionais no que toca a preços, mas estão-se a tornar cada vez mais evidentes as vantagens em recorrer à energia solar quando a capacidade instalada exigida atinge valores na ordem das dezenas ou até centenas de *kilowatt*. Verifica-se uma muito baixa variação de custos de geração quanto mais cresce a capacidade instalada.

O futuro apresentado para o setor fotovoltaico não é inteiramente positivo. Atualmente o setor encontra-se fortemente dependente de subsídios que inevitavelmente perturbarão o sistema de preços do mercado.

Eventualmente a sua ausência, quer devido a uma voluntária retirada, quer devido à insuficiência de fundos estatais, resultará em um ajuste de todo o sector fotovoltaico.

1.5 Objetivos

A dissertação que será apresentada centrar-se-á em vários aspetos cruciais do sector fotovoltaico.

O capítulo 2 centrar-se-á em apresentar um esquema equivalente de uma célula fotovoltaica, assim como características estruturais.

O capítulo 3 abordará a evolução da eficiência de conversão ao longo dos anos em relação a várias tecnologias de várias gerações.

O capítulo 4 focar-se-á na evolução dos preços de rede, juntamente com a quantidade de energia produzida/consumida a nível mundial.

O capítulo 5 abordará os vários fatores que limitam o rendimento de uma célula fotovoltaica.

O capítulo 6 descreverá a produção anual em MW assim como um historial da produção anual de silício.

O capítulo 7 terá como tópico a produção de silício e seus derivados assim como a distribuição e aplicação de silício por cada mercado.

O capítulo 8 abordará o caso português, a sua base instalada, o seu ritmo de crescimento, assim como expectativas futuras.

Por último, o capítulo 9 oferecerá uma breve opinião em relação ao futuro da energia fotovoltaica a nível mundial.

Capítulo 2

2. Conceitos Teóricos

2.1 Fundamentos Teóricos e esquema equivalente

Células fotovoltaicas são essencialmente díodos semicondutores em área. Na junção PN um campo elétrico é criado, que por sua vez levará à separação dos elementos transportadores de carga (eletrões e buracos). Caso a energia associada aos fótons que incidem na superfície da célula seja elevada o suficiente, ocorrerá uma libertação de eletrões na camada de valência.

A luz que incide na célula encontra-se contida em fótons, que podem ser considerados como quantidades discretas, ou “pacotes”. Com este raciocínio torna-se possível tirar partido do conceito de “quanta”, que por sua vez dependerá da energia associada ao comprimento de onda da radiação eletromagnética incidente.

O modelo mais simples de uma célula fotovoltaica consiste em um díodo e a sua respetiva fonte de alimentação conectadas em paralelo. O díodo, ou díodos, representam uma ou mais junções PN de uma célula solar. Esta representação é o modelo ideal de uma célula solar, ou seja:

$$I = L_L - I_s \left(\frac{V}{e^{n \cdot V_T}} - 1 \right) \quad (3)$$

L_L representa a corrente gerada pela conversão da luz. I_s representa a corrente de colapso inverso ($\frac{10^{-8} A}{m^2}$), V é a tensão do díodo, V_T é a tensão térmica ($25.7 mV$ a $25^\circ C$), n é o fator para um díodo ideal, $n = (1 \dots 2)$.

A tensão térmica V_T pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$V_T = \frac{k \cdot T}{q} \quad (4)$$

Onde k é a constante de Boltzman = $1.38 \cdot 10^{-23} J/K$, T é a temperatura em Kelvin e q é a carga de um eletrão = $1.6 \cdot 10^{-19} As$.

O esquema equivalente ideal de uma célula solar pode ser representado do seguinte modo:

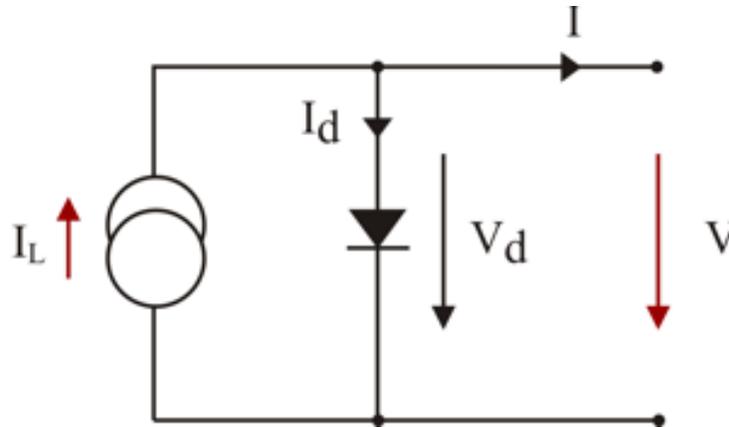


Ilustração 2.1 - Representação de uma célula solar ideal (6).

Todavia, o esquema equivalente tem que ter em conta as resistências internas R_p e R_t , que resultam em quedas de tensão assim como correntes parasíticas (6).

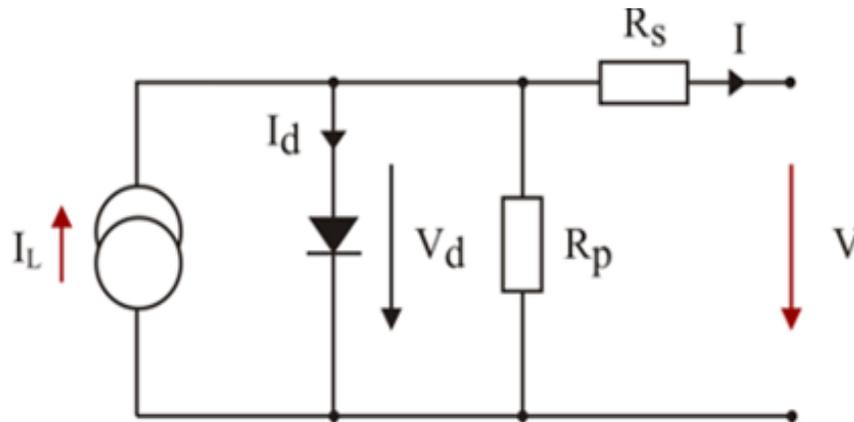


Ilustração 2.2 - Representação do esquema equivalente real (6).

Uma característica importante para todas as células solares é o “Valor de Potência Máxima”, este valor é quase impossível de se atingir, pois mesmo que a radiação solar incidente aumente, o calor gerado como subproduto do processo de conversão diminui o rendimento da célula.

Devido a esta realidade, uma característica denominada por fator de preenchimento (“*Fill Factor*”) (7) é usado, sendo calculado através da seguinte equação:

$$FF = \frac{I_{MPP} \cdot V_{MPP}}{I_{SC} \cdot V_{OC}} \quad (5)$$

I_{MPP} é a corrente durante o Valor de Potência Máxima, V_{MPP} é a tensão durante o Valor de Potência Máxima, I_{SC} é a corrente em curto circuito e V_{OC} é a tensão em circuito aberto.

No caso de se ter uma célula solar ideal, o fator de preenchimento para tal célula dependerá de parâmetros associados ao circuito aberto:

$$v_{oc} = V_{oc} \frac{q}{n * k * T}$$

Onde k é a constante de Boltzmann, T é a temperatura, q é a carga em um elétron, n é o fator de um diodo ideal, e V_{oc} é a tensão em circuito aberto.

2.1.1 Junção PN

Denomina-se por junção PN a estrutura fundamental dos componentes eletrônicos que se designam por semicondutores, mais especificamente díodos e transístores. É composta por uma junção metalúrgica de dois cristais, geralmente silício e germânio. Ao serem dopados, implantam-se intencionalmente impurezas.

O silício presente nestas junções pode ser intrínseco ou extrínseco.

Silício intrínseco possui um número de lacunas igual ao número de elétrons livres. Silício extrínseco por sua vez pode ser do tipo N ou P.

O silício do tipo P possui 3 elétrons na sua camada de valência, ou seja, possui uma carga positiva. Boro pode ser usado como um elemento para a dopagem de silício, formando um semicondutor do tipo P, ao qual se acrescenta uma carga positiva. (8)

O propósito desta dopagem é a criação de uma abundância de lacunas, de modo a que por difusão, um dos átomos vizinhos lhe ceda um elétron, ou seja, incentivam à circulação de elétrons no circuito interno. O átomo que cedeu o elétron ficará carregado positivamente e portanto também atrairá um elétron de valência de outro átomo vizinho, criando assim uma reação em cadeia.

O silício do tipo N possui 5 elétrons na sua camada de valência, isto é, possui uma carga negativa. O elemento fosforo é normalmente usado como dopante doador do silício, dando a origem a um semicondutor do tipo N.

Deste modo, o silício de tipo N torna-se um elemento propício a providenciar elétrons, um doador, devido à abundância de elétrons livres. É lembrado que o átomo de silício possui 4 elétrons de valência, criando 4 ligações covalentes entre os seus átomos vizinhos; todavia, se possuir 5 elétrons, um destes elétrons encontrar-se-á livre para circular entre os vizinhos átomos de silício. Este tipo de átomos são denominados por átomos doadores.

2.2 Limite de Shockley-Queisser

O limite de Shockley-Queisser refere-se ao rendimento máximo teórico de uma célula fotovoltaica que recorre a uma junção PN de modo a recolher a energia coletada pela célula. Foi determinada por William Shockley e Hans Queisser, dois investigadores contratados pela *Shockley Semiconductors*.

Para uma única junção PN assume-se um rendimento de conversão de energia solar máxima que ronda os 33.7%, através de uma largura de banda de 1.34eV. Porém a substância base mais utilizada para a

criação de células fotovoltaicas possui uma largura de banda insuficiente, na ordem dos 1.1eV, possuindo um rendimento máximo de aproximadamente 29%.

Este limite aplica-se apenas a células com uma única junção PN. Células com várias camadas/junções podem ultrapassar este limite; todavia, tal abordagem apresenta as suas limitações em termos de preços e eficiência.

Assumindo que uma célula fotovoltaica possui um número infinito de junções, cada uma delas presente em cada camada de modo a captar toda a luz que incide na célula, o limite teórico rondaria 86%, isto é, se for assumida que o painel se encontra a captar luz solar direta e concentrada na sua superfície, e não luz difusa provinda indiretamente de outras fontes.

Entre os fatores que mais prejudicam o rendimento da conversão total energética de células mono/policristalinas os mais proeminentes são a reflexão da luz por parte da superfície e o bloqueio da luz por parte dos finos conectores semicondutores presentes na superfície das células.

Os principais fatores que definem este limite são a radiação de corpo negro, a recombinação radiativa e as perdas de espectro existentes.

A radiação de corpo negro encontra-se associada à radiação emitida por qualquer corpo devido a perdas por convecção e radiação. A intensidade da radiação encontra-se dependente da temperatura do material, ou seja, se a temperatura ambiente aumentar também aumenta a radiação emitida pela célula.

Eventualmente será atingido um equilíbrio, cuja temperatura da célula encontra-se na ordem dos 360 K, mas constata-se que a sua operação sob tais temperaturas resultará em níveis de eficiência muito baixos.

A recombinação radiativa encontra-se relacionada com o conceito da criação de um par de eletrões que tem a sua origem na absorção de um fóton. Infelizmente este processo pode ser realizado também no sentido inverso, no qual um eletrão e a sua partícula associada com uma carga da mesma magnitude, mas possuindo uma polaridade oposta, se unem, emitindo um fóton como consequência e diminuindo a eficiência da célula fotovoltaica.

As perdas de espectro encontram-se dependentes das limitações inerentes a cada material, relativamente à elevação de um eletrão a partir da camada de valência presente na nuvem eletrónica em cada átomo. De modo a que este se encontre livre para transmissão é necessário “excitá-lo” com uma quantidade de energia superior ao nível energético da camada de valência.

No silício, a camada de condução encontra aproximadamente 1.1eV acima da camada de valência. Fótons com uma intensidade energética igual à camada de condução pertencem ao comprimento de onda da luz vermelha, amarela e azul, e como tal contribuem para a geração de energia elétrica, enquanto que os fótons com uma carga energética inferior encontram-se na frequência do infravermelho. As microondas e ondas de rádio, que possuem frequências superiores, não contribuirão para a geração de energia elétrica.

Tal como níveis energéticos inferiores à da camada de valência não podem excitar os eletrões presentes nessa camada, também a energia presente em ondas eletromagnéticas com uma maior

intensidade energética acima do nível da camada de valência é desperdiçada, não sendo captada pela junção PN. Inicialmente o elétron também é excitado por esta energia excessiva, todavia, até atingir a junção PN este perde muita da energia sob a forma de calor.

Quando um elétron é ejetado de um átomo este adquire uma carga positiva. Nestas condições o átomo tentará remover outro elétron pertencente a um átomo na sua vizinhança de modo a neutralizar a sua carga. Este fenómeno induz uma reação ionizante em cadeia que se propaga pela célula. Pode-se considerar tal reação como o deslocamento numa carga positiva ao longo da célula.

Para o silício, sucede que o ritmo a que uma carga positiva é criada por cada átomo é inferior à extração de elétrons, e desta forma torna-se provável que um elétron em deslocamento possa ser “arrastado” por um átomo de modo a preencher o lugar previamente ocupado por outro elétron na sua camada de valência. Ao “atracar-se” ao átomo o seu nível energético desce e a energia presente em excesso dissipa-se sob a forma de calor.

2.3. Exceder o Limite

Exceder o limite de Schokley Queisser é possível pois a sua conceção depende das seguintes condições:

- Uma única junção PN
- Por cada elétron excitado outro é atracado.
- Dissipação energética em excesso em relação à necessária para manter o elétron na camada de condução.
- As células são banhadas com luz solar não concentrada/difusa.

2.3.1 Células Multijunção

O método mais comum para ultrapassar este limite reside na implementação de várias junções PN em uma única célula fotovoltaica, também designado como “célula fotovoltaica de multijunção”. Este método recorre a múltiplas junções, cada uma delas afinada a um específico intervalo do espectro eletromagnético.

A metodologia aplicada de modo a calcular o rendimento destas células multijunção é em última análise semelhante à aplicada para células que possuem uma única junção mas com uma diferença. É necessário ter em consideração que após a absorção de alguma da energia presente na luz solar que incide na superfície da primeira junção, parte da energia é convertida em calor, assim como reemitida e redirecionada dentro da própria célula fotovoltaica por convecção.

Normalmente a primeira camada encontra-se ajustada para absorver a energia solar pertencente a uma parte do espectro com uma maior frequência. Por baixo desta encontram-se as camadas preparadas para absorver a energia solar presente em partes do espectro correspondentes a frequências cada vez mais elevadas, assim como a níveis energéticos mais baixos.

Normalmente uma célula fotovoltaica contém entre três a quatro junções, sendo este o número para além do qual a adição de mais junções PN pode ser considerado como um ganho reduzido, tendo em conta os custos associados.

Em teoria, uma célula fotovoltaica que possua duas junções PN consegue atingir um rendimento de 42%, células com três junções PN conseguem atingir 49%, enquanto células com um número infinito de junções atingiriam uma eficiência de aproximadamente 68%.

Radiação solar de uma determinada frequência do espectro eletromagnético não reage com materiais cuja energia de absorção não seja um múltiplo dessa mesma frequência, pelo que, células multijunção são compostas por diversos materiais: frequências mais elevadas são absorvidas à superfície, ao passo que a radiação eletromagnética com um maior comprimento de onda é absorvida pelas camadas mais profundas da célula.

Devido ao fato que os fótons têm que passar certas junções de modo a serem absorvidos pelas seguintes, torna-se necessário instalar semicondutores transparentes a fim de maximizar a passagem de fótons por cada junção.

A maioria das células multijunção em existência foi concebida para tirar proveito de três junções. A primeira junção absorve a radiação solar correspondente à luz azul/ultravioleta, a segunda junção absorve a luz correspondente à luz amarela e a terceira absorve a luz correspondente à luz vermelha.

De modo a cumprir estas exigências, são requeridos diversos materiais semicondutores para que a célula fotovoltaica reaja a diversas frequências do espectro eletromagnético.

Arsenieto de Gálio, ou alguns dos compostos associados, são uma opção muito utilizada de modo a cumprir estes requisitos. Germânio também é uma opção para absorver energia solar correspondente à luz vermelha.

Existem algumas alternativas no que toca à conceção destas células, a estrutura geral mantém-se a mesma, todavia existem diferenças no que toca à sua integração. Uma alternativa simples para integrar uma estrutura multijunção reside na criação de duas ou mais células de filme fino que se encontram fisicamente separadas, mas conectadas através de semicondutores externos à célula.

Tal técnica apresenta-se como comum e acessível para sistemas de silício amorfo, mas ao custo do rendimento de conversão. Normalmente tais sistemas atingem níveis de rendimento na ordem dos 9% da energia total incidente nas células.

Uma solução mais complicada e potencialmente dispendiosa reside em células monoliticamente integradas, ou seja, uma “*super célula*”, a qual a célula é constituída por um número de camadas que se encontram mecanicamente/fisicamente e eletricamente conectadas.

Estas células são muito mais difíceis de se produzirem porque as características de cada camada têm que ser comparáveis, mais especificamente a corrente foto-elétrica gerada, caso contrário, devido aos diferentes níveis energéticos de cada camada, arrisca-se a perder eletrões por absorção em cada camada.

Como tal, os materiais têm que ser compatíveis. Materiais semicondutores de classe III e V encontram-se entre os candidatos ideais devido ao facto de possuírem uma elevada mobilidade relativamente ao transporte de cargas, assim como a capacidade de se cristalizarem com um elevado grau de estequiometria.

Apesar de todas as suas aparentes vantagens, a criação de uma célula fotovoltaica multijunção é uma escolha dispendiosa, sendo que tal decisão apenas se demonstra útil quando o principal critério a ter em conta é o rendimento de conversão.

Por outro lado, a estrutura apresentada por este tipo de células fotovoltaicas permite a utilização de materiais baratos de manufaturar, mas de baixo rendimento. Tal opção apenas se apresenta como viável quando se pretende obter uma célula fotovoltaica com um baixo-médio rendimento de conversão.

2.3.2 Concentração de Luz

A luz solar pode ser concentrada com lentes de modo a atingir intensidades muito superiores, pois assim pode permitir-se que o limite Schokley-Queisser aumente ligeiramente.

A aplicação de métodos que proporcionem uma concentração de luz é uma opção que implica o agravamento de outros fatores, como por exemplo o custo por unidade de área das células fotovoltaicas versus o custo do equipamento necessário para focar a luz solar, como por exemplo sistemas que acompanham o deslocamento do sol, assim como sistemas de lentes e/ou espelhos.

Outro fator importante reside no índice de luz concentrada necessária para tirar proveito destes sistemas.

Vários sistemas podem ser usados de modo a tirar proveito de luz solar concentrada, incluindo lentes comuns para focar a luz, espelhos curvos maciços ou em alternativa um conjunto de vários espelhos distribuídos.

2.3.3 Impurezas em Células Fotovoltaicas

A opção de aplicar deliberadamente impurezas em cristais de silício tem sido considerada como uma abordagem viável, com o objetivo de criar estados energéticos intermédios nestas estruturas cristalinas (9).

Ou seja, em vez de se tentar obter uma estrutura cristalina com um grau de pureza que rondaria os 99.9999% de silício, intencionalmente misturar-se-iam vários elementos dentro da estrutura cristalina (10).

Tal abordagem permitiria, em teoria, oferecer algumas das vantagens presentes em células fotovoltaicas de multijunção e apresentando ao mesmo tempo um nível de simplicidade apenas presente em células com uma única junção.

Nenhuma célula comercializável em existência hoje usa esta técnica.

2.3.4 Recaptura de Fotões

Tal como explicado anteriormente, quaisquer fotões com um nível energético abaixo da banda de absorção do material implementado são desperdiçados em células fotovoltaicas com uma única junção PN.

Um método de evitar o fenómeno descrito acima reside na conversão/recaptura de fotões. Introduce-se na estrutura cristalina uma molécula ou material relativamente disperso que consegue absorver fotões que se encontram a um ou dois níveis energéticos abaixo da banda de absorção do material.

2.3.5 Captura de Eletrões

As principais perdas energéticas ocorrem durante o processo de conversão da energia presente nos fotões para energia sob a forma de eletrões pronta a ser capturada. Um possível método para diminuir este desperdício reside na implementação de Pontos Quânticos.

O conceito por detrás desta abordagem reside principalmente na escala extremamente pequena dos nanocristais implementados na célula fotovoltaica. Estes nanocristais são compostos por materiais semicondutores que são pequenos o suficiente para apresentarem propriedades correspondentes às de moléculas discretas, ou seja, apresentam propriedades quânticas.

É necessário destacar no entanto que este método ainda encontra-se em uma fase experimental.

2.3.6 Geração de Múltiplos Eletrões Excitados

Uma outra alternativa reside no uso de materiais semicondutores que geram mais de um eletrão por cada fotão absorvido. A tecnologia baseada em pontos quânticos tem revelado algum potencial em gerar este fenómeno, devido às propriedades de natureza quase molecular dos nano-cristais implementados.

Tal tecnologia já demonstrou a sua utilidade em painéis solares com comprimentos de onda equivalente aos atualmente comercializados.

Outra alternativa mais simples reside na criação de dois ou mais eletrões a um nível energético mais baixo, com origem num único eletrão oriundo de um nível energético por sua vez oriundo de um nível energético mais elevado.

Em teoria tal abordagem permitiria níveis de eficiência mais elevados se o material aplicado for um semicondutor com uma largura de banda localizada a um nível energético mais baixo. Níveis de eficiência quântica da ordem de 100% já foram registados em condições de laboratório.

2.3.7 Células Termo Fotovoltaicas

Sistemas termo fotovoltaicos tiram partido de uma placa metálica como agente de conversão de energia solar em energia térmica. Normalmente a placa metálica é pintada de preto, permitindo uma melhor reemissão de fotões capturados sob a forma de radiação infravermelha a baixo nível energético, que por sua vez pode ser absorvida por uma célula infravermelha.

Sistemas termo fotovoltaicos têm poucas, partes móveis e como tal requerem poucos cuidados de manutenção, tornando-se ideais para situações de difícil acesso para manutenção. Todavia o seu rácio ganho/eficiência é relativamente baixo quando em comparação com outros sistemas de geração elétricos.

O ponto fraco desta abordagem reside na necessidade em realizar uma dupla conversão de modo a obter a energia necessária em um formato que permita a sua absorção com um elevado grau de eficiência.

Em teoria, para um conversor com uma banda de condução com um nível energético de 0.92eV, o seu rendimento máximo encontrar-se-á limitada a 54% se a célula for composta por uma única junção fase-neutro.

Existem vários modelos para células fotovoltaicas baseados em várias substâncias base. O Silício foi um dos materiais mais explorados e experimentados. O seu baixo custo, acessibilidade para manufatura de escala, assim como sua relativa facilidade de processamento tornaram-no um ideal candidato.

Todavia, a sua banda de condução relativamente abrangente de 1.1eV não é a ideal para o seu uso como um corpo negro emissor de radiação infravermelha. Recorrendo à lei de Planck descobre-se que silício apenas se torna viável a temperaturas muito mais elevadas que 2000K. Obviamente que tais temperaturas não são viáveis para um corpo emissor.

O Germânio por sua vez possui uma banda de condução na ordem dos 0.66eV, permitindo uma conversão muito mais eficiente da radiação incidente. Além disso também possui uma elevada massa de eletrões, levando a uma elevada densidade de estados na banda de condução, e portanto a uma concentração elevada de partículas transportadoras de energia.

Como resultado, díodos de Germânio possuem uma rápida decadência de corrente condutora assim como uma baixa tensão em um cenário de circuito aberto. Adicionalmente, "passivar"¹ em termos condutores a superfície de Germânio tem sido um desafio muito difícil até agora.

Várias ligas metálicas à base de Gálio, Arsénio e Índio têm sido testadas, em geral possuem bandas de condução relativamente estreitas, normalmente entre 0.5eV até 0.74eV.

¹ Tornar inativo electricamente.

Capítulo 3

3 Comparação entre as várias gerações de células fotovoltaicas

3.1 Tecnologia de Primeira Geração

3.1.1 Silício Monocristalino

O Silício monocristalino foi a primeira configuração manufaturada de células solares, possui um elevado índice total de conversão energética mas apresenta um elevado custo de produção.

Este consiste em Silício configurado de modo a que a sua estrutura cristalina seja contínua, ou seja, não possui quaisquer descontinuidades como por exemplo a presença de “grãos” microscópicos.

Esta configuração pode ser preparada de modo a ser composta por Silício puro apenas, ou pode ser dopada durante o processo de manufatura de modo a incumbir a estrutura cristalina com propriedades favoráveis à condução de uma carga elétrica.

A sua aplicação estende-se para além do sector fotovoltaico, tendo sido o aumento da escala de manufatura de modo a introduzir produtos a preços cada vez mais baixos, que permitiu a revolução eletrónica das últimas décadas.

A maior parte do Silício produzido atualmente é manufaturado a partir do processo *Czocharalski*, no qual silício de elevada pureza, na ordem de aproximadamente 99.9999% ou seja, com apenas algumas impurezas a uma escala de partes por milhão (p.p.m.) é fundido em um contentor, normalmente composto por Quartzo (de modo a tolerar as elevadíssimas temperaturas).

É possível introduzir quantidades precisas de elementos dopantes nomeadamente Boro, Fósforo, Germânio e Magnésio de modo a conferir o silício com propriedades eletrónicas semelhantes às de um elemento doador e recetor que compõem uma junção PN.

Um cristal denominado por “semente” ou “primordial” é mergulhado em Silício fundido. Gradualmente, o cristal é retirado e rodado simultaneamente. Ao controlar precisamente os gradientes de temperaturas e o ritmo a que a “semente” encontra-se a ser retirada assim como rodada, torna-se possível criar/extrair um único cristal cilíndrico ininterrupto de silício fundido.

De modo a evitar a criação de quaisquer interrupções na estrutura cristalina controla-se a temperatura e a velocidade de rotação durante a extração do cristal.

Uma inconveniência associada a este processo de manufatura reside no fato que todo o processo tem que ser realizado em uma atmosfera inerte, ou seja, requerer-se um gás não reativo, como por exemplo Árgon, assim como um contentor composto por um material inerte, como por exemplo de Quartzo.

Graças a este método de produção em massa torna-se possível criar cilindros de Silício monocristalino com um diâmetro de aproximadamente 45 centímetros e com um comprimento de aproximadamente 2 metros.

Silício monocristalino é utilizado tanto na manufatura de dispositivos semicondutores como no fabrico de células solares de elevado desempenho. Felizmente, a pureza exigida para a manufatura de células solares é significativamente mais baixa do que a exigida para dispositivos microeletrônicos semicondutores.

Atualmente não são muitas as empresas que manufaturam painéis solares compostos por um único cristal de Silício devido ao seu adicional custo de manufatura em comparação com painéis solares policristalinos.

Todavia, estruturas monocristalinas ainda são usadas em produtos que necessitam de um fator de conversão energética total mais elevado.

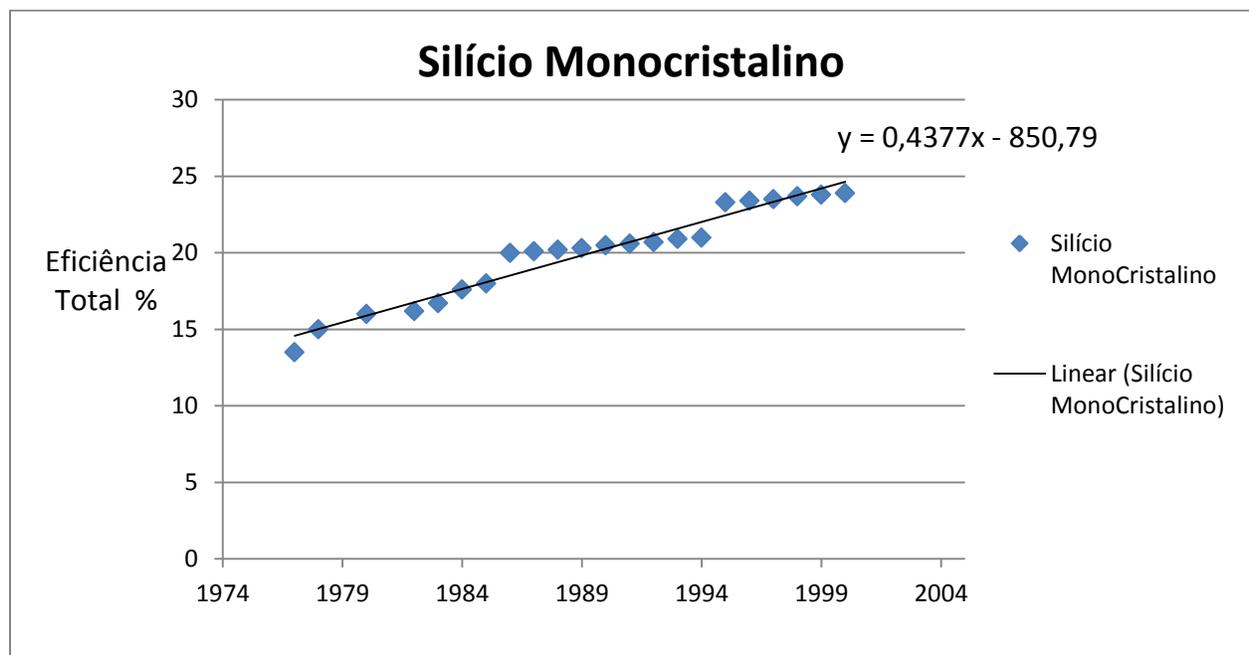


Ilustração 3.1 - Evolução da eficiência total de conversão de Silício Monocristalino (11).

A típica célula monocristalina possui um tom escuro e as extremidades de cada célula normalmente encontram-se ausentes como resultado do processo de produção, durante o qual o cristal produzido tem que ser dimensionado, tendo as suas bordas aparadas.

3.1.2 Silício Policristalino

Silício policristalino é mais barato de se produzir mas possui um rendimento de conversão energética total mais baixo.

Ao contrário do Silício monocristalino, que pode ser reconhecido pela sua coloração externa homogênea e estrutura molecular homogênea, o Silício policristalino possui uma estrutura amorfa, ou seja, quaisquer estruturas atômicas são de reduzidas dimensões.

Estruturas policristalinas são compostas por vários cristais mais pequenos ou grãos. Silício policristalino é reconhecido através de uma estrutura visível composta por vários cristais. Ao juntar todos estes grãos em uma única macroestrutura cria-se o que se denomina por silício de “cristal único”.

Esta macroestrutura composta por vários microcristais possui uma pureza na ordem dos 99.9999% e é usada de modo a manufaturar a maioria dos dispositivos semicondutores em existência.

Sendo ideal para a indústria semicondutora, devido à sua pureza, Silício policristalino é usado em aplicações tanto à macroescala como a microescala.

Entre as aplicações mais comuns de Silício policristalino encontra a criação de *gates* MOSFET e CMOS. Para estas tecnologias Silício é depositado a baixa pressão através da deposição a vapor a temperaturas elevadas, sendo este normalmente dopado como positivo ou negativo.

Temperaturas elevadas são um requisito indispensável independentemente do processo aplicado, como por exemplo através de LPCVD (*Plasma-Enhanced-Chemical-Vapour-Deposition*).

Para todos os processos descritos anteriormente são necessários pelo menos temperaturas na ordem dos 300°C, tais temperaturas tornam possível a deposição de Silício policristalino em substratos de vidro mas infelizmente não para substratos à base de plástico.

Deposição em superfícies à base de polímeros tem sido um objetivo de longa data pois caso a sua implementação seja bem-sucedida implicaria a possibilidade de manufaturar dispositivos digitais em ecrãs flexíveis. De modo a responder a esta necessidade uma nova técnica denominada por “Cristalização a Laser” foi concebida de modo a permitir a cristalização de Silício amorfo em um substrato de plástico sem que este se derreta ou o danifique.

De modo a impedir quaisquer danos ao substrato de plástico tira-se partido de um laser ultravioleta pulsante de elevada intensidade para aquecer o Silício depositado logo acima do ponto de fusão deste.

Através de um controlo minucioso do gradiente de temperatura aplicado é possível criar grãos de grande dimensão com várias centenas de micrómetros em casos extremos, todavia tamanhos na ordem dos 10 nanómetros a 1 micrómetros são mais comuns.

Existe uma alternativa para a produção de silício policristalino a baixa temperatura, o processo de manufatura em questão denomina-se por “Cristalização Induzida por Metal” através do qual um filme fino de silício amorfo é cristalizado a uma temperatura tao baixa quanto 150°C se for anelada enquanto em contacto com um outro filme metálico como por exemplo Alumínio, Prata ou Ouro.

Uma das principais aplicações e possibilidades resultantes da manufatura em larga escala de Silício policristalino é a produção elétrodos para dispositivos MOS (*Metal Oxide Semiconductor*) assim como dispositivos resistivos ou condutores de acordo com a sua dopagem.

Silício policristalino poderá ser uma estrutura fundamentalmente “amorfa” (ou seja, desorganizada), todavia existe uma diferença de escala quando em comparação com estruturas “verdadeiramente” amorfas.

Por exemplo, a mobilidade dos seus elementos transportadores de carga é muito mais flexível em várias ordens de magnitude devido à maior dimensão dos seus “grãos”, ou seja a sua macroestrutura apresenta uma superior estabilidade sob uma corrente elétrica.

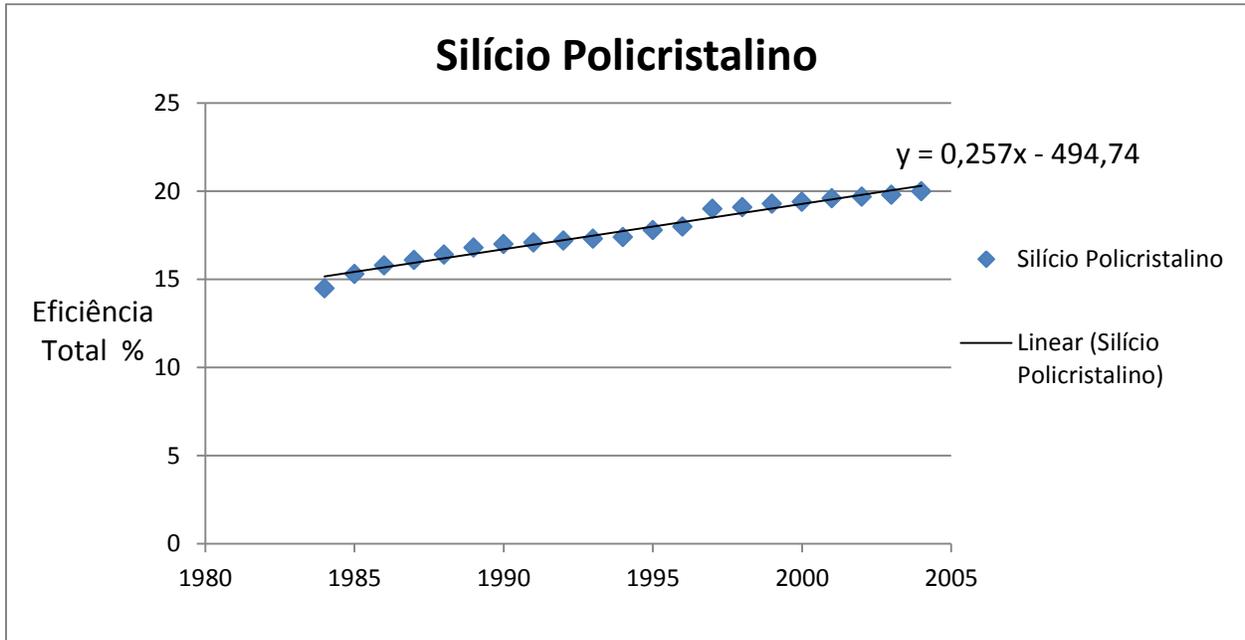


Ilustração 3.2 - Evolução da eficiência total de conversão de Silício Policristalino (11).

Para cada um destes casos apenas uma camada de absorção foi considerada. Todavia existe a opção de criar uma célula fotovoltaica que possua múltiplas camadas sobrepostas que modo a melhorar os índices de conversão de energia através de uma absorção mais eficiente da radiação solar graças a uma maior espessura da célula.

3.1.3 Células Solares de Multijunção

Ao conterem múltiplas junções PN e sintonizando-as para diferentes comprimentos de onda é possível criar uma célula solar com um rendimento de conversão energético que ultrapasse o limite de *Shockley-Queisser* (34%).

A principal vantagem desta aplicação provém do fato que para uma única junção PN é possível absorver radiação solar dentro de um determinado intervalo de intensidade energética, ou seja, radiação solar apenas pertencente a uma determinada frequência do espectro poderia ser absorvida (12).

Com a adição de mais junções PN, cada uma constituída por diferentes materiais sintonizados a diferentes frequências do espectro, tornar-se-ia possível absorver a energia solar correspondente a várias partes do espectro que, na ausência desta abordagem seria perdida.

É necessário relembrar o fato que a radiação com um determinado comprimento de onda não interage em grande parte com os materiais que não são um múltiplo desse comprimento de onda. Tal indica que seria possível criar uma célula multijunção composta por materiais no seu topo que absorvem melhor a radiação com comprimentos de onda mais curtos.

Por outro lado materiais localizados em camadas cada vez mais profundas da célula solar absorverão radiação solar com comprimentos de onda cada vez maiores. Torna-se necessário aplicar materiais semicondutores transparentes de modo a permitir que a maior quantidade possível de luz atinja as camadas mais profundas das células.

Os materiais escolhidos para cada junção dependem das propriedades elétricas e optoeletrônicas exigidas. Para um crescimento ideal assim como uma excelente qualidade cristalina a constante estrutural a de cada material deve coincidir uma com a outra, resultando em células solares com microestruturas compatíveis entre junções.

Existe um certo grau de tolerância no que toca a desigualdades entre microestruturas, especialmente entre estruturas com escalas diferentes, todavia se esta diferença for excessiva o resultado será um grau de imperfeição que resultará em um defeito do cristal à macroescala, inadvertidamente causando uma degradação nas suas propriedades eletrônicas.

Cada célula encontra-se conectada eletricamente em série ou seja, uma corrente com o mesmo valor percorre todas as junções². A lógica por detrás da organização de cada material encontra-se relacionada com uma cada vez mais decrescente faixa de absorção, E_g o que permite que a radiação eletromagnética com um nível energético abaixo desta faixa seja transmitida para as células inferiores.

Todavia, a faixa escolhida para cada junção tem que se encontrar adequada de modo a não interferir com a geração de corrente em cada junção, sendo assim possível obter uma corrente compatível (todas as junções encontram-se em série).

Células compostas por ligas de Índio, Gálio e Fósforo normalmente possuem faixas da ordem de $E_g = 1.8 - 1.9 \text{ eV}$ e encontram-se no topo, células compostas por ligas de Índio, Gálio e Arsénio possuem faixas de absorção de aproximadamente $E_g = 1.4 \text{ eV}$ e encontram-se presentes na junção do meio e finalmente temos o Germânio que é aplicado na célula inferior e que possui uma faixa de absorção de aproximadamente $E_g = 0.67 \text{ eV}$.

É também necessário escolher materiais com um elevado coeficiente de absorção $\alpha(\lambda)$, um tempo de vida elevado dos elementos de carga τ_p (μs) e uma elevada mobilidade de elementos de carga μ_n ($\frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$).

² Em teoria apenas, pois existem sempre quedas de tensão em todas as junções que a corrente atravessa.

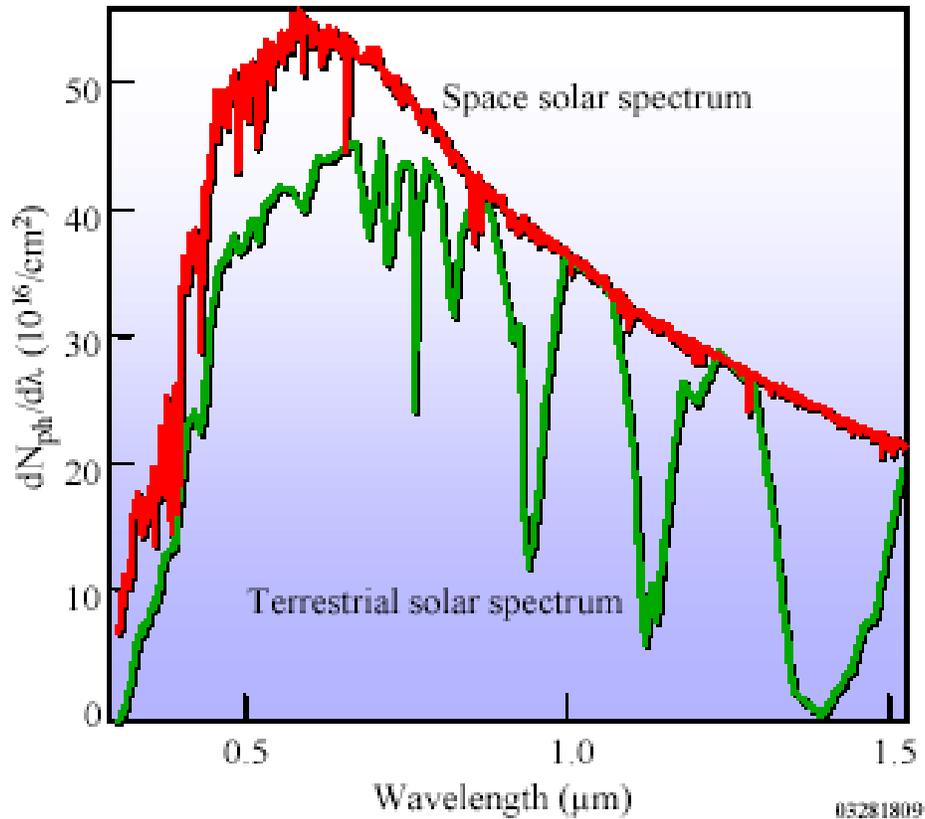


Ilustração 3.3 - Comparação entre a radiação solar incidente no espaço sideral e na superfície terrestre (13).

Atualmente, em condições de laboratório, protótipos de células solares de multijunção conseguem atingir uma eficiência de conversão de aproximadamente 43% enquanto que as células em uso no mercado conseguem atingir aproximadamente 30%.

Os acréscidos custos associados a tal opção são proibitivos, o que limita a aplicação de células solares de multijunção para funções nas quais a eficiência é um fator fulcral assim como a relação preço-desempenho, como por exemplo na indústria aeroespacial, mas especificamente em satélites orbitais.

Em teoria, se um número infinito de junções fosse aplicado seria possível atingir um limite teórico de 87%, mas apenas sob luz solar direta e concentrada.

Só em locais específicos como na órbita terrestre é que é possível obter as concentrações de radiação solar exigidas de modo a verdadeiramente tirar partido de uma estrutura multijunção, todavia o uso de concentradores fotovoltaicos pode revelar-se como uma opção passível de tornar o uso de células multijunção algo viável ao nível da superfície terrestre³.

³ A custo acrescido.

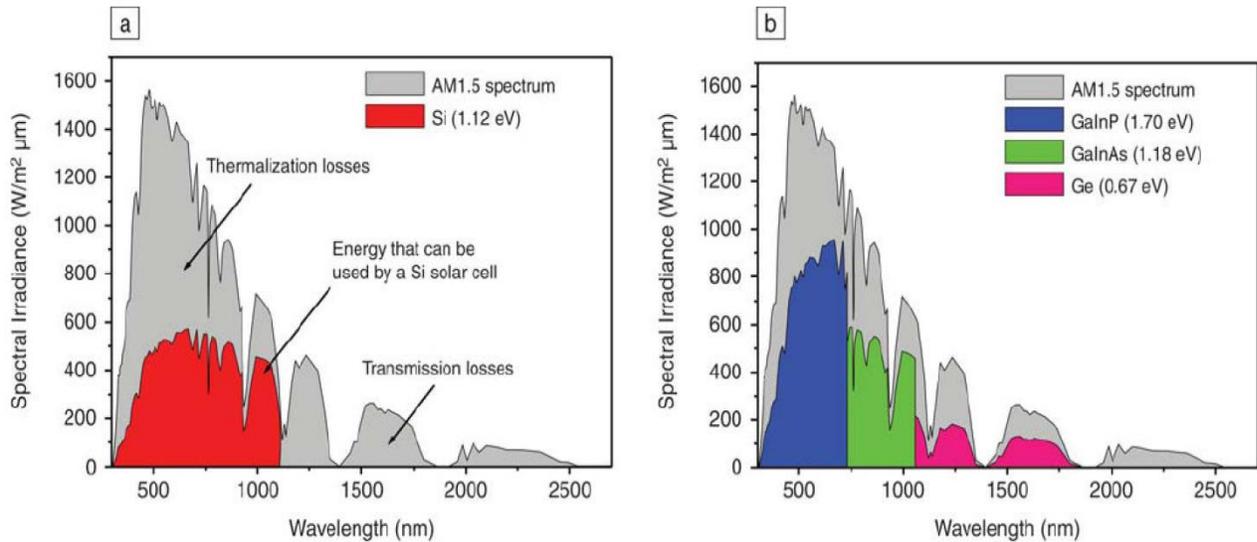


Ilustração 3.4 - Ilustração das perdas por convecção de uma célula solar, assim como a fração de energia convertida e os principais comprimentos de onda absorvidos (14).

A manufatura de uma célula multijunção é um processo dispendioso, em grande parte devido à espessura do material e à dificuldade em extrair a corrente gerada nos elementos semicondutores transparentes entre as células.

Existem duas técnicas para produzir este tipo de células. O método mais simples consiste em criar cada camada e aplicar os vários condutores separadamente. Esta técnica é muito comum para a produção de células de Silício amorfo sendo a mais barata das duas mencionadas neste capítulo. Porém a sua eficiência fica muito aquém do desejado.

O segundo método consiste em integrar as várias junções monoliticamente, através do qual um número de camadas é conectada eletricamente e mecanicamente, este tipo de processo é mais difícil de ser realizado porque cada camada precisa de ser adequadamente ajustada conforme a corrente gerada por cada material, caso contrário os eletrões livres gerados serão absorvidos entre as camadas.

Esta limite implica que a construção deste tipo de células encontra-se restringida a específicos materiais semicondutores, mais particularmente semicondutores do tipo III-V⁴.

⁴ Possuem uma elevada mobilidade relativa ao transporte de cargas, assim a capacidade de se cristalizarem com um elevado grau de estequiometria

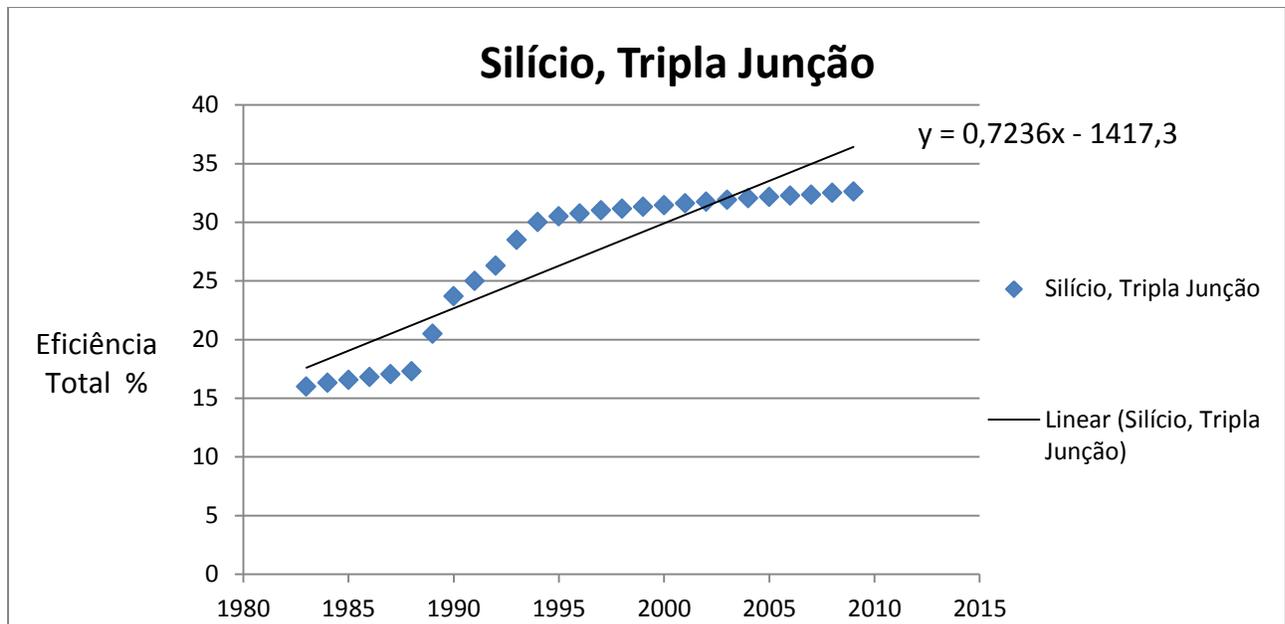


Ilustração 3.5 - Eficiência total de conversão de células de silício de tripla junção (11).

Para todas as configurações já aplicadas os aumentos das suas eficiências parecem ter atingido o seu limite já a alguns anos atrás. Quaisquer ganhos obtidos em anos recentes têm refletido uma situação de ganhos reduzidos tendo em conta os recursos financeiros investidos.

No entanto, algumas propostas têm sido avançadas com o objetivo de ultrapassar estas limitações. Devido ao facto que este tipo de células solares beneficia em muito de elevados índices de radiação solar, tem sido proposto a aplicação de concentradores solares de modo a melhorar a sua relação rendimento-custo quando instalados em massa.

Existem três tipos de lentes para concentrar a luz, lentes refratárias, pratos parabólicos refletores e dispositivos óticos para guiar a luz. Todos estes concentradores conseguem realizar concentrações de luz superiores em pelo menos duas ordens de escala, como por exemplo valores de 500 a 1000, significando que uma célula com uma área de $1dm^2$ conseguiria coletar toda a luz concentrada que equivaleria a uma área total de $1m^2$.

Em última análise todas as células multijunção de 3 camadas apresentam um limite teórico de 63%, sendo esta a configuração mais utilizada.

3.2 Tecnologia de Segunda Geração

3.2.1 Filme Fino Amorfo

Tecnologias de segunda geração envolvem a utilização de diferentes materiais que permite a aplicação de substratos mais finos denominados por filme fino. Como resultado, menos material será aplicado, numa tentativa de baixar os custos materiais.

Estes tipos de células solares são manufacturados através da deposição de uma ou mais camadas finas de materiais fotossensíveis em substratos. A espessura destas camadas pode variar entre alguns nanómetros e alguns micrómetros (15).

Vários materiais cumprem os requisitos necessários, todos eles pertencentes aos grupos XI, XIII e XVI da tabela periódica. Os elementos em questão para cada grupo são:

O Cobre, Prata e Ouro encontram-se no grupo XI. Elementos pertencentes a este grupo são maleáveis e em alguns casos muito resistentes à corrosão e a reações oxidantes⁵.

Elementos como por exemplo Alumínio, Gálio e Índio pertencem ao grupo XIII. Os elementos deste grupo são caracterizados pela presença de três eletrões de valência por como uma elevada maleabilidade (à exceção do Boro) e por uma tendência em criar composto reativos com o Hidrogénio

Os elementos Silício, Selénio e Telúrio pertencem ao grupo XVI, todavia este grupo também é denominado como grupo IV no campo da física dos semicondutores.

Os elementos deste grupo possuem uma tendência em perder eletrões e quando maiores são os seus núcleos mais facilmente tendem a perde-los ou seja, os elementos que compõem este grupo são ideais doadores de eletrões.

Misturas à base de Cobre, juntamente com Índio, Gálio e Selénio revelaram ser a opção mais viável, oferecendo os mais elevadas de todos os índices de conversão energética para células fotovoltaicas deste género.

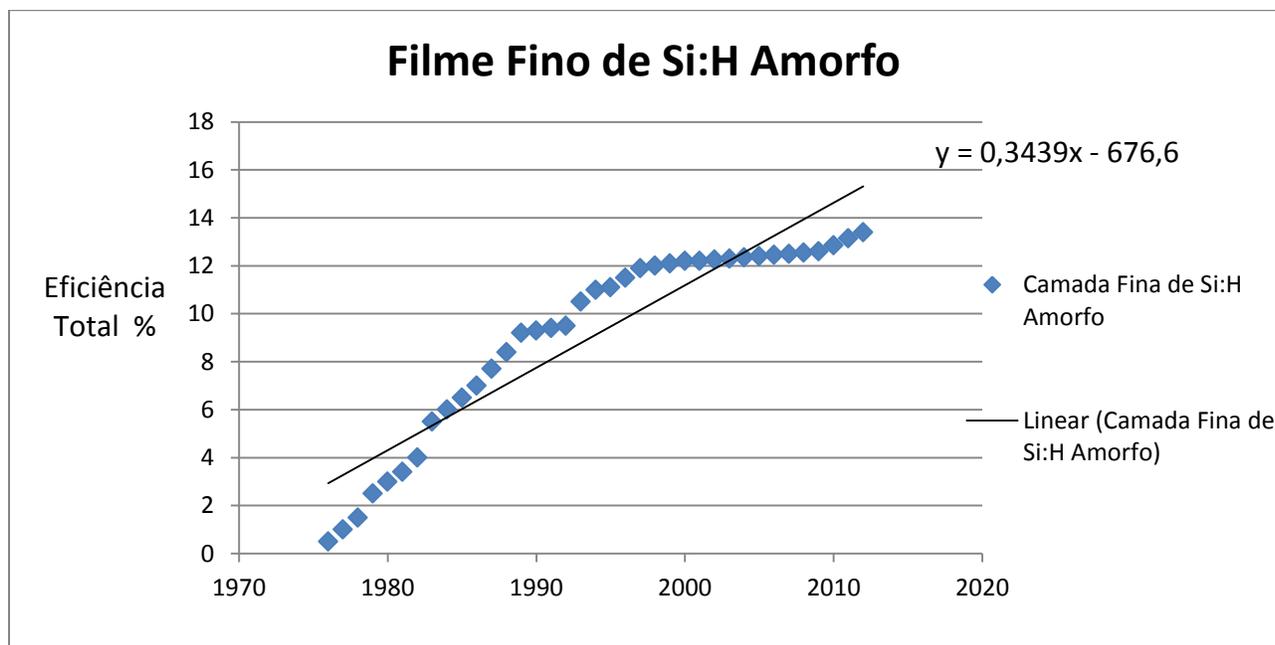


Ilustração 3.6 - Eficiência total de conversão de Silício Amorfo (11).

⁵ No caso do elemento Ouro.

Apesar das células anteriores terem sido descritas como “amorfas” é com as células de filme fino que esta descrição é mais viável. Neste caso a organização das partículas individuais em cada camada encontra-se verdadeiramente desprovida de padrões, enquanto que para casos anteriores apenas a sua macroestrutura era considerada como “amorfa”. Uma célula de filme fino usa um material amorfo proto cristalino, podendo também tirar partido de estruturas nanocristalinas.

Esta estrutura microamorfa combina dois tipos de estruturas de Silício amorfo e microcristalino, cada uma destas respetivamente no topo e na base da célula. Estes dois materiais encontram-se em posições diferentes devido às suas capacidades em absorver luz pertencente a diferentes partes do espectro.

Apesar de serem compostos pelo mesmo material, Silício, este encontra-se organizado de maneira diferente, resultando em diferentes bandas de condução.

O Silício amorfo apresenta uma banda de condução de aproximadamente 1.7 eV enquanto que Silício cristalino apresenta uma banda de condução de aproximadamente 1.1 eV, permitindo absorver energia proveniente do espectro que corresponde à luz de tom vermelho.

A presença de duas bandas de condução permite abranger a captação espectral da célula de estrutura microamorfa.

O Silício é primariamente aplicado através de deposição química a vapor, normalmente por meio de gás ionizado de Silano ou Hidrogénio. Outras técnicas incluem a implementação de “esqueletos” sob a forma de condutores quentes de modo a “orientar” a deposição do Silício.

Cada junção normalmente encontra-se disposta no sentido PN em vez do habitual NP. A razão para tal escolha reside na mobilidade dos eletrões em estruturas amorfas, sendo esta aproximadamente uma ou 2 ordens de magnitude superiores do que os “buracos”⁶ disponíveis.

A quantidade de eletrões que se deslocam no sentido NP é superior aos buracos presentes no sentido PN. Como consequência, os elementos doadores de eletrões devem ser colocados no topo, onde a intensidade da luz incidente é superior.

⁶ Ausência de um ou mais eletrões na camada de valência de um átomo.

Alguns exemplos serão apresentados:

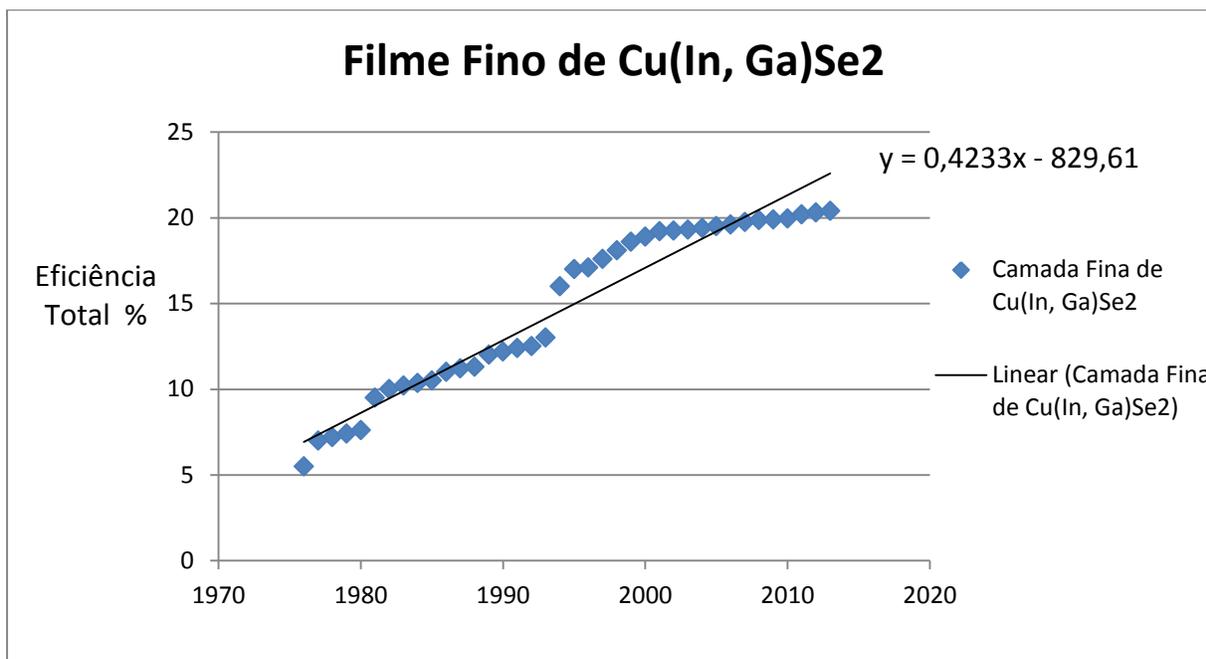


Ilustração 3.7 - Eficiência total de conversão de uma liga de filme fino de Cu(In, Ga)Se2 (11).

Ligas de Cádmio e Telúrio oferecem uma alternativa que apresenta um equilíbrio entre eficiência e preço.

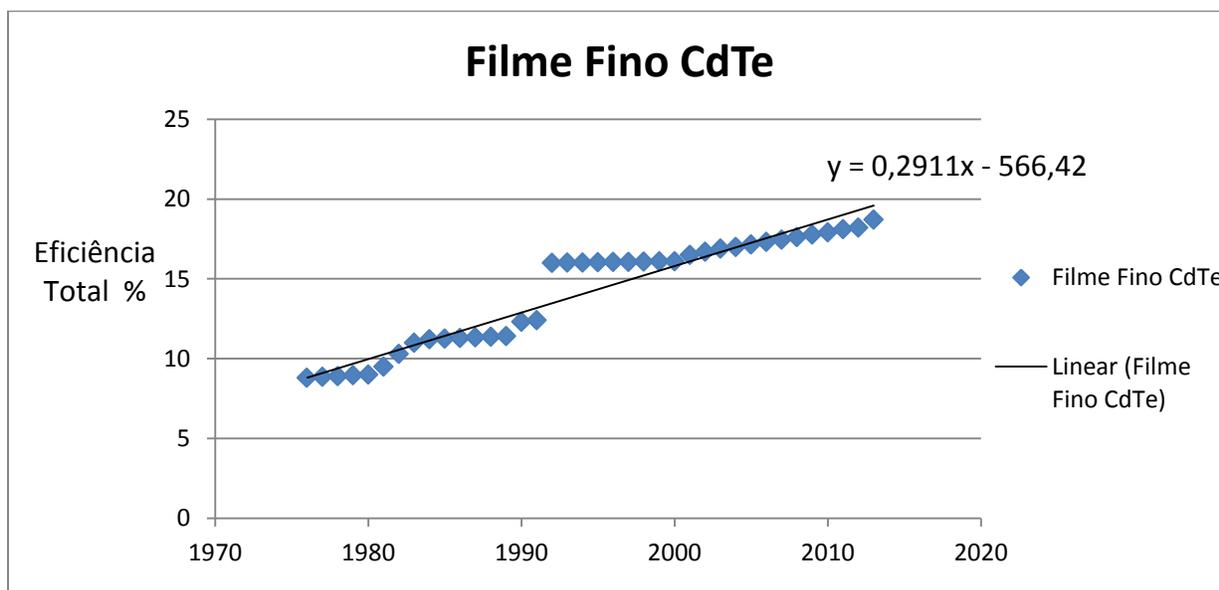


Ilustração 3.8 - Eficiência total de conversão de uma liga de CdTe em filme fino (11).

Mais uma vez, em todas as situações encontra-se a mesma tendência para ganhos reduzidos ao longo dos anos, o que indica que estas abordagens tecnológicas pelo menos no que toca a índices de conversão energética, atingiram uma fase de maturidade.

3.3 Terceira Geração

O termo “célula solar de terceira geração” aplica-se a células solares que apresentam o potencial em ultrapassar o limite de Shockley-Queisser para configurações que apresentem uma junção.

Dentro desta definição pode-se encontrar configurações correspondentes a sistemas com múltiplas junções, células de Silício amorfo, assim como outras abordagens mais experimentais como por exemplo conversores de frequência e a ejeção de múltiplos elementos transportadores de carga elétrica.

O termo é inevitavelmente ambíguo e inclui variadíssimas tecnologias como por exemplo células à base de polímeros, tecnologia de pontos quânticos, sub conversão de fotões e algumas tecnologias térmicas solares, mas talvez a tecnologia mais promissora seja a aplicação de várias nanoestruturas que possuem propriedades radicalmente diferentes quando comparadas com as de macroestruturas.

Devido ao enorme leque de possíveis abordagens, apenas algumas inovações serão mencionadas, entre as quais células orgânicas, pontos quânticos e a aplicação de grafeno assim como nanotubos de carbono.

3.3.1 Células Orgânicas

Células orgânicas de terceira geração apresentam uma tendência contrária às apresentadas até agora, uma vez que o seu crescimento apresenta uma tendência exponencial.

Infelizmente os seus índices de conversão energética ainda se encontram muitos baixos, pelo que este tipo de materiais e a sua configuração ainda necessitarão de alguns tempo para alcançar os valores de conversão energética atingidos por células fotovoltaicas de primeira e segunda geração.

Pesquisas recentes têm demonstrado a eficiência de materiais não metálicos, como por exemplo materiais orgânicos à base de polímeros, em converter radiação solar em energia elétrica.

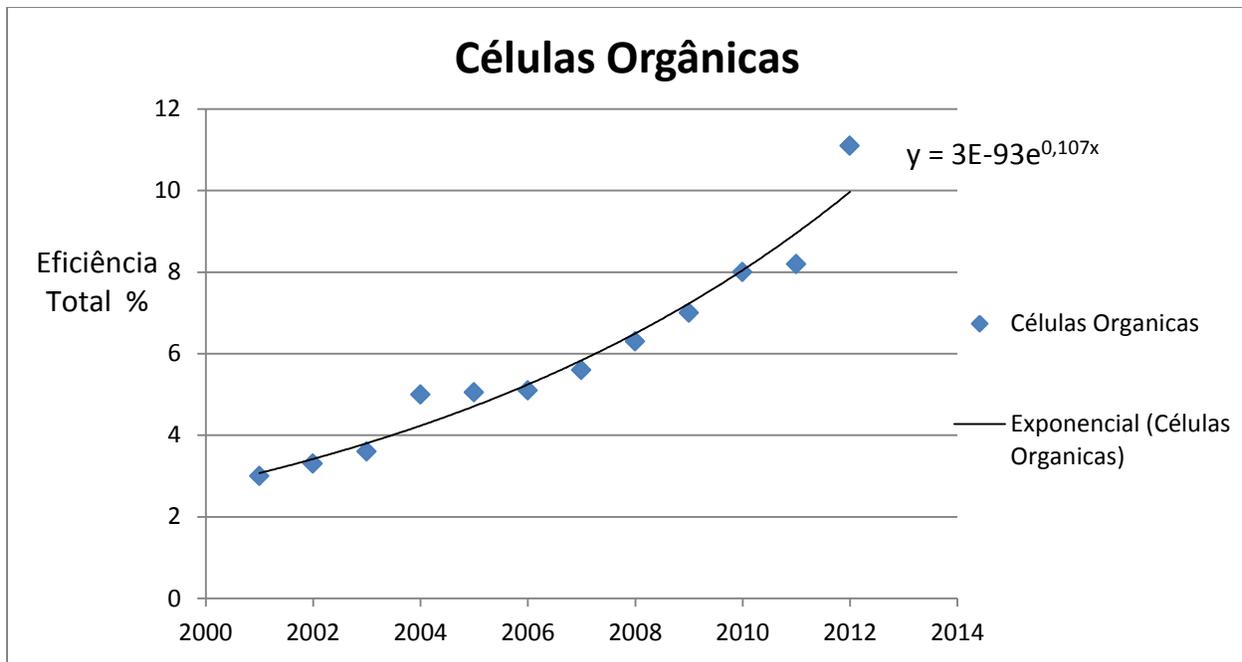


Ilustração 3.9 - Eficiência total de conversão para células orgânicas (11).

A principal razão para a utilização de compostos à base de polímeros reside no seu potencial baixo preço de produção em elevados volumes assim como a sua inerente flexibilidade estrutural, o que permitiria a sua colocação em diversões tipos de superfícies com várias geometrias.

Outra vantagem crucial reside no normalmente elevado coeficiente de absorção ótico, resultando no facto que uma elevada fração da luz incidente é absorvida apenas com uma fina camada de material.

Apesar da presença de algumas vantagens cruciais, todas as células à base de polímeros possuem uma baixa eficiência de conversão total, baixa estabilidade e são relativamente frágeis quando em comparação com células inorgânicas.

Quando estes materiais absorvem um fotão, uma secção da cadeia da molécula que compõem o polímero torna-se excitada. Este estado excitado pode ser considerado como um par de cargas positivas e negativas conectadas por uma interação electroestática.

Em células fotovoltaicas estas interações electroestáticas (excitões) são quebradas em pares eletrão-buraco livres através de campos efetivos. Estes campos são criados através da implementação de uma junção heterogénea entre dois materiais dissimilares, quebrando as interações electroestáticas e “empurrando” o eletrão da camada de valência do material doador para a banda de condução pertencente à molécula recetora. O material recetor tem que ter por requisito uma banda de condução mais baixa do que a do material doador.

Em termos práticos as células orgânicas são configuradas em duas principais variantes, monocamada e dupla camada.

Estruturas em monocamada são consideradas as mais simples, sendo compostas basicamente por uma camada de material orgânico que se encontra entre duas camadas de materiais metálicos condutores.

A camada absorvente é normalmente composta por um óxido de Latão e Índio, enquanto que a camada recetora é composta por uma liga metálica à base de Alumínio, Magnésio e Cálcio.

A diferença de potencial presente entre estas duas camadas visa criar um campo elétrico que atravesse a camada orgânica. Quando esta camada absorve fotões, eletrões são excitados como consequência, sendo estes transferidos da camada superior metálica para a camada inferior metálica, ou seja, a diferença de potencial presente entre as camadas superiores e inferiores irá empurrar os eletrões para o elétrodo positivo e ao mesmo tempo criará “buracos” (criação de carga positivas) no elétrodo negativo.

Como resultado deste processo será criada uma corrente que oferecerá ao sistema uma tensão. Todavia, recorrer a campos elétricos de modo a gerar este processo não é o método mais prático para provocar o transporte de eletrões uma vez que células que possuem hétero junções que dependem de campo efetivos têm demonstrado ser mais eficientes.

Este tipo de estrutura não é eficiente, pois possui baixos rendimentos quânticas (<1%) assim como baixos rendimentos de conversão total (<0.1%).

Células orgânicas de monocamada dependem da geração de um campo elétrico, infelizmente este campo elétrico normalmente não é suficiente para gerar a movimentação sustentada de eletrões uma vez que estes normalmente se recombinam com os buracos gerados.

Células orgânicas de multicamada foram concebidas de modo a lidar com este problema, este tipo de célula possui dois tipos diferentes de camadas orgânicas entre os elétrodos (camadas metálicas condutoras). Estas camadas orgânicas possuem diferenças em afinidade eletrónica e energias de ionização e como resultado uma força electroestática é gerada no contacto entre as duas camadas (16).

Estes materiais são escolhidos adequadamente de modo a que as diferenças sejam largas o suficiente a fim de resultar em campos suficientemente fortes. Como resultado desta abordagem torna-se possível criar um transporte melhor sucedido de eletrões entre os elétrodos e de uma maneira muito mais eficiente do que o que se encontra presente em células de uma única junção PN.

Esta abordagem, apesar de resolver o problema apresentado anteriormente, também gera novos problemas. Normalmente o comprimento de difusão para um transporte de eletrões com sucesso precisa de ser inferior a 10nm.

Dentro destas dimensões torna-se possível para a maior parte dos eletrões atingir a interface entre as camadas orgânicas de modo a se tornarem transportadores de cargas “bem sucedidos”. Como tal a espessura de cada camada deve encontrar-se dentro destas dimensões.

Cada uma destas camadas necessita de ter uma espessura de pelo menos 100nm de modo a absorver luz suficiente. Com estas dimensões apenas uma diminuta porção dos eletrões atinge a interface entre as camadas orgânicas. Para resolver este problema um novo tipo de células, denominada por “células fotovoltaicas de junções heterogéneas dispersas” foi desenvolvido.

Em este tipo de célula fotovoltaica os materiais doadores e receptores de elétrons são misturados, formando uma única camada. Se a escala da mistura se encontrar próxima do comprimento de difusão, poder-se-á concluir que a maioria dos elétrons consegue atingir a interface.

É também ser possível introduzir um terceiro elemento nesta camada sendo que absorverá a luz incidente na célula correspondente a uma parte específica do espectro, ou seja, comportar-se-á como um segundo doador de elétrons.

A organização e distribuição dos materiais que compõem a camada orgânica podem apresentar duas configurações, a primeira, denominada por “transferência de carga” apresenta dois agentes doadores de elétrons a contribuírem diretamente para a produção de elementos transportadores de carga. A segunda configuração apresenta o material terciário apenas a absorver fotões e a transferir a energia que obteve para o outro material doador de elétrons, ou seja, algo equivalente a um circuito paralelo.

Todas as células orgânicas, independentemente da sua configuração, apresentam certas limitações, que têm que ser ultrapassadas ou minimizadas. Possuem uma eficiência quântica baixa quando em comparação com outros tipos de células fotovoltaicas, em grande parte devido a grande banda de condução normalmente presente em materiais orgânicos.

Também apresentam uma certa instabilidade relativamente a reações de oxidação assim como uma certa vulnerabilidade a variações de temperatura.

Apesar destas limitações, a derradeira razão porque várias tecnologias de terceira geração constituem uma grande promessa reside não nos seus índices de eficiência total de conversão mas sim na esperança de que a impressão de dispositivos eletrónicos se torne uma realidade, algo que em última análise permitiria a impressão de circuitos eletrónicos em substratos flexíveis e a preços extremamente baixos devido à sua aparente simplicidade estrutural e baixo consumo energético (17).

O mais importante benefício da impressão eletrónica reside no seu baixo custo quando produzido em massa, este baixo custo de produção permitirá pela primeira vez a instalação de painéis eletrónicos em aplicações mundanas como por exemplo em sistemas de identificação assim como na indústria dos transportes, vestuário, decoração de interiores e na imprensa.

O termo “impressão eletrónica” encontra-se inevitavelmente relacionado com eletrónica orgânica ou eletrónica à base de substratos de plástico dos quais uma ou mais das tintas aplicadas são compostas à base de carbono (18).

O método de aplicação destas tintas normalmente pode ser através de deposição ou através da sua implementação a vácuo. O material aplicado pode, por seu turno ser qualquer um que seja sob a forma de soluções, incluindo semicondutores orgânicos e inorgânicos, assim como metálicos, nanopartículas, nanotubos, etc.

A grande (suposta) vantagem deste método reside na utilização de uma vasta gama de metodologias convencionais já em utilização em indústrias que envolvem a impressão convencional, como por exemplo a aplicação de várias camadas da solução de modo a criar uma estrutura estratificada.

3.3.2 Pontos Quânticos

Um ponto quântico é um nanocristal composto por semicondutores que é pequeno o suficiente para exibir propriedades quânticas. Por sua vez as propriedades mecânicas destes materiais encontram-se entre as de semicondutores convencionais e de moléculas discretas.

As características eletrônicas de um ponto quântico encontram-se proximamente relacionadas com o seu tamanho e forma. Por exemplo a largura de banda de um ponto quântico determina a frequência da luz emitida por este, estando esta inversamente relacionada com o seu tamanho, ou seja, quanto mais pequeno é o ponto quântico, mais para o azul a luz emitida tende a ser.

A composição do nanocristal define a sua sinalização energética mas o tamanho do nanocristal também define a sua “zona de confinamento”, sendo esta zona mais significativa a níveis energéticos mais próximos do seu intervalo de banda. Como resultado desta correlação, cristais com a mesma composição, mas de tamanhos diferentes emitirão luz a comprimentos de onda diferentes.

Pontos quânticos de maiores dimensões conseguem absorver fotões que possuem um nível energético mais baixo. Existe uma relação inversamente proporcional entre a energia do intervalo de banda e o tamanho do ponto quântico.

Em teoria, se a estrutura cristalina apresentar um diâmetro inferior ao tamanho dos seus excitações (o raio de Bohr), os excitações serão confinados muito próximos uns dos outros, levando a um fenómeno denominado por “confinamento quântico”.

Os pontos quânticos podem ser considerados como dentro de um regime de confinamento fraco ou forte, para a primeira situação verifica-se que o raio encontra-se dentro do raio de Bohr enquanto que a outra refere-se a uma situação na qual o seu raio é superior ao raio de Bohr.

Caso o seu tamanho seja pequeno o suficiente, como por exemplo inferior a 10nm, encontrar-se-ia em um regime de confinamento forte e como consequência as suas propriedades eletrônicas e óticas poderiam detalhadamente controladas. Pontos quânticos considerados de pequena escala encontram-se entre os 2 a 10nm. Pontos quânticos de proporções mais comuns encontram-se entre os 10 a 50nm.

A energia do intervalo de condução é determinada através da seguinte fórmula:

$$a_b = \epsilon_r \left(\frac{m}{\mu} \right) a_b \quad (6)$$

- a_b é o raio de Bohr, de aproximadamente 0.053nm.
- m é a massa.
- μ é a massa reduzida.
- ϵ_r é a constante dielétrica, que se encontra dependente do tamanho do cristal.

A energia de confinamento de um excitação é em última análise determinada pelo tamanho do ponto quântico.

Recordemos que um excitação é um fenómeno associado à criação de uma partícula carregada positivamente (o buraco onde o eletrão outrora se localizava) e uma partícula carregada

negativamente (o elétron), ou seja, é uma “dualidade”. Devido a esta associação existe uma atração de Coulomb. Quando o tamanho do nanocristal semiconductor é alterado para valores inferiores aos do raio de Bohr, a atração de Coulomb é alterada de modo a coincidir com a situação.

O somatório de todas as energias envolvidas é representado através da seguinte fórmula:

$$E_{Total} = E_{intervalo\ de\ banda} + E_{confinamento} + E_{excitação} \quad (7)$$

Como resultado do seu tamanho, ocorre um confinamento de elétrons em três dimensões. Contudo outras configurações podem ser realizadas como por exemplo “fios quânticos” que confinam elétrons em apenas duas dimensões espaciais mas permitem o seu livre transporte na terceira e “poços quânticos” que confinam os elétrons em uma dimensão mas permitem o seu livre-trânsito nas restantes duas.

Ao contrário das células fotovoltaicas clássicas, nas quais o intervalo da banda de condução encontra-se fixo, células fotovoltaicas compostas por pontos quânticos podem ter as bandas de condução em cada junção facilmente ajustadas de modo a melhor funcionarem em conjunto, para absorverem a luz solar eficientemente.

Como tal, uma célula fotovoltaica composta por pontos quânticos seria especialmente útil se esta possui-se uma estrutura distribuída em múltiplas junções.

Mas a verdadeira vantagem associada à utilização de pontos quânticos reside na possibilidade de se obter uma célula fotovoltaica que opere em vários intervalos de banda sem ter que se recorrer a diferentes materiais ou até a diferentes métodos de manufatura.

Outra vantagem importante reside na capacidade de células compostas por pontos quânticos gerarem múltiplos excitações por cada fóton absorvido, ou seja existe uma multiplicação dos agentes de transporte de cargas elétricas.

A chave para tal reside no fato que um ponto quântico consegue gerar múltiplos excitações a um nível energético inferior, em vez de um único excitação a nível superior. O rendimento da célula cresce devido a um aumento da corrente elétrica gerada pela absorção do fóton.

Apesar destas aparentes vantagens, ainda seria conveniente criar uma célula de pontos quânticos à base de Silício. Sendo Silício abundante, uma vez concebido um método de produção em massa barato o suficiente tornar-se-ia possível para células de pontos quânticos competirem no mercado (19)

Atualmente células deste género apenas atingem rendimentos de conversão máximos na ordem dos 7.0%, todavia a esperança que ultrapassem o rendimento de conversão de células atualmente comercializadas a preços comparáveis é algo que muitas entidades privadas ainda mantêm.

3.3.3 Grafeno

A elevada mobilidade oferecida aos elementos transportadores de carga em Grafeno torna-o ideal como um elemento para a coleção e transporte de cargas em sistemas fotovoltaicos. O seu intervalo de banda encontra-se entre 1.4 e 1.9eV.

O Grafeno possui uma elevada condutividade elétrica assim como uma elevada transparência ótica. O fato que este material apenas absorve 2.3% da luz visível torna-o um bom candidato a aplicações que exigem um condutor transparente. As camadas de Grafeno produzidas normalmente possuem grânulos indesejados que agem como focos de recombinação (diminuem a condutividade elétrica do material) nas suas fronteiras tornando necessário a aplicação de uma segunda camada atômica (20).

Filmes de Grafeno possuem uma elevada transparência nas regiões visíveis e próximas do infravermelho assim como apresentam uma elevada estabilidade química e térmica.

Várias tentativas têm sido realizadas ao longo dos anos para aumentar a sua eficiência: Mais recentemente em 2013 uma equipa de investigadores pertencentes ao departamento de Física da Universidade Oxford conseguiram atingir uma eficiência final de conversão de aproximadamente 15.6% recorrendo a uma combinação de Óxido de Titânio e Grafeno como o elemento coletor e transportador de carga, juntamente com Óxido de Cálcio e Titânio (*Perovskite*) como elemento absorvente de luz solar.

Uma adicional vantagem deste processo reside no fato que tais dispositivos são manufacturados a 150°C através de deposição química de uma solução.

De modo a tornar viável a comercialização de Grafeno ainda é necessário conceber um método de produção a larga escala economicamente viável, algo inexistente de momento, todavia, certos progressos têm sido feitos. Várias esperanças têm sido colocadas em um processo viável à base de deposição química por vapor.

Em 2008 este método foi primeiro atingido através da deposição de átomos de Carbono em uma superfície de Níquel através do uso de Gás metano, de seguida uma camada protetora termoplástica é aderida ao Grafeno sendo depois o Níquel dissolvido em banho ácido.

Finalmente a camada de Grafeno é adicionada a um substrato flexível composto por um polímero. Graças ao uso deste substrato existe a esperança de utilizar rolos de imprensa capazes de produzir vastas áreas de células solares a um preço reduzido.

Adicionalmente, o Grafeno também pode potencialmente ser aplicado como um ponto quântico graças ao seu reduzido tamanho (menos de 10nm) assim como devido à sua geométrica cristalográfica⁷ que por sua vez define muitas das suas propriedades magnéticas, óticas e elétricas.

Entre os potenciais métodos de manufatura existe a deposição de Grafite através de métodos mais convencionais à base de soluções. O seu confinamento quântico pode ser controlado através de mudanças da espessura dos nanoligamentos de Grafeno.

⁷ Geometria dos seus cristais.

3.3.4 Nanotubos de Carbono

Nanotubos de Carbono há muito que são vistos como um candidato ideal para serem aplicados em células solares orgânicas, como por exemplo polímeros e alguns compostos orgânicos de cadeias curtas, manufaturadas através de sistemas de impressão eletrônica.

No caso de se desejar um único nanotubo de Carbono composto por uma única camada com um diâmetro definido, também designado por “nanotubo de monocamada”, a intenção seria a sua aplicação como um díodo de junção PN “*quasi-ideal*”. Nanotubos de carbono podem também ser concebidos em estruturas com múltiplas camadas, cada camada subsequente apresentaria um diâmetro cada vez maior.

Tal atribui-se a diversas propriedades pertencentes aos nanotubos de Carbono, primeiramente possuem diversos intervalos de banda que coincidem com vários pontos no espectro solar, também possuem uma forte foto absorção que se estende desde o infravermelho até ao ultravioleta (21).

Outras importantes propriedades que se devem ter em mente são a elevada mobilidade dos elementos transportadores de carga assim como a sua reduzida dispersão.

Nanotubos apresentam-se como os candidatos ideais para servirem tanto como focos de foto geração ou como uma camada na célula fotovoltaica para facilitar o transporte e coleção de eletrões Para tal haveria uma camada semitransparente composta por nanotubos de Carbono, que por sua vez seria coberta por um substrato cristalino que compõe o terminal N da junção de modo a permitir a existência de hétero junções PN de elevada densidade. A camada cristalina de Silício permitiria a extração de eletrões através de nanotubos que serviram como “buracos”.

A aplicação de nanotubos de Carbono como pontos quânticos coloidais é uma abordagem que apresenta várias vantagens, acima de tudo, permitem que o processo de manufatura e montagem da célula seja realizada à temperatura ambiente (22).

Outra possibilidade reside na sua aplicação como elétrodos transparentes em sistemas fotovoltaicos orgânicos, todavia tal abordagem possui várias deficiências.

O seu elevado custo reside tanto no seu elevado preço por grama como também devido a um elevado desperdício em muitas aplicações devido à distribuição dos nanotubos. Todavia este último problema pode ser parcialmente ultrapassado se várias microestruturas de dimensões controladas forem criadas. Estas estruturas encontram-se dentro de uma matriz polímera, resultando em uma rede organizada de microestruturas (23).

Tal estrutura poderá em teoria oferecer melhor condutividade e uma redução drástica do número de nanotubos requisitados. Dentro de um ambiente isolado (rodeado por um elemento isolante) (23), como por exemplo uma matriz de poliestireno, poder-se-ia em princípio obter uma capacidade excecional para o transportar cargas.

A sua elevada temperatura de deposição, que ronda os 600°C torna impossível a sua integração em substratos compostos por polímeros, uma vez que estes não toleram temperaturas de tal ordem. Adicionalmente possui certas características mecânicas indesejadas, sendo relativamente frágil, algo

que o torna incompatível com o restante sistema fotovoltaico orgânico que supostamente deveria ser flexível.

Outros obstáculos resultam da escassez de Índio, tornando quaisquer eletrodos transparentes dispendiosos. O método de deposição em vácuo também é extremamente caro.

Poderão existir algumas alternativas à deposição química por vácuo, entre as quais a aplicação de coberturas condutivas compostas por nanotubos. Com recurso a “*spraying*”, moldagem, camada por camada e filmes Langmuir-Blodgett⁸.

Outro possível método reside na transferência de uma membrana de filtração para o suporte transparente através do uso de um solvente ou através de um filme adesivo.

Independentemente do método aplicado é desejável que o resultado final se traduza em uma fina camada transparente de nanotubos e flexível ao mesmo tempo.

⁸ Uma camada orgânica resultante da deposição de um substrato sólido em um filme fino aquoso.

Capítulo 4

4. Fatores que definem o rendimento

Todas as células solares são testadas sob condições normalizadas ou STC (*Standard Test Conditions*). Estas condições representam uma massa atmosférica de 1.5 (AM1.5), um índice de radiação de 1000 W/m^2 e uma temperatura ambiente de 25°C . Estas condições correspondem a um dia de céu limpo.

AM representa o coeficiente de massa de ar, que define o percurso ótico direto através da atmosfera terrestre.

O rendimento de uma célula solar pode ser dividido em rendimento refletivo, termodinâmico, condutivo e separação dos agentes de carga. O rendimento final resulta do somatório dos vários fatores. Em associação a estes fatores, uma célula solar também tem uma curva de rendimento em relação à tensão, coeficientes de temperatura e ângulos de sombra.

Existe uma certa dificuldade em medir muitos destes parâmetros diretamente, como resultado, outros parâmetros são medidos como por exemplo rendimento termodinâmico, rendimento quântico, rendimento quântico integrado, rácio V_{OC} (*Open Circuit Voltage*), sendo este último o potencial que se desenvolve entre os terminais da célula solar quando a carga externa aplicada é muito elevada e por último têm-se o fator de preenchimento.

Perdas de reflexão perfazem uma parte do rendimento quântico sob o termo “rendimento quântico externo”, perdas por recombinação perfazem uma porção do rendimento quântico V_{OC} e do fator de preenchimento.

Perdas por dissipação sob a forma de calor durante a circulação da corrente elétrica no circuito são predominantemente caracterizadas através do fator de preenchimento mas podem também corresponder a porções menores do ratio de rendimento quântico V_{OC} .

O fator de preenchimento (*Fill Factor*) é definido como a divisão da potência máxima possível de obter pelo produto da tensão em circuito aberto e a corrente em curto-circuito. Este é um parâmetro crucial de modo a avaliar o rendimento de células solares.

Células solares comerciais normalmente têm um fator de preenchimento na ordem dos > 0.70 , células de grau “B” possuem um fator entre 0.4 e 0.7. Quanto maior for o fator, mais baixa será a resistência em série (ou seja, um curto circuito entre as superfícies superiores e interiores da célula solar).

Usando apenas uma única camada para uma célula solar composta por uma única junção PN cristalina de Silício, o limite teórico de rendimento energético encontra-se à volta dos 33.7%, tal como demonstrado pelo limite de Shockley-Queisser em 1961 todavia, se um número infinito de camadas fosse aplicado a uma célula solar, o limite correspondente encontrar-se-ia à volta de 86%, caso a célula seja banhada por luz solar intensa.

O limite Shockley-Queisser refere-se ao limite teórico máximo de uma célula solar usando apenas uma junção PN. Este limite máximo é um dos parâmetros mais importantes na produção de energia solar e uma das mais importantes contribuições no campo.

Este limite coloca a barreira máxima de rendimento de conversão para uma única junção PN com um intervalo de banda de 1.34eV (volts eletrões) em cerca de 33.7% ($337W/m^2$), assumindo que toda a energia contida na luz solar ($1000W/m^2$) incide diretamente sobre a célula assim como assumindo uma Massa Atmosférica de 1.5. (AM 1.5).

Apesar da adição de múltiplas junções oferecer um superior rendimento de conversão quando comparado com uma única junção, tal abordagem também introduz outros fatores que afetam o rendimento final do sistema, como por exemplo o isolamento entre as junções.

É necessário assumir certos fundamentos quando se lida com este limite. Em primeiro lugar a célula irá conter apenas uma junção PN, que esta junção encontra-se sintonizada para receber e converter luz visível e que qualquer energia em excesso presente nos fotões é perdida. Por outro lado, estes limites não são absolutos e se abordados de maneira diferente poderão ser parcialmente ou totalmente ignorados.

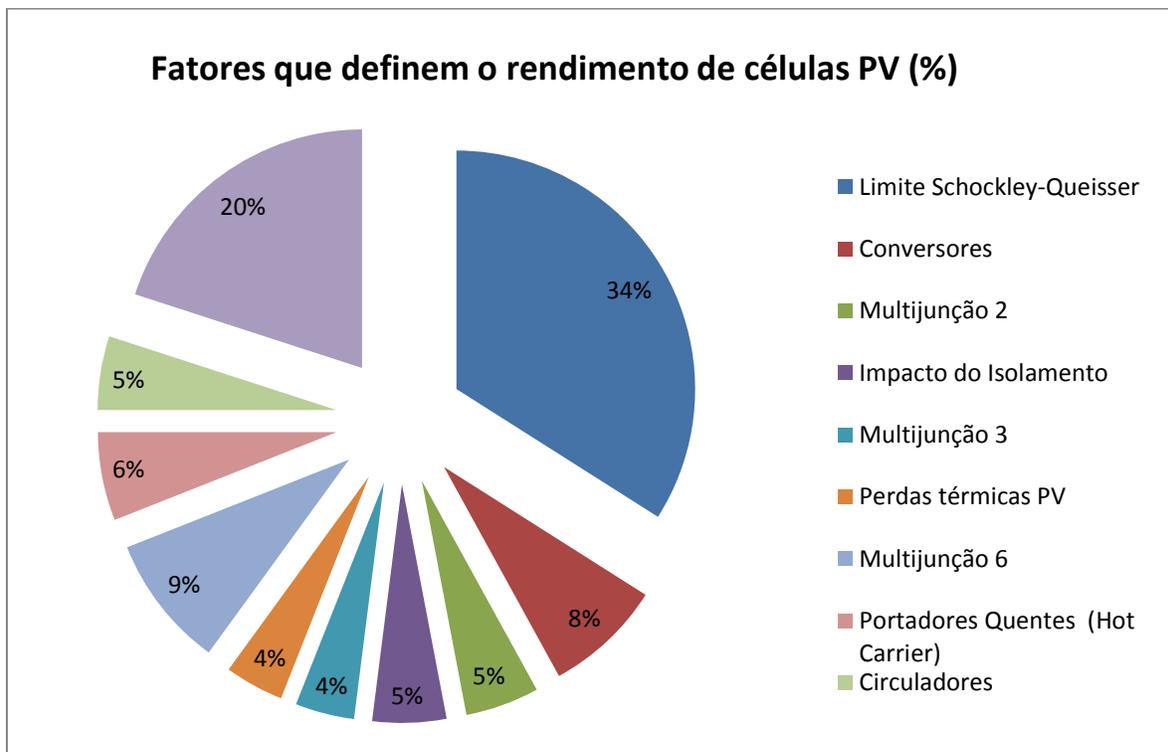


Ilustração 4.1 - Representação dos vários fatores que limitam a eficiência de conversão (24).

O rendimento (η) é calculado dividindo o seu pico de potência (P_m) (W), pelo produto da luz incidente (E) (W/m^2) e da área da superfície sob qual a luz incide (A_c) (m^2): $\eta = \frac{P_m}{E \times A_c}$

Capítulo 5

5. Preços

5.1 Histórico de preços a nível mundial

Da mesma maneira que a Lei de *Moore* dita que o tamanho dos transístores diminuirá para metade a cada 18 meses, a Lei de *Swanson* determina que os preços em \$ por Watt para gerar energia com recurso a células fotovoltaicas diminui cerca de 20% para cada vez que a capacidade de manufatura a nível mundial duplica.

Esta diminuição constante do preço resulta do fato que a manufatura de vários tipos de painéis solares encontra-se cada vez mais massificada. O preço de instalação encontra-se também cada vez mais baixo. Paralelamente à esta descida de preços, verifica-se também um constante (mas cada vez menor) aumento da eficiência de conversão.

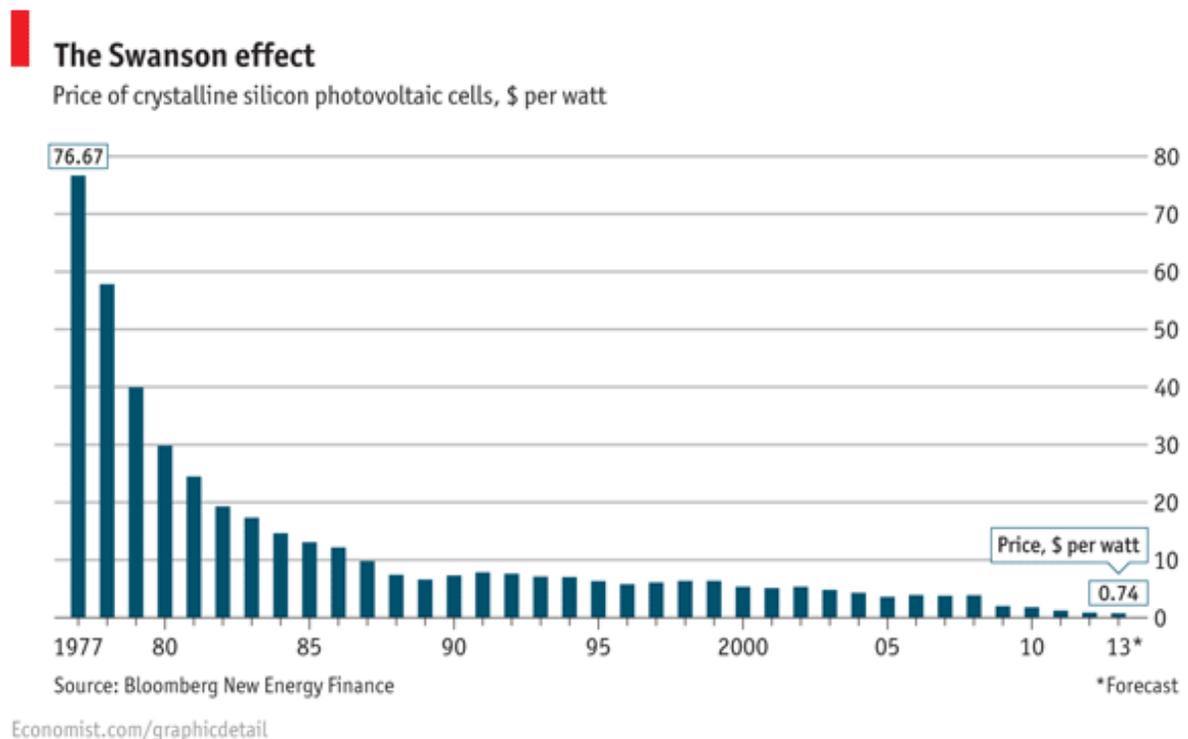


Ilustração 5.1 - Representação do Efeito Swanson (25).

De fato, esta crescente eficiência de conversão energética associada a cada vez mais baixos preços de aquisição e instalação dos módulos, torna possível em regiões com uma grande incidência de luz solar,

que o custo da produção de energia solar possa competir diretamente com os convencionais métodos de geração de energia.

O preço em \$ por Watt de uma célula fotovoltaica composta por Silício cristalino tem descido gradualmente nos últimos anos, todavia menos do que as descidas de preço observadas em décadas anteriores, o que aponta para um amadurecimento das principais tecnologias presentes no mercado, como por exemplo silício mono/policristalina e as várias ligas em filme fino.

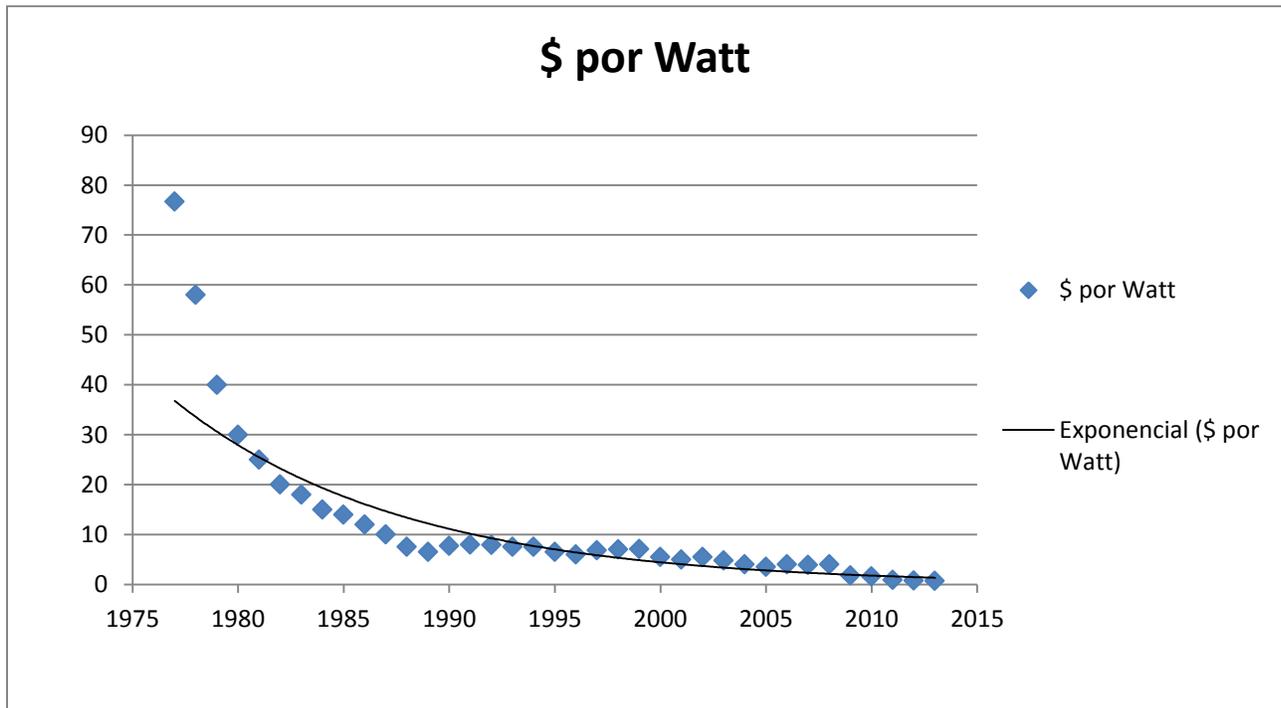


Ilustração 5.2 - Ilustração do preço de energia fotovoltaica por Watt (26).

A tendência assintótica observada no gráfico demonstra o nível de maturidade na tecnologia em análise. Não são esperadas novas descidas abruptas para preços de células cristalinas de Silício⁹.

O seguinte gráfico parcial demonstra a tendência decrescente em maior detalhe. A resultante equação exponencial apresenta um expoente mais elevado, representativo de um superior declive.

A razão para esta escolha reside no fato que a maior parte do gráfico não apresenta qualquer evolução relativamente a um decréscimo do preço, resultando em uma redução do valor do expoente presente na função exponencial.

⁹ No capítulo 9 estes valores são comentados

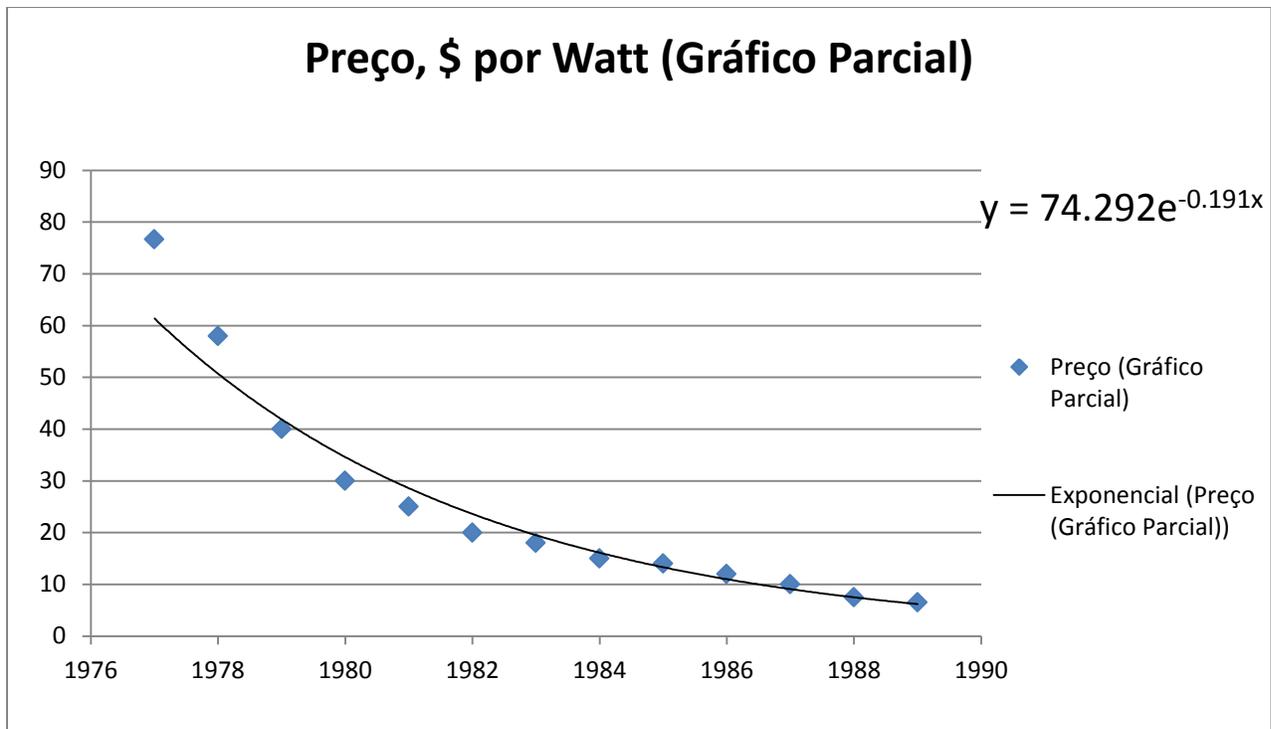


Ilustração 5.3 - Ilustração de um gráfico parcial do preço por Watt.

O expoente de valor mais reduzido não seria um indicador viável para a criação de uma função exponencial, como resultado um gráfico parcial tornou-se necessário.

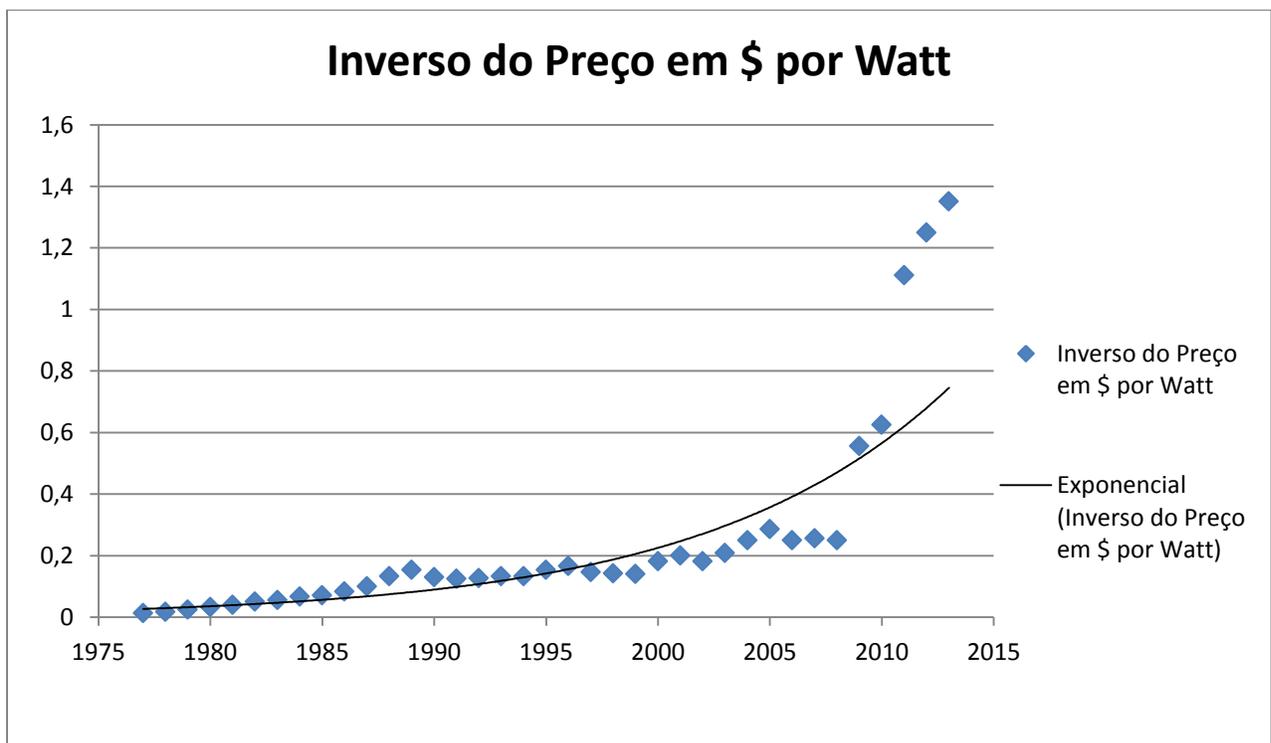


Ilustração 5.4 - Ilustração da função inversa relativa ao preço por Watt.

Ao calcular o inverso da média do preço por Watt observa-se uma tendência exponencial. O objetivo deste gráfico é a apresentação de uma evolução qualitativa em vez de uma evolução acumulativa.

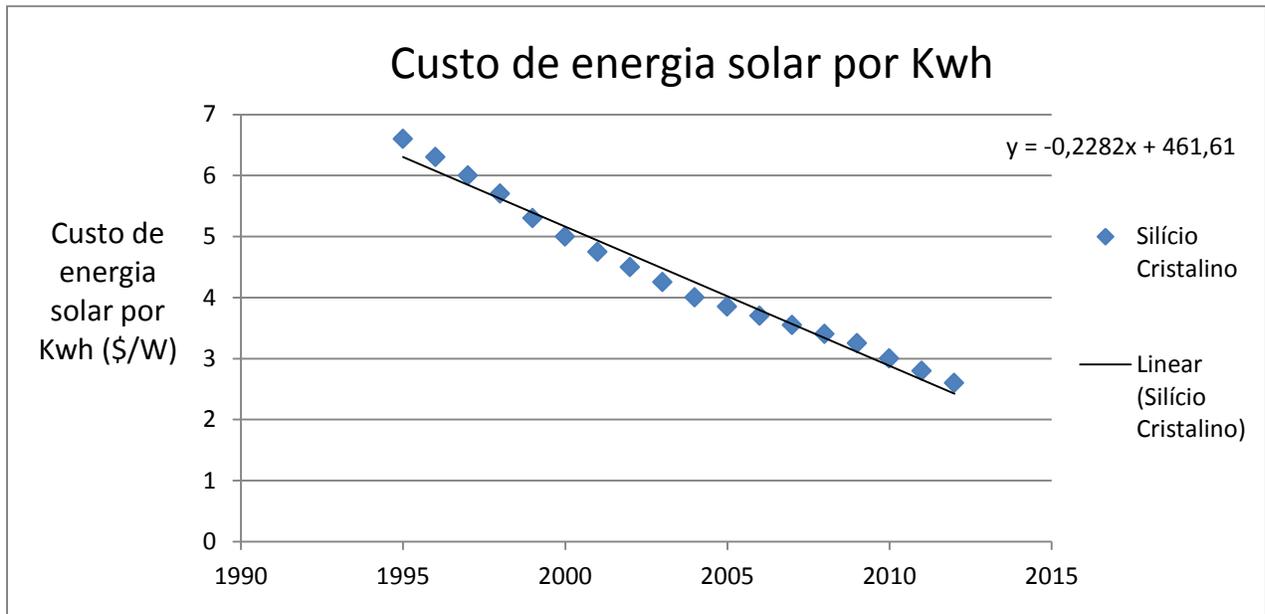


Ilustração 5.5 - Ilustração da evolução do preço de energia fotovoltaica.

Ao contrário do preço médio de cada watt por \$, o preço da energia solar por KWh tem demonstrado um decréscimo constante, semelhante à de uma reta. A ausência de uma tendência decrescente em forma de assíntota demonstra a crescente viabilidade da energia solar em larga escala, uma vez que nestas escalas não demonstra qualquer tendência de abrandamento relativamente até ao presente.

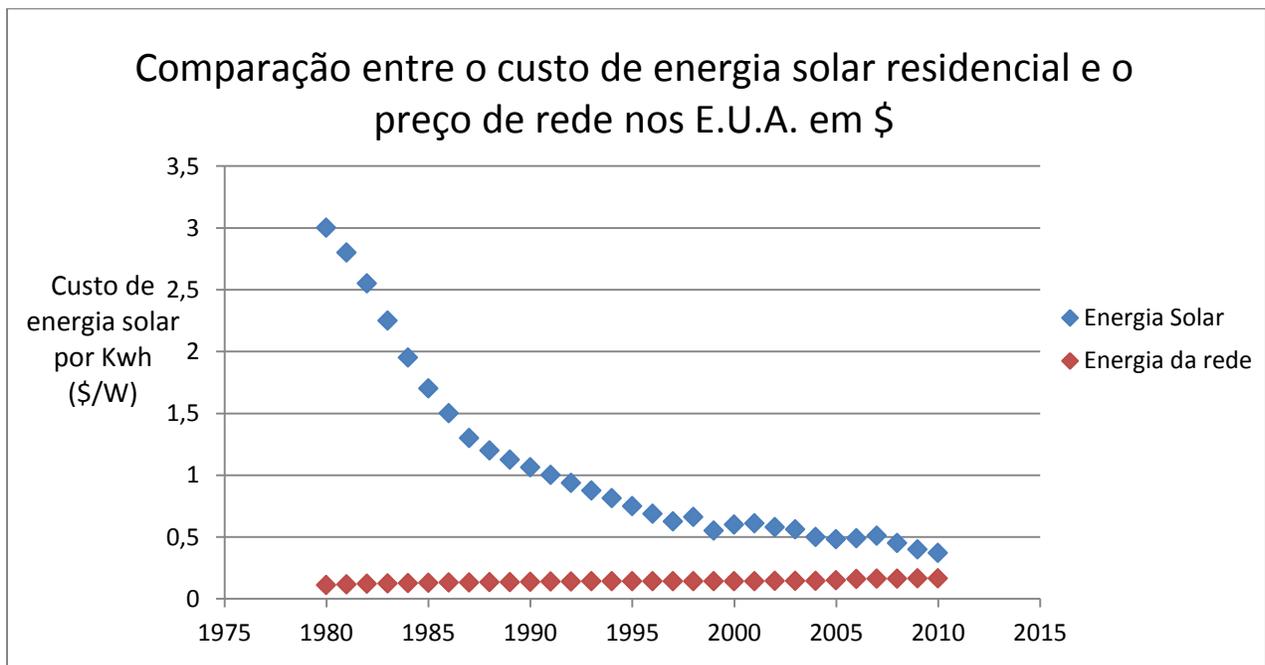


Ilustração 5.6 - Comparação entre os custos por Watt entre fontes convencionais e energia solar (27).

Observa-se uma constante aproximação, por parte do preço da energia solar em relação ao preço de mercado. Esta aproximação regista uma tendência em forma de assíptota.

Ao descer cada vez mais observa-se que os principais fatores que determinam o preço da energia solar com o passar do tempo passam a ser os preços de transporte, pessoal, instalação e adaptação da infraestrutura.

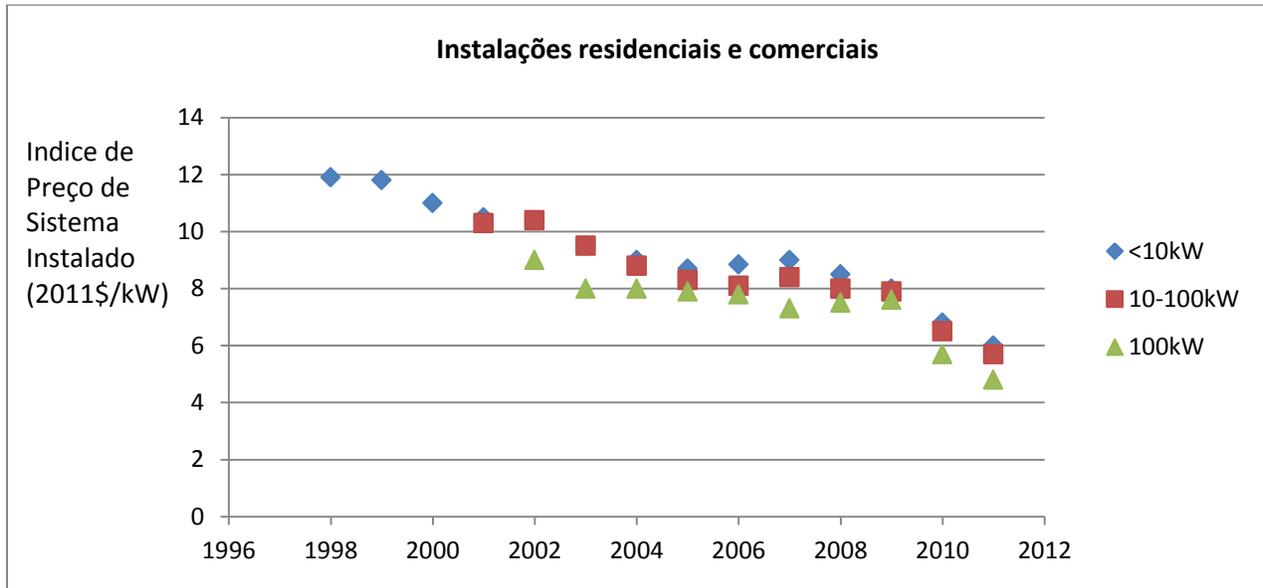


Ilustração 5.7 - Comparação do preço entre sistemas comerciais e residenciais (28).

O seguinte gráfico indica uma tendência decrescente no preço independentemente da escala da infraestrutura aplicada assim como independentemente da natureza da instalação em causa, quer esta seja residencial ou comercial.

O gráfico acima também indica uma tendência decrescente linear para todos os sistemas instalados independentemente da sua escala ou seja, a dimensão do sistema instalado deixou de ser um fator relevante o que claramente favorece a instalação de sistemas de maior escala a longo prazo. Não só isso, mas as potências instaladas na ordem dos 100kW e de valores superiores apresentam o maior decréscimo.

5.2. Produção Mundial de Energia

Ao mesmo tempo que o preço desce, observa-se uma correlação inversamente proporcional relativamente à potência acumulada.

O seguinte gráfico apresenta uma tendência claramente linear no crescimento de toda a potência instalada a nível mundial para todas as fontes energéticas em uso, algo tornado ainda mais claro através da apresentação de uma equação da reta no gráfico presente em cima.

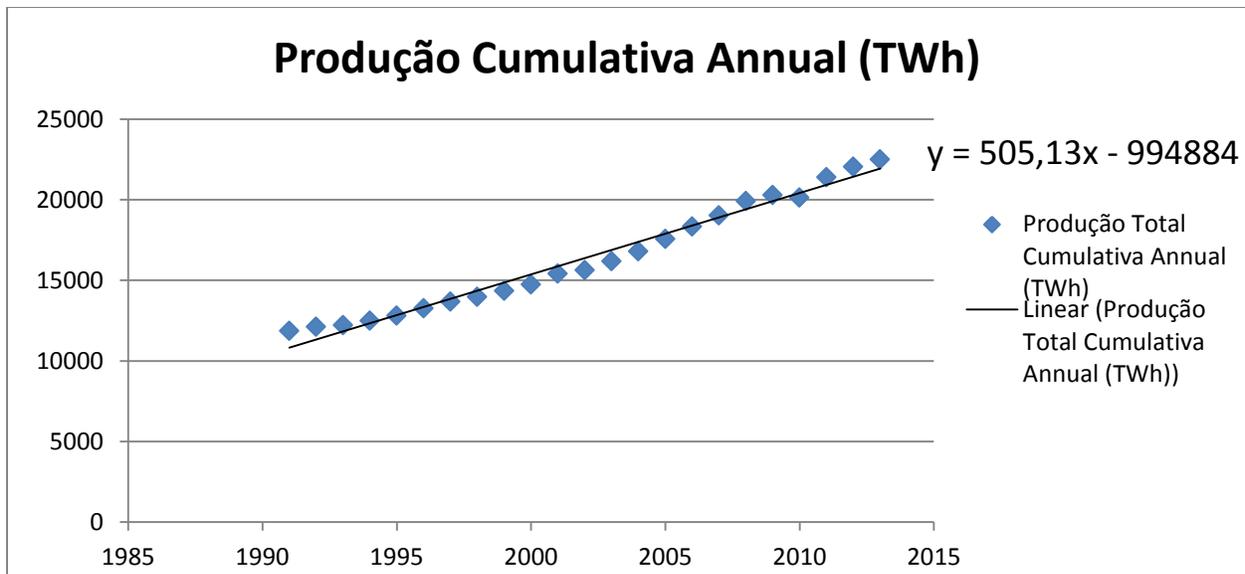


Ilustração 5.8 - Representação da produção acumulativa em TWh (29) (30).

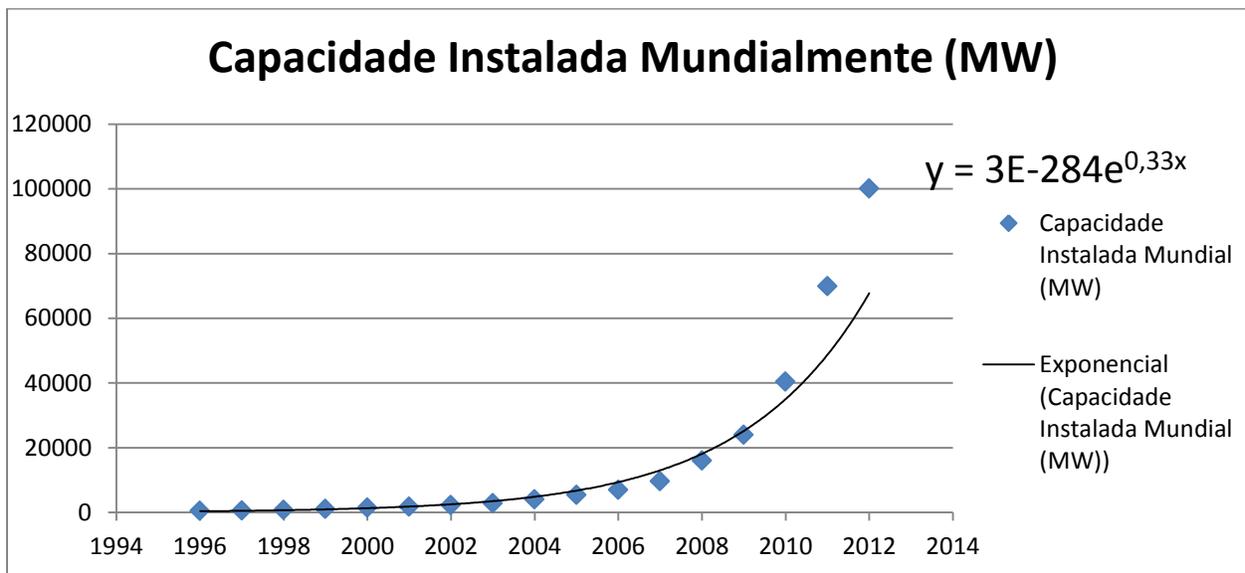


Ilustração 5.9 - Representação da produção total cumulativa anual em MW proveniente de fontes renováveis (27).

Ao comparar os dois gráficos anteriores observamos que enquanto a energia total produzida em todo o planeta apresenta um aumento linear, a potência instalada proveniente de fontes fotovoltaicas aumenta exponencialmente. Tal diferença significa que a porção de energia gerada proveniente de fontes fotovoltaicas aumenta anualmente (31).

Estes dois gráficos podem parecer que não têm nenhuma relação com os gráficos presentes no capítulo 5.1, no entanto são dois fatores que muitas vezes verificam-se ter uma relação inversamente proporcional. Tal fenómeno é atribuído ao conceito de mercado denominado por “produção em massa”, no qual no aumento da produção (que neste caso se traduz na capacidade instalada por ano) resulta sempre em preços cada vez menores.

Capítulo 6

6. Produção Anual

6.1 Produção Anual em MW

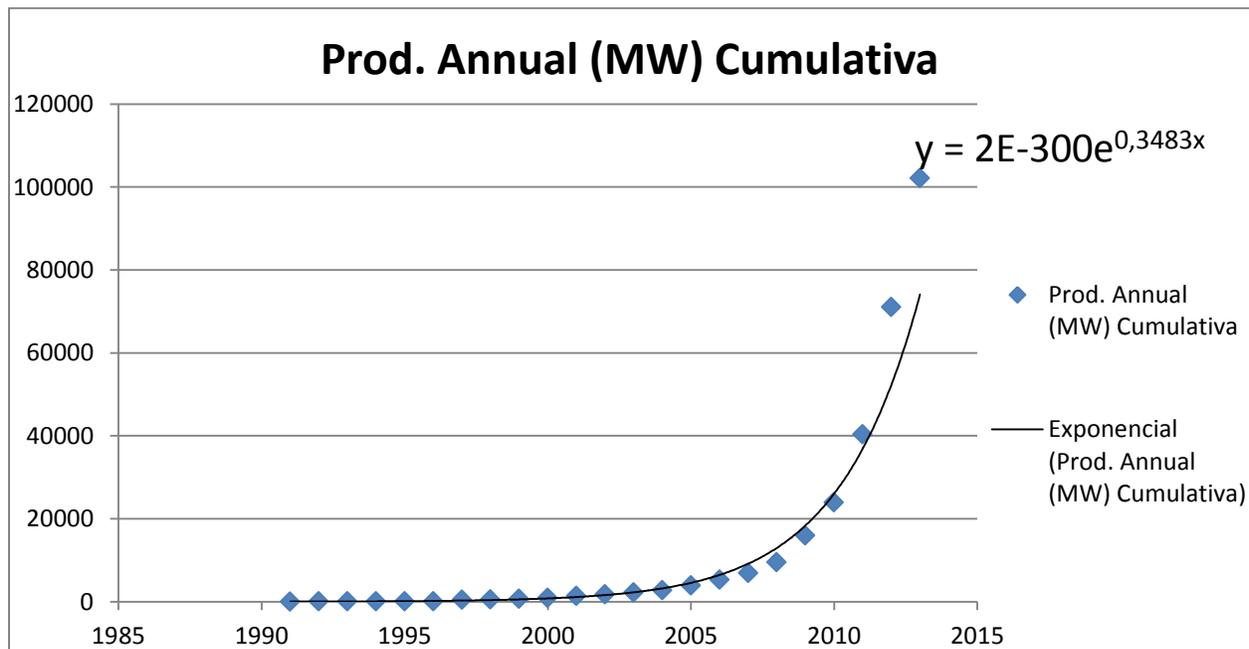


Ilustração 6.1 - Produção anual em MW/Ano proveniente de fontes fotovoltaicas (27).

Observa-se um aumento exponencial por parte da potência instalada. Tal facto demonstra que esta tecnologia ainda se encontra nos primeiros estágios de adoção tal como demonstrado no conceito da curva logística, ou seja, ainda não atingiu uma fase de maturidade no que toca a penetração de mercado.

Poder-se-á considerar esta tecnologia como uma “novidade”, algo que ainda passará por vários estágios de adaptação, quer em termos de reduções de preços finais, assim como a escala da tecnologia aplicada dentro do mercado.

O seguinte gráfico demonstra algo igualmente importante, apesar de um aumento exponencial do valor absoluto relativo à quantidade de energia gerada por fontes fotovoltaicas (MtoE) também é demonstrado que em termos proporcionais a energia solar representa uma porção cada vez maior de energia total gerada a nível mundial.

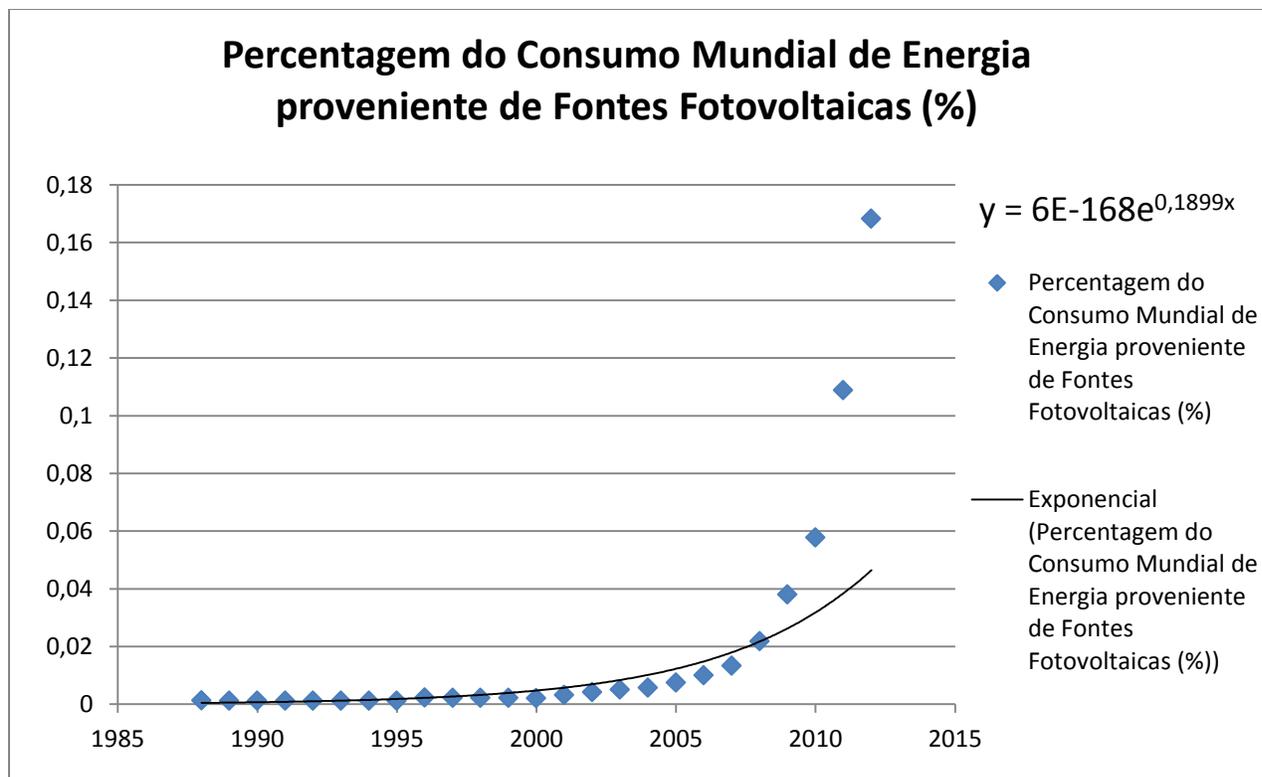


Ilustração 6.2 - Percentagem do Consumo Mundial de Energia proveniente de Fontes Fotovoltaicas (%) (27).

Todavia, aplicar o termo “gerado” para o gráfico em questão é incorreto. O gráfico acima utiliza dados relativos ao “consumo” e não geração de energia. Estes dois fatores muitas vezes apresentam uma baixa correlação entre um e outro, em grande parte devido à dissipação energética ao longo da rede de distribuição (quedas de tensão) assim a dissipação existente durante o processo de geração.

Os números percentuais apresentados em cima podem parecer elevados, todavia é necessário ter em conta o fato que o grosso da energia gerada por fontes convencionais apresenta um grau de dissipação energética quase a equivalente a dois terços de toda a energia gerada até esta chegar às mãos do consumidor.

Se estes fatores são tidos em conta, poder-se-ia chegar à conclusão que a percentagem de energia gerada mundialmente proveniente de energia solar seria aproximadamente duas a três vezes menos

É lembrado que a unidade de energia escolhida é o MtoE ou “*Million Tonnes of Oil Equivalent*” sendo esta uma unidade que representa toda a energia gerada durante um determinado intervalo de tempo. Watt por sua vez é uma unidade de potência, ou seja, indicam a energia gerada durante um determinado instante, este valor por sua vez pode variar conforme o instante analisado.

Depender de um para estimar o outro é um processo pouco viável, uma vez que a energia total gerada em um determinado intervalo de tempo (Joule ou MtoE) não apresenta quaisquer indicações da potência do sistema em qualquer instante dentro desse intervalo de tempo.

O contrário também é verificado pois a capacidade máxima de geração ou “base instalada” não é representativa das flutuações do rendimento do sistema ao longo do tempo.

É necessário lembrar que o valor total não se mantém constante e encontra-se sempre em crescimento. Apesar deste crescimento do valor absoluto, a fração de energia provinda de fontes fotovoltaicas continua a aumentar apenas realça a crescente penetração de mercado por parte desta tecnologia assim como o seu crescente apelo como uma fonte de geração de energia “aparentemente”¹⁰ viável.

O gráfico apresentado anteriormente mostra uma tendência exponencial no seu crescimento, ou seja, a sua inclinação aumenta cada vez mais quanto mais recentes forem os anos.

Infelizmente, devido à baixa inclinação presente nos primeiros anos do gráfico a tendência global deste é diminuída, tal como é representado na sua linha de tendência. A inclinação do novo gráfico pode ser visualizada através do expoente.

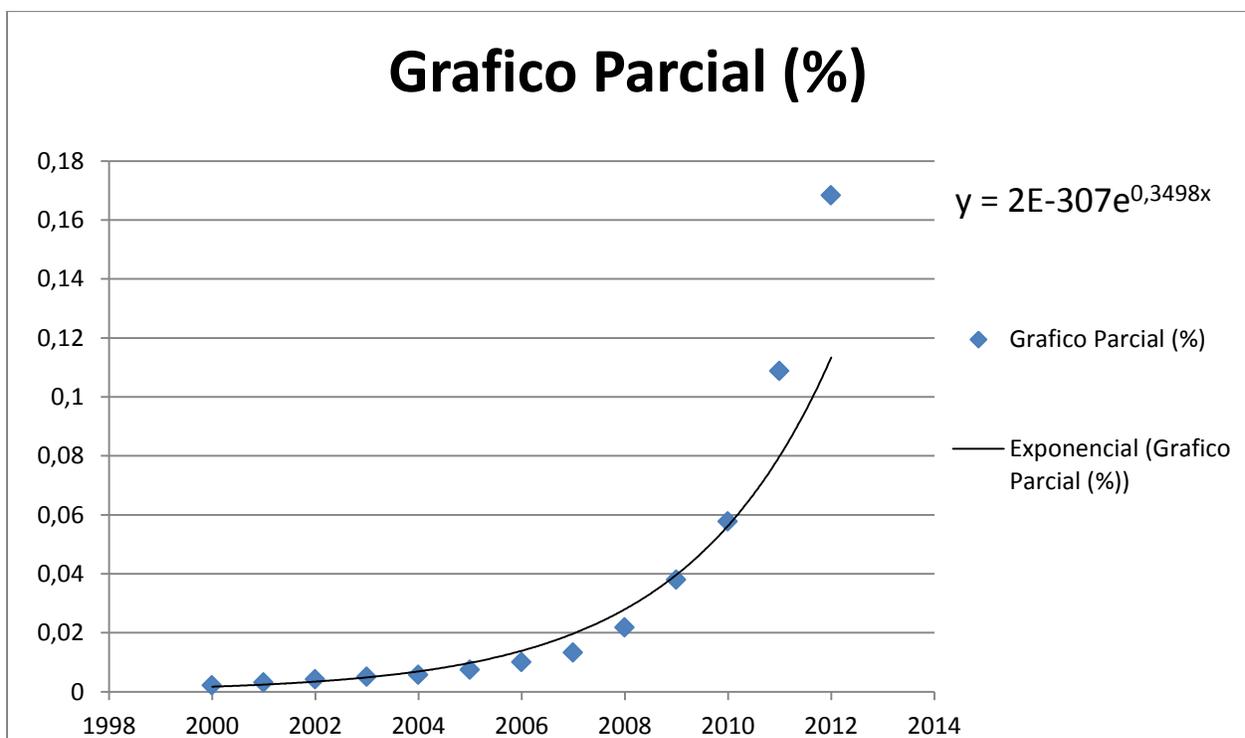


Ilustração 6.3 - Ilustração de um gráfico parcial da percentagem de energia proveniente de fontes fotovoltaicas.

De modo a solucionar a baixa inclinação presente na linha de tendência apenas uma porção do gráfico anterior é considerada, mais especificamente o intervalo entre 2000 até 2012. Ao escolher um intervalo de tempo mais específico torna-se possível criar uma linha de tendência com uma inclinação mais acentuada uma vez que mais de uma década de crescimento estagnado foi removido do gráfico.

¹⁰ Ler capítulo 9.

6.2 Produção Anual em Toneladas de Silício

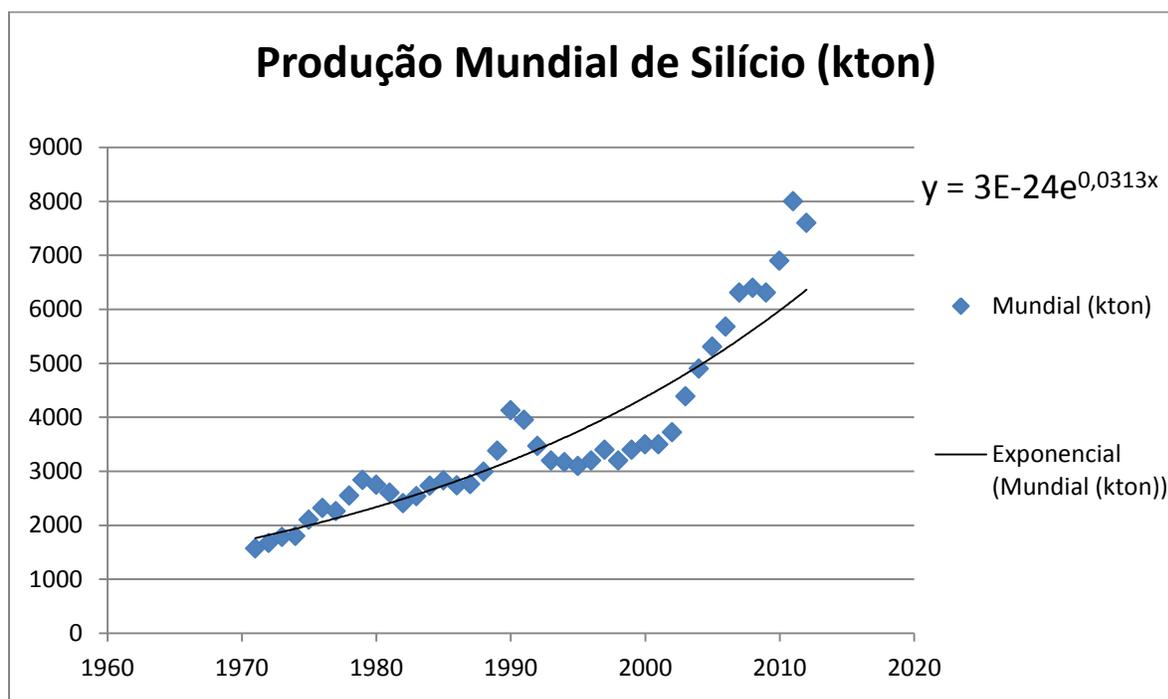


Ilustração 6.4 - Ilustração da produção Mundial de Silício em kton (32) (33) (34).

A produção mundial de Silício tem crescido década após década, todavia este não foi um processo constante. Certas regiões do mundo como por exemplo os E.U.A. registaram decréscimos de produção durante a década de 1980. Este e outros exemplos dispersos pelo mundo contribuíram para a criação de algumas cavas no gráfico.

A principal razão para estas irregularidades reside na procura e oferta de Silício como matéria-prima para várias aplicações. Após um período de relativa abundância o preço de aquisição de Silício desce, ao descer certos produtores decidem que o retorno de investimento não compensa o risco inerente presente neste mercado.

Outros fatores também devem ser incluídos, como por exemplo a legislação de condições arbitrariamente impostas, afetando o sistema de preços em maneiras que não ocorreriam como resultados naturais do mercado.

Estas condições impostas, como por exemplo substanciais reduções de custo através de subsídios a produtores/consumidores ou a imposição de tarifas a certas importações para o mercado americano, criaram um ambiente dependente destas condições, a sua eventual ausência resultaria em um ajuste do sistema de preços do mercado de Silício, quer este ajuste seja feito na procura ou na oferta.

A sua eventual ausência exigiria que os produtores tivessem que finalmente adaptar-se às verdadeiras condições presentes no mercado, ou seja, a dinâmica entre oferta e procura alterar-se-ia.

De modo a melhor determinar quais os países que mais contribuíram para o crescimento da indústria fotovoltaica pode-se recorrer a uma subtração da produção desses países da produção mundial. Neste caso, subtrair-se-á a produção proveniente da China à produção mundial.

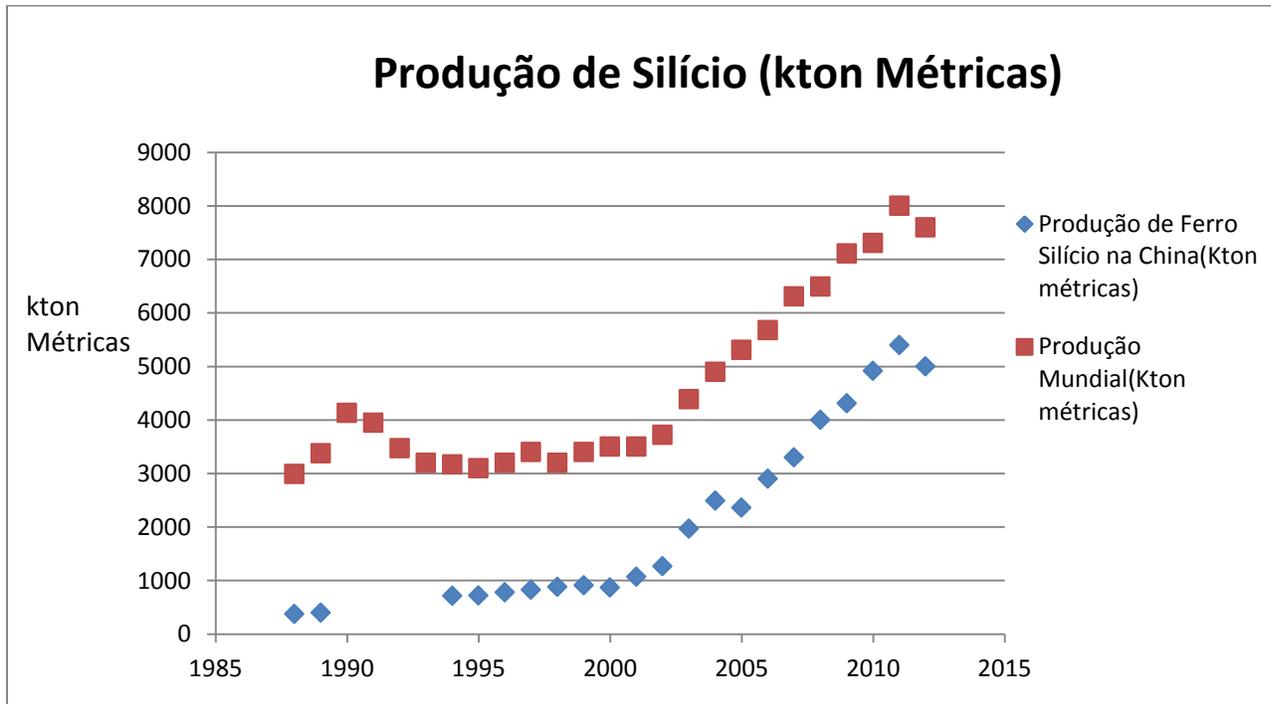


Ilustração 6.5 - Ilustração da produção mundial e chinesa de silício (34).

Observam-se as mesmas tendências em ambas as linhas, ou seja, o volume produzido mundialmente é na realidade em grande parte uma reflexão da produção chinesa.

Quando a produção mundial sobe normalmente é devido a um aumento da produção chinesa, por sua vez quando a produção chinesa desce, observa-se um decréscimo quase idêntico por parte da produção mundial.

Capítulo 7

7 Consumo por Aplicação

7.1 Sílica

A vasta maioria do Silício usado na indústria é aplicado sob a forma de Sílica, ou seja, o elemento Si não se encontra no estado livre na natureza, quando este é extraído.

A vasta maioria das aplicações de Sílica residem no seu uso como um material estrutural quer sob a forma de silicatos ou sob a forma de Sílica (areia).

Sílica também é uma substancia importante para a criação de tijolos cerâmicos assim como em alguns tipos de cimentos, todavia a sua aplicação mais importante reside no seu uso para a criação de betão.

Possui também um importante papel em olaria, através do uso de silicatos de alumínio encontrados naturalmente.

Compostos à base de Silício também são usados como partes de elementos abrasivos para aplicações industriais de tecnologia de ponta.

Ao combinar cadeias de Silício com oxigénio alternadamente e com átomos de hidrogénio ligados aos restantes eletrões livres do Silício, torna-se possível criar uma variedade de polímeros conhecidos por silicones.

Estes compostos possuem a capacidade de agirem como intermediários entre vidro e compostos orgânicos, assim como a formação de polímeros que possuem inúmeras propriedades úteis como por exemplo impermeabilidade, elasticidade e resistência a certos ataques químicos (ácido sulfúrico) (35).

7.2 Silício

A maior parte de todo o Silício livre no mundo é consumido pela indústria metalúrgica para a criação de ligas de aço. Ferrosilício, o termo pelo qual é conhecido na indústria metalúrgica, é aplicado na criação de ligas de aço de modo a melhorar a sua durabilidade e resistência, sendo aplicado em finas secções de modo a prevenir a formação de cementite (36) (37).

A presença do elemento Silício em ferro fundido ajuda a absorver o oxigénio que entra em contacto com a liga fundida. Devido à sua utilidade para tal fundamental propósito faz sentido que a maior parte de Silício em estado livre no mundo seja consumido por esta aplicação, aproximadamente 80%.

Ligas de aço por sua vez, do qual se inclui os aços inoxidáveis, aços carbónicos etc., referem-se a todas as ligas com acabamentos específicos de modo a que estejam preparadas para ambientes muito corrosivos, ou que requerem um elevado nível de higiene, exigências estéticas, etc. Silício é adicionado a estas ligas de modo a melhorar a sua resistência à fadiga (33).

O restante Silício, aproximadamente 20%, pode ser processado em dois produtos intermédios, “Silício” e “Silício metálico”. Estes termos são flexíveis e podem ser trocados livremente. Em termos práticos são produtos quase idênticos no que toca à sua composição, sendo que a única diferença reside na pureza de Silício presente no produto final processado.

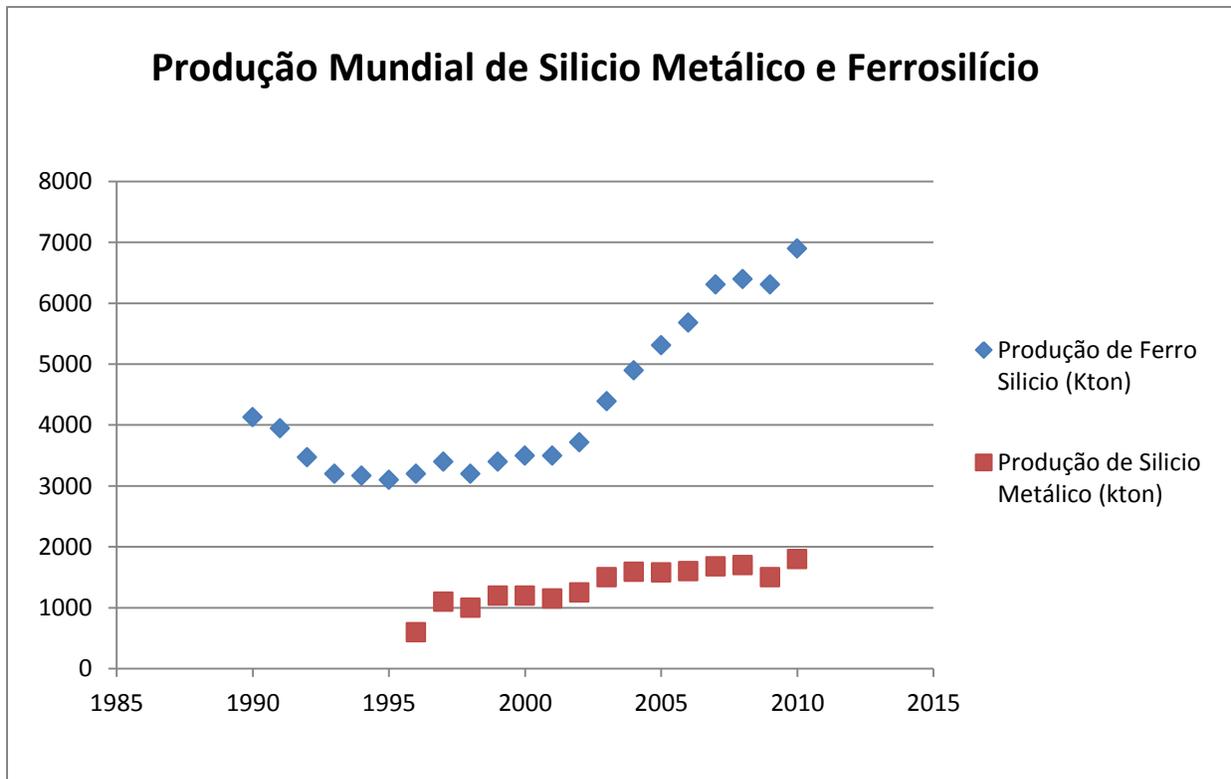


Ilustração 7.1 - Ilustração da produção mundial de silício metálico e ferrosilício (32).

O gráfico anterior comprova a proporção descrita anteriormente entre Ferrosilício e Silício Metálico, no qual Ferrosilício encontra-se presente em uma proporção de quase 4 para 1 ao longo da última década.

Silício metálico é aplicado para a produção de ligas de alumínio, possui uma pureza na ordem dos 95-99% ou seja, possui uma pureza elevada o suficiente de modo a ser considerado adequado para processos metalúrgicos que envolvem a aplicação de alumínio.

A sua verdadeira utilidade nesta indústria reside no facto que para ligas de alumínio com concentrações de silício na ordem dos 12% torna-se possível criar uma liga eutética que solidifica e arrefece com uma baixa contração térmica (36).

De todo o Silício metálico em estado “livre”, cerca de 45% do consumo mundial deste é direcionado para a produção de ligas alumínio com Silício na indústria automóvel, mais especificamente para a produção de alumínio por fundição.

Para a indústria química o Silício é utilizado como o ponto de partida para a produção de silanos, silicones, etc. O silício metálico consumido neste mercado tem que se encontrar preparado para as aplicações que lhe são exigidas, possuindo um nível de pureza obrigatoriamente superior a 98.9%.

Silanos são usados para a produção de resinas, lubrificantes, agentes anti espuma e compostos para hidrofóbicos. Silicones por sua vez são usados como lubrificantes, fluídos hidráulicos, isoladores elétricos e para tratamentos à prova de humidade.

Na indústria química, a maior parte do Silício preparado para fins metalúrgicos é usado para a criação de sílica fumada.

No total esta indústria consome cerca de 35% de todo o silício metálico em estado “livre” no mundo. Sendo naturalmente “impura”, esta forma de silício elementar corresponde a cerca de 80% do consumo mundial de silício “livre” se juntarmos a indústria metalúrgica e química.

Cerca de 15% de todo o silício em estado livre produzido mundialmente é consumido pela indústria dos semicondutores. Este mercado pode consumir uma porção relativamente pequena de todo o silício em estado livre produzido a nível mundial todavia a sua importância económica é em termos proporcionais, a mais elevada de todas.

Uma das razões para que esta parcela seja de tamanho reduzido encontra-se relacionada com o facto que o nível de pureza exigido ao silício para aplicações metalúrgicas livre é extremamente elevado, apresentando graus de pureza superiores a 99,99%, todavia para certas aplicações específicas, na indústria de semicondutores por exemplo, exige-se um grau de pureza ainda mais elevado, na ordem dos 99,9999%.

Dos 15% mencionados anteriormente, apenas 3% é aplicada em semicondutores para microeletrónica enquanto que atualmente cerca de 12% é aplicada na criação de células fotovoltaicas compostas por Silício cristalino.

Silício puro pode ser considerado como um semicondutor intrínseco, ou seja, conduz eletrões de valência assim como quaisquer eletrões que possam ser libertados através da aplicação de temperaturas operacionais elevadas. Como tal permitem um gradual aumento da condutividade elétrica se a temperatura aumentar gradualmente.

Todavia, Silício puro possui uma baixa condutividade à temperatura ambiente, ou seja apresenta uma resistência demasiado elevada para que seja usada como um elemento condutor em eletrónica.

De modo a que possa conduzir este tem que ser dopado com pequenas quantidades de outros elementos que possuam radicais livres, aumentando a sua condutividade conforme a quantidade aplicada, assim como ajustando a sua reação à circulação de uma corrente elétrica através do controlo do número de eletrões e a carga dos transportadores presentes.

Em meados de 2000 cerca de 3% de todo o Silício em estado “livre” de elevada pureza era consumido pela indústria fotovoltaica ao passo que em meados de 2010 este valor atingiu aproximadamente 12%.

Estima-se que o setor dos semicondutores continue a representar uma parcela cada vez maior de todo o silício consumido a nível mundial.

O restante Silício em estado “livre” (Silício metálico), aproximadamente 5%, é aplicado na indústria dos materiais cerâmicos para a produção de por exemplo, Nitrito de Silício.

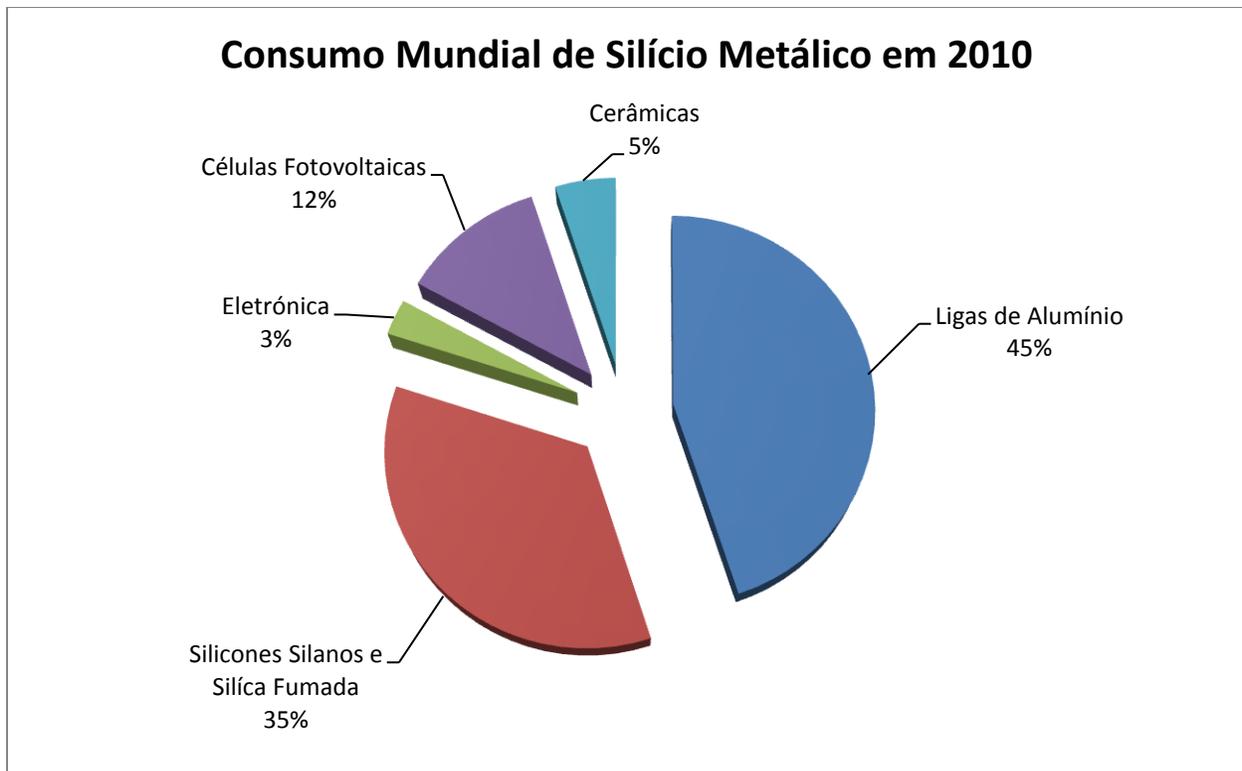


Ilustração 7.2 - Ilustração do consumo de silício metálico pelas várias aplicações presentes (38).

7.3 Relação entre a Produção Mundial de Silício e a População Mundial

O seguinte gráfico oferece um registo da relação entre a produção mundial de Silício e a população mundial existente ou seja, a “Intensidade de Uso”. Apesar do constante crescimento da população mundial regista-se um aumento ainda mais acentuado da produção de Silício.

Tal registo poderá parcialmente justificar o crescente decréscimo do preço do Silício, e derradeiramente o preço final da energia solar. Todavia, tal correlação poderá apenas ser parcial pois células fotovoltaicas não são o único produto final que usa silício como matéria-prima.

O crescimento de outras indústrias, dentro do setor dos semicondutores ou a indústria metalúrgica mais do que provavelmente terão sido o principal motor do aumento da produção de Silício.

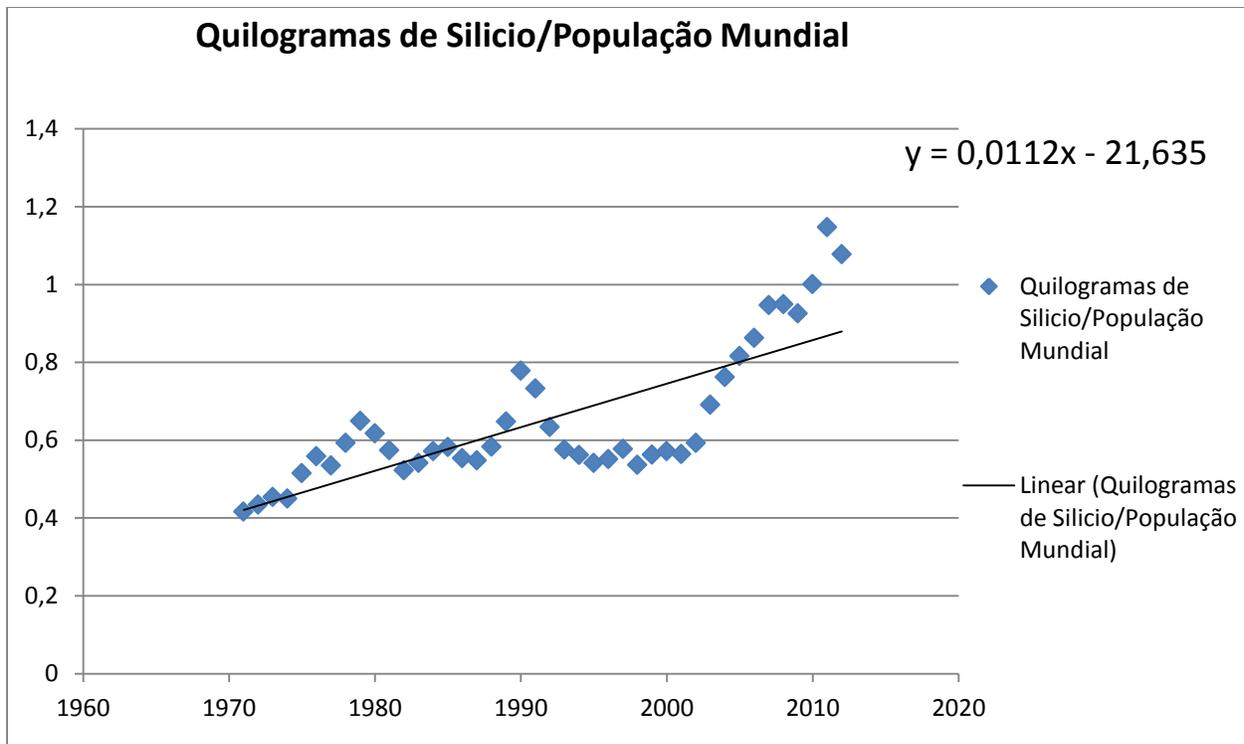


Ilustração 7.3 - Ilustração da Intensidade de Uso ou Consumo *per Capita* (32) (39).

Independentemente do mercado que impulsionou esta massificação, o preço da matéria-prima baixou o suficiente para que pelo menos a sua aquisição torna-se mais barata para a manufatura que células fotovoltaicas mono/policristalinas, assim como ligas em filme fino (tecnologia de segunda geração).

Capítulo 8

8 Caso Português

8.1 Evolução Histórica

O caso português reflete em grande parte o mesmo historial apresentados pelos restantes membros da união europeia. Observou-se um substancial crescimento em termos absolutos e percentuais da energia fornecida à rede proveniente de fontes fotovoltaicas ao longo destes últimos 20 anos.

O seguinte gráfico demonstra a evolução de toda a energia produzida a nível nacional proveniente de fontes renováveis (sem diferenciar o tipo de fonte renovável)

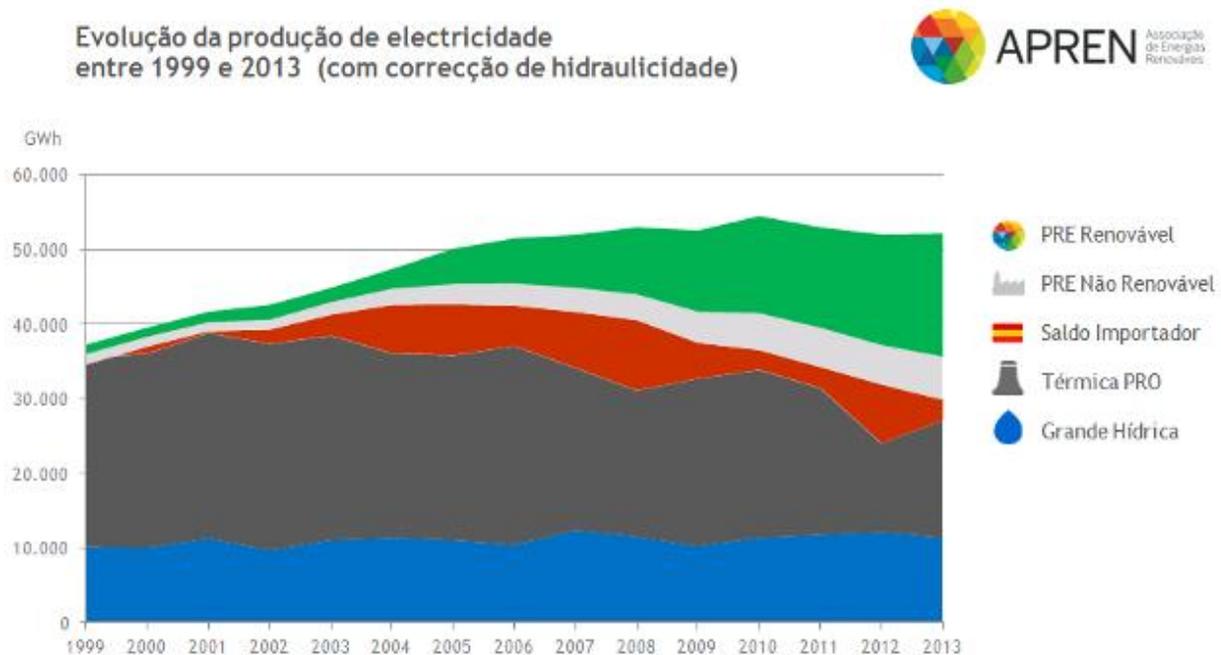


Ilustração 8.1 - Evolução da produção de electricidade entre 1999 e 2013 (40).

Observa-se um claro crescimento em termos absolutos no que toca à quantidade de energia proveniente de fontes de energia renováveis. Este “salto” é especialmente evidente a partir de 2005.

Peso das fontes de produção de electricidade em Portugal em 2013 (com correcção de hidraulicidade)

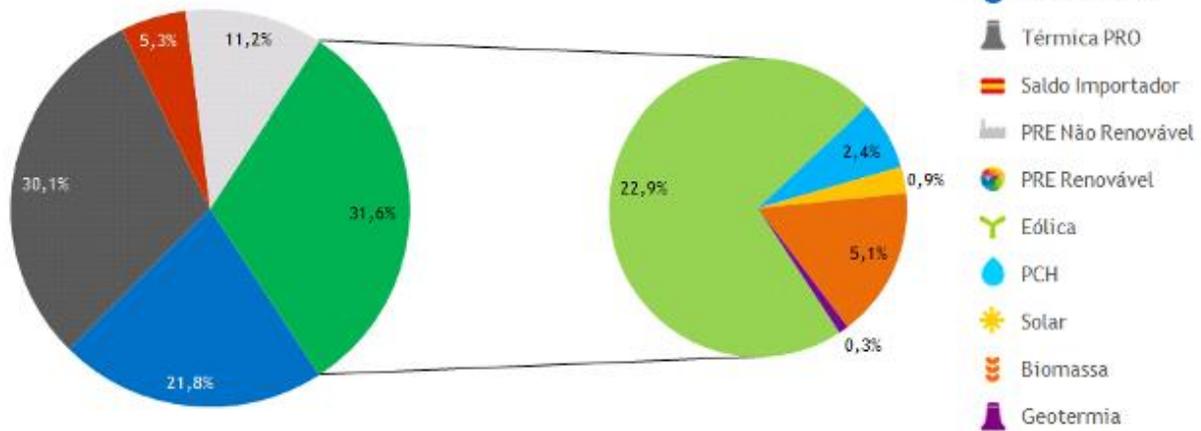


Ilustração 8.2 - Peso das fontes de produção de eletricidade em Portugal em 2013 (40)

Peso das fontes de produção de electricidade em Portugal Continental
Valores acumulados até Fevereiro de 2014

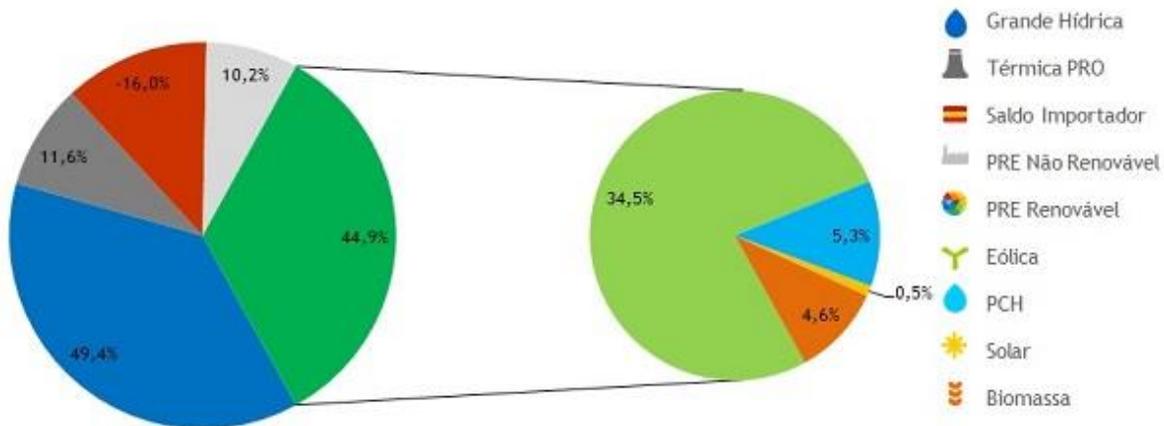


Ilustração 8.3- Peso das fontes de produção de eletricidade em Portugal. (40)

Todavia, dados provenientes de anos mais recentes indicam um abrandamento substancial, e até em algumas situações um decréscimo percentual, da energia fornecida à rede proveniente de fontes fotovoltaicas.

Os gráficos providenciados em cima demonstram esta tendência decrescente em termos percentuais desde o ano de 2013 até ao ano de 2014. Em 2013 regista-se um valor na ordem dos 0.9% no que toca à energia fotovoltaica para mais tarde em 2014 descer para cerca de 0.5%.

A razão para tal decréscimo percentual também é apresentada nos gráficos anteriores. Observou-se um aumento muito abrupto da energia proveniente de fontes eólicas e hídricas em larga escala respetivamente de 22.9% em 2013 para 34.5% em 2014 e de 21.8% em 2013 para 49.4% para 2014.

Os dois seguintes gráficos representam este crescimento mais claramente, em valores absolutos:

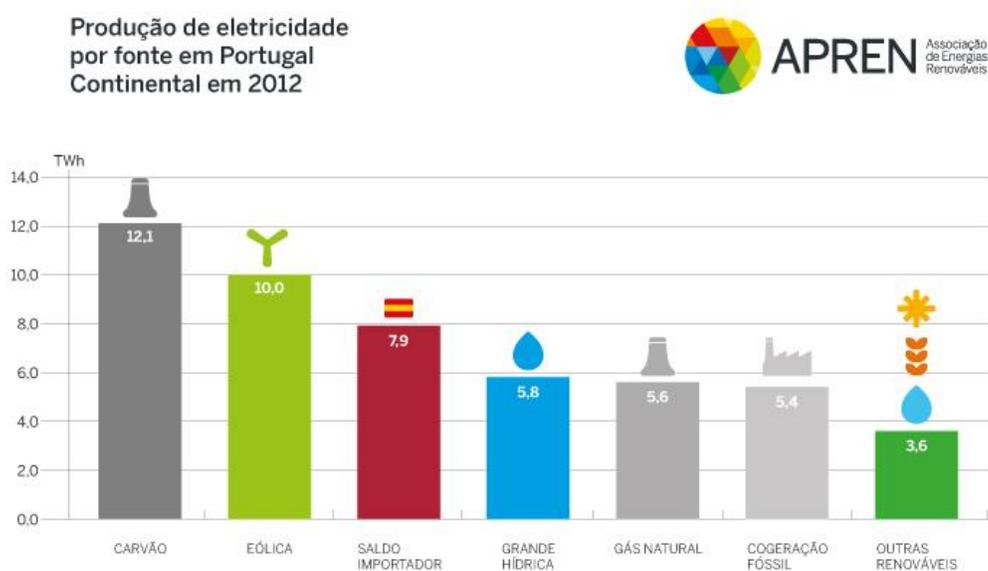


Ilustração 8.4 - Produção de eletricidade por fonte em Portugal Continental em 2012 (40).

Produção de electricidade por fonte em Portugal Continental em 2013

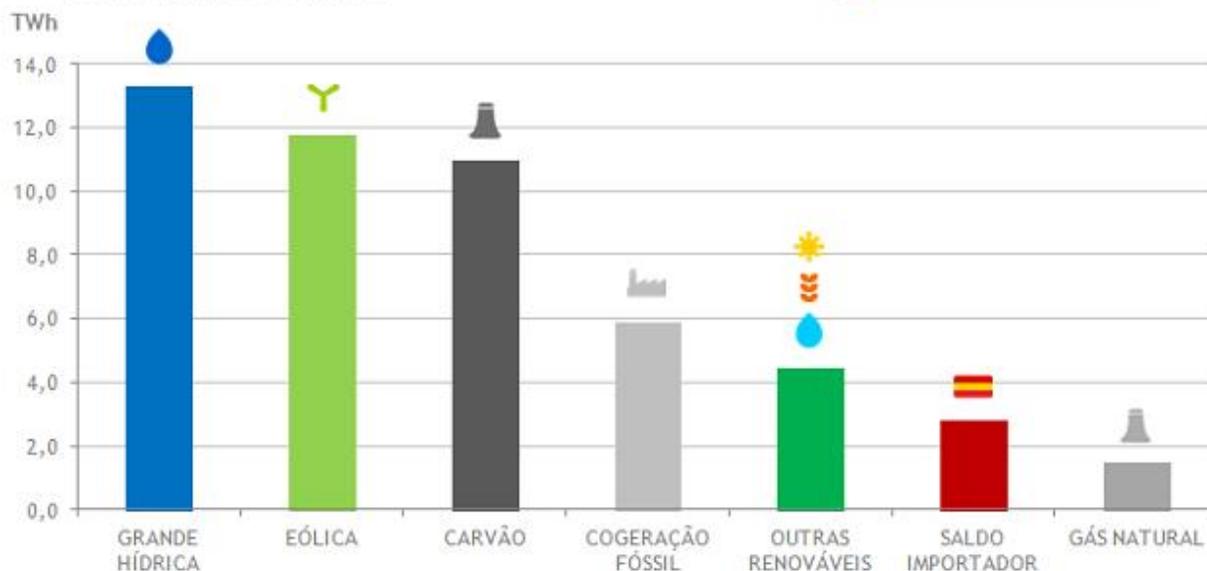


Ilustração 8.5 - Produção de eletricidade por fonte em Portugal Continental em 2013 (40).

De seguida será representada a capacidade instalada em MW em Portugal continental proveniente de fontes fotovoltaicas:

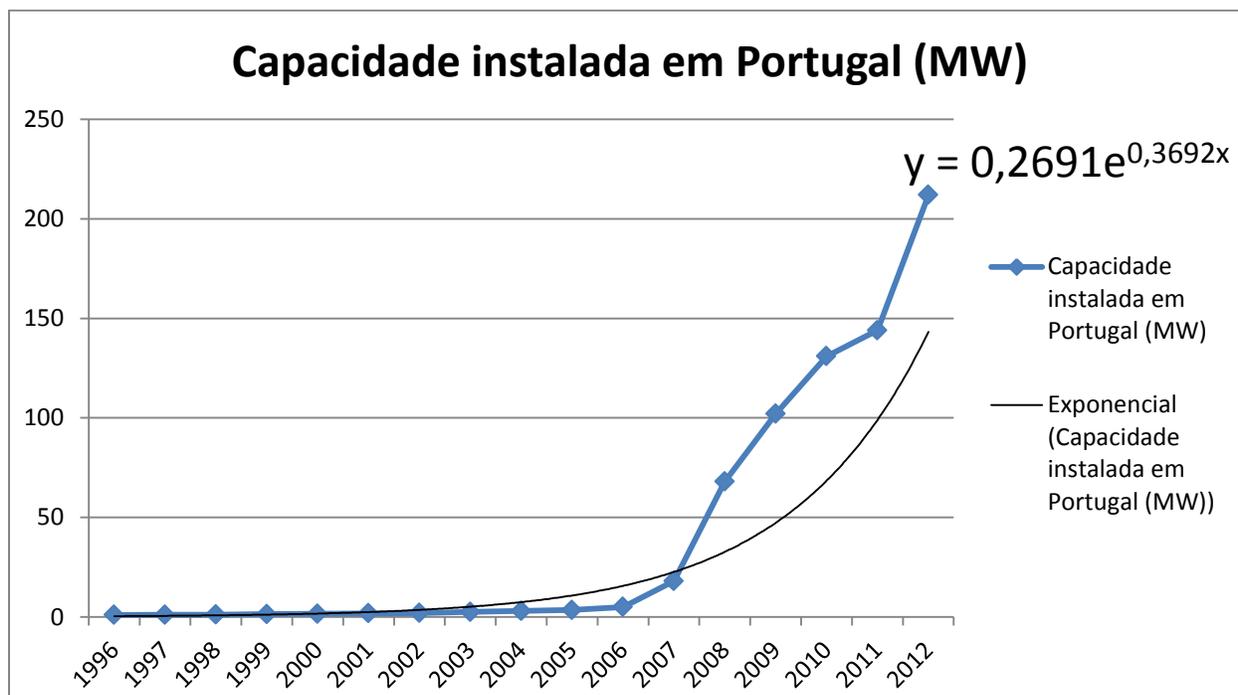


Ilustração 8.6 - Capacidade instalada em Portugal (MW)

O gráfico em cima apresenta um aumento repentino do ritmo de crescimento a partir do ano de 2006, coincidente também com o início da instalação de algumas das maiores centrais fotovoltaicas no país.

Outra parcial razão para este crescimento reside na simplificação do processo de licenciamento para particulares, tornando a microgeração um processo mais acessível. Com estas mudanças qualquer consumidor poderá passar a ser um microprodutor e vender o excesso à rede Elétrica Nacional.

8.2 Exemplos de instalações em Portugal

A Central Fotovoltaica Hércules encontra-se localizada no conselho de Serpa, mais especificamente na freguesia de Brinches. Ocupa uma área de aproximadamente 64 hectares, sendo composta por 52000 painéis de silício monocristalino e apresenta uma capacidade de 21GWh tendo a sua construção sido iniciada em maio de 2006 e a sua inauguração sido a 28 de março de 2007. A empresa proprietária deste parque é a “*General Electric Energy Financial Services*”.

A Central Fotovoltaica de Amareleja encontra-se instalada no conselho de Moura, próxima da vila de Amareleja. Possui cerca de 2520 seguidores solares, cada um com 104 painéis. Durante a sua activação em 2008 foi a maior do mundo, com uma capacidade instalada de 46.41MW. Durante um ano inteiro pode chegar a produzir cerca de 93000MWh. Encontra-se previsto um aumento em cerca de 20MW.

Outros parques fotovoltaicos de relevo acima de 1MW são o parque Solar de Almodôvar com uma capacidade de 2,15MW, pertencente à empresa alemã WPD, a Central solar de Ferreira do Alentejo com 12MW pertencente ao grupo português Generg e a Central Solar de Ferreira também de 12MW da Sociedade Ventos da Serra.

Abaixo da escala do MW existem as cinco instalações nacionais da Netplan que no total perfazem cerca de 1.8MW e as Centrais Fotovoltaicas de Olva e da Corte Pão e Água, cada uma delas respetivamente com 500kW e 756kW e pertencentes à empresa Cavalum. Esta última também já tem instalada no distrito de Bragança a Central de Lamelas com uma potência de 100KW.

Em Lisboa pretende-se criar a maior central fotovoltaica urbana do mundo na Região de Lisboa com uma potência prevista de 6MW.

8.3 Produção e venda de Energia

Graças a uma simplificação do processo de licenciamento para microgeração em 2007, por parte do estado português, qualquer consumidor de energia elétrica pode tornar-se um produtor e vender o excesso à Rede Elétrica Nacional.

O regime remuneratório imposto encontra-se dividido em regime geral e regime bonificado.

A microprodução de eletricidade em regime geral é permitida dentro de um limite superior de 5,75 Kw para a capacidade instalada.

O regime bonificado por sua vez aplica-se a capacidades instaladas inferiores a 3,68kW mas apenas se o produtor possuir na sua propriedade uma área mínima de produção de 2 metros quadrados em painéis solares.

A renumeração máxima para o excesso de produção cobre até aos 2,4MWh/ano, oferecendo cerca de 650 euros/MWh. No total, um produtor individual poderá obter aproximadamente 1560 euros/ano.

Apesar do limite mencionado anteriormente, as tarifas de €/Kwh apresentam quatro variantes, 0,5573 €/Kwh, 0,5866 €/Kwh, 0,6175 €/Kwh e 0,6500 €/Kwh. O tarifário varia conforme a área das instalações, sendo que o tarifário mais elevado, 0,6500 €/Kwh, se aplica a instalações com uma área equivalente a 30m².

Ao longo dos últimos anos em Portugal tem-se registado um decréscimo anual do regime bonificado antes da atribuição da potência, assim como após a atribuição da potência. Diretamente relacionados com esta tendência decrescente está a quantidade de utilizadores, com números cada vez menores de ano para ano.

Antes da atribuição de potência, regista-se um decréscimo anual em todos os parâmetros, sendo estes a potencia e utilizadores efetuados, anulados, pagos, aceites sob reserva e aceites diretamente na rede.

Após a atribuição de potência regista-se também um decréscimo anual em praticamente todos os parâmetros, sendo estes a potencia e utilizadores atribuídos, cancelados, envolvidos em pedidos de inspeção, certificados e ligados à rede.

8.4 Tempo de Amortização

A capacidade instalada pode variar na gama de vários kilowatt, mais especificamente entre 1 e 3.5 kilowatt. Os custos de aquisição e instalação podem se encontrar desde um mínimo de 2000 euros para instalações com o mínimo possível (iluminação básica e limitada), até aproximadamente 20000 euros ou mais para instalações mais abrangentes assim como possíveis custos operacionais (manutenção).

A maior parte dos sistemas fotovoltaicos possuem uma garantia de aproximadamente 10 a 15 anos e em alguns casos 25 anos quando manufacturados por uma empresa associada a produtos de elevada qualidade.

Normalmente um painel solar possui uma longevidade que se encontra entre os 40 a 50 anos (41), caso contrario não seria rentável adquirir um, especialmente se for tido em conta o facto que cerca de um quinto a um quarto do tempo útil do painel corresponde ao período de amortização.

Os custos associados à aquisição de equipamento representam aproximadamente 45% (42) do total, entre os quais têm-se os painéis solares, o inversor de potência, a estrutura de suporte e os vários circuitos elétricos necessários.

Os custos relacionados com a instalação do equipamento representam cerca de 25% (42), dentro destes custos encontra-se incluída a instalação sistema assim como os vários obstáculos e licenças legais.

Os custos associados a custos operacionais rondam cerca de 30% (42) do custo total. Dentro desta categoria têm-se o equipamento de monitorização e os custos associados a quaisquer reparos e inspeções.

Com os atuais incentivos estatais as instalações de maior escala são mais acessíveis, apesar da natureza deste subsídios não ser permanente e inevitavelmente causar distúrbios no sistema de preços do mercado.

Se for assumido que os custos de aquisição não ultrapassam os limites definidos nos parágrafos anteriores e os custos operacionais forem igualmente reduzidos, pode ser possível em média ter um retorno de investimento em sete ou oito anos.

Todavia, mesmo após este período de amortização, o ritmo de lucro que um microprodutor pode obter não será constante. Encontra-se definido pela lei (e não pelo sistema de preços do mercado) que sempre que estiverem instalados no país 10 megawatts adicionais as tarifas descerão 5%. Este ajuste é sempre realizado em um intervalo de cinco em cinco anos (43).

Este ajuste por lei cria um inconveniente. Com um constante decréscimo das tarifas aplicadas tal investimento apenas se apresenta como rentável para quem já tenha investido e/ou talvez no futuro muito próximo.

Tal legislação (44) é claramente feita de modo a limitar o potencial lucro, ou até limitar potenciais perdas em certos cenários, que atuais microproduções possam ter no presente, como também foi concebida de modo a limitar o crescimento deste mercado no futuro próximo, de modo a que a microprodução não tenha uma fatia substancial no mercado energético nacional.

Ou seja, tais medidas terão como efeito colateral um cenário em que apenas as instalações de larga escala, acima das várias dezenas de quilowatt, assim como na escala do megawatt, representarão o futuro crescimento registado no sector na energia fotovoltaica no país.

9 Panorama Mundial

Ao longo dos últimos 20 anos o mercado respeitante à energia fotovoltaica tem crescido continuamente, todavia existe uma certa inconsistência entre a capacidade de produção e a procura. A razão para tal será abordada neste capítulo.

Durante muitos anos, analistas previam que a energia solar conseguiria atingir um custo de kWh por euro/dólar comparável ao de fontes de energia convencionais todavia, esta comparação não tem em conta todos os custos finais e apenas considera os custos operacionais. Se os custos totais forem tidos em conta (inclui os custos de aquisição) o preço médio de dólares por watt rondará aproximadamente nos 8.73\$/W (45).

De modo a tornar o seu preço atrativo é necessário diminuir este valor para os 2 \$/W na totalidade, ou seja, os custos de aquisição do material precisam de atingir 1\$/W (50% dos custos totais) e os restantes custos associados na ordem dos 1\$/W.

A experiência histórica indica que os preços de módulos fotovoltaicos diminuem aproximadamente 20% por cada duplicação da potência já instalada. Infelizmente isto indica que a atual capacidade instalada teria que aumentar aproximadamente 98 vezes de modo a atingir os 1\$/W para os custos materiais (50% do custo total).

De modo a perceber a origem deste problema é necessário ter em conta que historicamente, painéis solares sempre foram aquisições extremamente dispendiosas, muitas das vezes atingindo cerca de 50% dos custos totais para a instalação de um sistema fotovoltaico residencial. Em décadas passadas este valor poderia atingir frações do custo total ainda maiores.

De modo a reduzir estes custos materiais exorbitantes, vários governos em vários países ao longo das décadas têm providenciado subsídios e/ou específicos benefícios fiscais de modo a incentivar a compra de instalações fotovoltaicas.

Apesar destes incentivos terem tido algum impacto, infelizmente a sua presença no mercado fotovoltaico criou extensas disrupções.

O adicional volume de compras de instalações fotovoltaicas que resultou da presença de subsídios deu lugar a uma maior penetração de mercado para esta tecnologia em geral todavia até com este crescimento os resultados encontram-se aquém das expectativas.

Muitas razões foram apresentadas até agora, desde a falta de conhecimento acerca da tecnologia até à falta de “sensibilidade ambiental”, todavia a principal razão reside no elevado custo frontal que muitos potenciais consumidores têm que pagar muitos anos antes de ainda poderem efetivamente amortizar as suas despesas, desincentivando a aquisição desta tecnologia.

Devido ao fato que toda a penetração de mercado registada até agora se deve a aplicação de subsídios assim como certos benefícios fiscais, constata-se que o atual mercado se encontra inteiramente dependente deles e a sua eventual ausência criaria uma implosão no que toca à procura, ou seja, a oferta atual não se encontraria em sintonia com a procura, encontrar-se-ia em excesso.

A razão porque os subsídios interferem no mercado é devido ao fato que o sistema de preços do mercado é composto pela informação que o percorre, ou seja, se a produção de painéis fotovoltaicos encontra-se subsidiada, o seu custo torna-se mais acessível para vários potenciais consumidores que na ausência dos subsídios não se encontrariam recetivos. Ao mesmo tempo, este novo grupo de consumidores enviam que indicam de que existe procura para quaisquer potenciais empresas que pretendam instalar-se neste setor.

Com um novo grupo de consumidores criados que possuem o que se pode denominar como uma “liquidez artificial”, várias empresas surgem neste mercado de modo a tirar partido da nova procura, ou seja, as empresas responderam à informação que define o sistema de preços do mercado.

Com consumidores em parte dependentes destes subsídios, tal significa que o mercado encontra-se dependente destes para sobreviver, ou seja, assistimos a uma “bolha”. Sem os subsídios muitas empresas encontrar-se-iam sem números suficientes de consumidores e teriam que fazer reestruturações substanciais (46) (47).

Talvez pior ainda seja o facto que muitas das iniciativas privadas neste sector tenham o apoio direto dos estados de cada país. Através deste apoio, quaisquer prejuízos obtidos são transferidos para o contribuinte, naquilo que talvez seja um dos maiores atos de “roubo legal” em existência.

A atual situação viola uma das leis mais importantes da economia de mercado, o conceito de “ganhos privados e prejuízos privados”. Em vez disso têm-se “ganhos privados e prejuízos públicos”. Graças a esta realidade existe uma transferência do risco financeiro, incentivando que várias empresas assumam riscos desnecessários que sob diferentes condições não seriam aceitáveis (48).

Resumindo, o sector terá que passar por uma reestruturação no qual não só alguns fornecedores entrarão em falência como também haverá uma descida temporária dos preços devido a uma abundancia de oferta em comparação com a procura.

Conclusões

Observa-se uma cada vez maior capacidade mundial de produção de energia de origem fotovoltaica, acompanhada por uma também maior capacidade de produção de silício metálico. Este último fator encontra-se entre as razões mais importantes para um constante decréscimo dos custos materiais para a manufatura de uma célula solar. Este fenómeno, denominado por produção em massa, pode ser observado em muitos setores do mercado que pretendem ser acessíveis para o público em geral.

Entre os candidatos mais promissores para futuras tecnologias viáveis para o aproveitamento da energia solar encontramos as células solares orgânicas, também denominadas por células solares de substratos flexíveis. A sua estrutura simples, flexível e de conceção rápida devido ao fato de poderem ser manufaturadas recorrendo a métodos existentes hoje em dia na indústria têxtil, pode torná-las potencialmente tão baratas como outros produtos impressos atuais.

O caso português regista uma história semelhante à de muitos outros países, no qual a penetração do mercado energético registado pelo setor fotovoltaico ocorreu em grande medida devido à presença de legislação que favorece o seu crescimento, de modo a compensar pelas inúmeras desvantagens que esta tecnologia ofereceria na ausência de tais legislações.

A natureza arbitrária de muita desta legislação tornará cada vez mais difícil um crescimento deste setor tendo como origem os pequenos produtores. Como resultado, a maior parte do crescimento que vier a ocorrer será devido a grandes investimentos na ordem das várias centenas de kW ou até na ordem dos MW. Mais importante de tudo, apesar do fato que a energia fotovoltaica apresenta distintas vantagens financeiras para potências instaladas muito elevadas, mesmo assim parte do incentivo que favorece a criação destas instalações provém da legislação e uma eventual ausência desta também poderá afetar a criação destas instalações de larga escala.

Quaisquer progressos no futuro próximo no que toca à penetração de mercado por parte da energia fotovoltaica microgerada serão em grande parte diminutos, pois este mercado encontra-se fortemente dependente de benefícios fiscais, assim como de subsídios, de modo a que consiga crescer, ou até existir de todo com a dimensão que possui atualmente.

A nível mundial o cenário é muito semelhante e em alguns casos ainda pior. Vastas quantidades de fundos provenientes dos contribuintes de vários países tem sido desperdiçados em investimentos demasiados arriscados, e que apresentam baixas margens de lucro, sendo necessário a injeção destes fundos de modo a ultrapassar as inerentes desvantagens em termos de custos frontais, que o setor sofre em comparação com fontes de energia convencionais.

Apesar de todos os progressos tecnológicos registados, especialmente na escala de várias instalações à volta do mundo, assim como nacionais, ainda não se atingiu o ponto em que a energia solar pode ser massificada facilmente. Apenas quando a manufatura em massa de inúmeras células solares baratas ocorrer é que este objetivo poderá tornar-se uma realidade.

Todas as fontes de energia convencionais presentes possuem um preço extremamente baixo em \$/W e muitas delas na ordem dos centavos para cada kWh gerado. A razão para um preço tão baixo reside na sua abundância e fácil acesso.

As células fotovoltaicas atuais apresentam um preço de aquisição demasiado elevado, o que juntamente com os restantes custos, obriga o cliente desta tecnologia a passar por um elevado tempo de amortização, o que desincentiva a sua aquisição.

O preço de inicial de aquisição tem de atingir valores muito mais baixos de modo a que a energia fotovoltaica se apresente como uma tecnologia capaz de atingir uma maior penetração no mercado energético.

Enfim, o cenário mundial da energia de origem fotovoltaica ainda não a coloca como uma fonte de energia alternativa capaz de competir sem subsídios e incentivos fiscais com outras formas de energia convencionais, ou mesmo com outras formas alternativas de produção energética. Existem, entretanto, alguns desenvolvimentos científicos e tecnológicos recentes, principalmente fundamentados nas nanotecnologias, que poderão conduzir a que a energia fotovoltaica venha a ser de facto uma fonte de energia primária capaz de substituir as atuais formas convencionais de produção energética.

Bibliografia

1. How to understand an exciton. *Stackexchange*. [Online]
<http://physics.stackexchange.com/questions/89461/how-to-understand-exciton>.
2. PV Module Anatomy. *Hordnes.info*. [Online] <http://hordnes.info/2012/08/solceller-halvledere-og-problemstillinger/>.
3. **Alchiemie Limited Inc.** Solar Facts and Advice. [Online] 2010-2013. <http://www.solar-facts-and-advice.com/>.
4. What is Solar. *Solarpowerplanetearth*. [Online]
<http://www.solarpowerplanetearth.com/photovoltaics.html>.
5. **Aldous, Scott, Yewdall, Zeke and Ley, Sam.** A Peek Inside a PV Cell. *Home Power*. [Online] 08 02, 2012. <http://www.homepower.com/articles/solar-electricity/equipment-products/peek-inside-pv-cell>.
6. **Lenardic, Denis.** Solar Cells. *PVRESOURCES*. [Online] 07 3, 2013.
<http://www.pvresources.com/introduction/solarcells.aspx>.
7. Solar Love. *Solar Cells: Solar Cell Model & What Affects Solar Cell Performance & Efficiency*. [Online]
<http://solarlove.org/solar-cell-model-and-its-characteristics/>.
8. P-N Junction. *HyperPhysics*. [Online] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/pnjun.html>.
9. **Azzouzi, Ghania and Tazibt, Wahiba.** Improving silicon solar cell efficiency by using the impurity photovoltaic effect. *Energy Procedia*. 2013, Vols. Energy Procedia 41 (2013) 40 – 49, Impurity photovoltaic effect; silicon solar cells; Scaps simulator; light trapping.
10. **Pavel, Akeed A., Khan, M. Rezwan and Islam, N. E.** On the possibility of improving silicon solar cell efficiency through impurity photovoltaic effect and compensation. *Solid-State Electronics*. 2010, Vols. Solid-State Electronics 54 (2010) 1278–1283, Impurity photovoltaic effect, Compensation, Lifetime, Solar cell.
11. *National Research Energy Laboratory*. [Online] 2014.
http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg.
12. Tandem Solar Cells. *Superstrate.net*. [Online] <http://www.superstrate.net/pv/limit/tandem.html>.
13. Solar Radiation Data necessary to go Solar. *Solar City*. [Online] <http://www.solar-city.net/2013/08/solar-radiation-data-necessary-to-go.html>.
14. Multijunction Cells. *Wikipedia*. [Online]
http://en.wikipedia.org/wiki/Multijunction_photovoltaic_cell#mediaviewer/File:StructureMJspectre.png.

15. **University, Arizona State.** Controlled atomic-layer crystal growth is ‘breakthrough’ for solar-cell efficiency. *Kurzweil*. [Online] 10 30, 2013. http://www.kurzweilai.net/controlled-atomic-layer-crystal-growth-is-breakthrough-for-solar-cell-efficiency?utm_source=KurzweilAI+Daily+Newsletter&utm_campaign=5301772cb8-UA-946742-1&utm_medium=email&utm_term=0_6de721fb33-5301772cb8-281887109.
16. **Aernouts, Tom, et al.** Printable anodes for flexible organic solar cell modules. *Thin Solid Films*. Elsevier, 2004, Vols. *Thin Solid Films* 451 –452 (2004) 22–25, Organic solar cell; Conjugated polymer; Fullerene; Screen-printing; Ag-grid; Module.
17. **Huang, Yu-Ching, et al.** High-performance ITO-free spray-processed polymer solar cells with incorporating ink-jet printed grid. *Organic Electronics*. 2013, Vols. *Organic Electronics* 14 (2013) 2809–2817, ITO-free, Polymer solar cell, Ink-jet print, Spray process, Large area, Metal grid.
18. **Gan, Qiaoqiang.** ‘Paint-on’ solar panels. *Kurzweil*. [Online] 5 13, 2013. http://www.kurzweilai.net/paint-on-solar-panels?utm_source=KurzweilAI+Daily+Newsletter&utm_campaign=b1870acb63-UA-946742-1&utm_medium=email&utm_term=0_6de721fb33-b1870acb63-281887109.
19. **Song, Xiaohui, et al.** Fabrication of micro/nano-composite porous TiO₂ electrodes for quantum dot-sensitized solar cells. *Journal of Power Sources*. 2013, Vols. *Journal of Power Sources* 253 (2014) 17-26, Titanium dioxide, Polystyrene sphere, Quantum dots-sensitized solar cell, Micro/nano-composite structure, Light scattering.
20. Possible breakthrough using graphene for solar cells. *Kurzweil*. [Online] 2013. http://www.kurzweilai.net/possible-breakthrough-using-graphene-for-solar-cells?utm_source=KurzweilAI+Daily+Newsletter&utm_campaign=32a6819d3b-UA-946742-1&utm_medium=email&utm_term=0_6de721fb33-32a6819d3b-281887109.
21. **Niels Bohr Institute.** Nanowire solar cells raise efficiency limit. *Kurzweil*. [Online] 3 26, 2013. http://www.kurzweilai.net/nanowire-solar-cells-raise-efficiency-limit?utm_source=KurzweilAI+Daily+Newsletter&utm_campaign=7faea0e82c-UA-946742-1&utm_medium=email.
22. New solar-cell design combines quantum dots with nanowires. *Kurzweil*. [Online] 2013. http://www.kurzweilai.net/new-solar-cell-design-combines-quantum-dots-with-nanowires?utm_source=KurzweilAI+Daily+Newsletter&utm_campaign=7faea0e82c-UA-946742-1&utm_medium=email.
23. Ordered carbon-nanotube design may increase conductivity of solar cells by 100 million times. *Kurzweil*. [Online] 2014. http://www.kurzweilai.net/ordered-carbon-nanotube-design-may-increase-conductivity-of-solar-cells-by-100-million-times?utm_source=KurzweilAI+Daily+Newsletter&utm_campaign=84111bdf01-UA-946742-1&utm_medium=email&utm_term=0_6de721fb33-84111bdf01-281887109.

24. What's Pushing Solar Energy Efficiency. *Greenecon*. [Online] 10 2007.
http://greenecon.net/what%E2%80%99s-pushing-solar-energy-efficiency/energy_economics.html.
25. **Carr, Goeffrey**. Sunny Uplands. *The Economist*. [Online] 2013.
<http://www.economist.com/news/21566414-alternative-energy-will-no-longer-be-alternative-sunny-uplands>.
26. **Four Peaks Technologies**. Solar Electricity Costs. *Solar Cell Central*. [Online]
http://solarcellcentral.com/cost_page.html.
27. **BP**. *Statistical Review of World Energy 2013 Workbook*. 2014.
28. **Nelder, Chris**. Can US Solar PV Costs Keep Falling? *GreenTechMedia*. [Online]
<http://www.greentechmedia.com/articles/read/can-u.s.-solar-pv-costs-keep-falling>.
29. Electricity - Prouction (billion kWh). *IndeMundi*. [Online]
<http://www.indexmundi.com/g/g.aspx?v=79&c=xx&l=en>.
30. eia. *Independent Statistics & Analysis*. [Online] U.S. Energy Information Administration.
http://www.eia.gov/about/eia_explained.cfm.
31. **Martin, Richard**. Annual Worldwide Solar PV Installations Will Double by 2020. *Navigant Research*. [Online] 11 8, 2013. <http://www.navigantresearch.com/newsroom/annual-worldwide-solar-pv-installations-will-double-by-2020>.
32. SILICON STATISTICS U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *USGS*. [Online] 2013.
<http://minerals.usgs.gov/ds/2005/140/silicon.pdf>.
33. Minerals Database. *Minerals Education Coalition*. [Online] 2013.
<http://www.mineralseducationcoalition.org/minerals>.
34. **Interior, U.S: Departement of the**. Mineral Commodity Summaries. *USGS*. [Online] 2013.
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>.
35. **Mineral Information Institute**. Silicon. *The Encyclopedia of Earth*. [Online] 1 17, 2008.
<http://www.eoearth.org/view/article/156025/>.
36. **Takiguchi, Hiroaki and Morita, Kazuki**. Global Flow Analysis of Crystalline Silicon. *intechopen*. [Online] 2009. www.intechopen.com.
37. **Barrientos, Miguel and Soria, Claudia**. Ferroalloys: World Production, By Country, Furnace Type, And Alloy Type. *index mundi*. [Online]
http://www.indexmundi.com/en/commodities/minerals/ferroalloys/ferroalloys_t7.html.
38. Silicon Market Overview. *Minor Metals Trade Association*. [Online] 2011.
<http://www.mmta.co.uk/silicon-market-overview>.

39. **UN, Dept. of Economic and Social Affairs, Population Division (2013). World Population Prospects: The 2012 Revision.** Population of the entire world, yearly, 1950 - 2100. *geohive*. [Online] 2013. http://www.geohive.com/earth/his_history3.aspx.
40. APREN. *APREN Dados Técnicos*. [Online] <http://www.apren.pt/>.
41. The Cost of Solar. *SOLAR Energy*. [Online] <http://solarenergy-usa.com/solar-info/solar-costs/>.
42. Cost of Solar Power. *SUNRUN*. [Online] <http://www.sunrun.com/solar-lease/cost-of-solar/>.
43. Realiza Calculo. [Online] <http://realizacalculo.com/solucoes-energeticas-climatizacao/>.
44. ADENE. *ADENE, Agência para a energia*. [Online] <http://www.adene.pt/>.
45. **Branker, K., Pathak, M.J.M. and Pearce, J.M.** A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011, Vols. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 4470–4482, Photovoltaic, Levelized cost, LCOE, Grid parity, Solar economics.
46. **Davidson, Carolyn and Steinberg, Daniel.** Evaluating the impact of third-party price reporting and other drivers on residential photovoltaic price estimates. *Energy Policy*. 2013, Vols. Energy Policy 62 (2013) 752–761, Residential photovoltaic, Third-party ownership, Market tracking.
47. **Lüthi, Sonja and Wüstenhagen, Rolf.** The price of policy risk — Empirical insights from choice experiments with European photovoltaic project developers. *Energy Economics*. 2012, Vols. Energy Economics 34 (2012) 1001–1011, Adaptive conjoint analysis, Choice experiment, Feed-in tariff, Photovoltaic, Policy design.
48. **Lakatos, Christine.** The Green Corruption Files. *GreenCorruption*. [Online] <http://greencorruption.blogspot.pt/2014/01/cleantech-crash-cbs-lesley-stahl.html#.U6BMmrF7RMJ>.
49. Worldwide electricity production from renewable energy sources. [Online] Observer, EDF, Fondation Énergies Pour le Monde, 2013. <http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/Eng/sommaire.asp#top>.
50. **Dong, Changgui and Wiser, Ryan.** The impact of city-level permitting processes on residential photovoltaic installation prices and development times: An empirical analysis of solar systems in California cities. *Energy Policy*. 2013, Vols. Energy Policy 63 (2013) 531–542, Photovoltaic, Permitting, Installed prices.
51. **Farrell, John.** The Coming Solar Electricity Transformation. *Clean Technica*. [Online] 2011. <http://cleantechnica.com/2013/06/10/the-coming-solar-electricity-transformation/>.
52. **Mitchell, K. W., et al.** Tandem solar cells. *Progress in Photovoltaics*. 2004, Vols. Progress in Photovoltaics, 12 (2004), p33-38, 21st IEEE PVSC 1990 p. 1481-6 .

53. **Climent-Font, Aurelio and Perlado, Manuel.** Sustainable energy for everyone; a challenge for the future. Foreword to the Workshop Proceedings. *Energy Procedia*. 2013, Vols. Energy Procedia 41 (2013) 1 – 3, Renewable energy sources.
54. **Grau, Thilo, Huo, Molin and Neuhoff, Karsten.** Survey of photovoltaic industry and policy in Germany and China. *Energy Policy*. 2012, Vols. Energy Policy 51 (2012) 20–37, Photovoltaic, Technology policy, Innovation.
55. **Albrecht, Steve, et al.** Solution Processed Organic Tandem Solar Cells. *Energy Procedia*. Elsevier, 2011, Vols. Energy Procedia 31 (2012) 159 – 166, Organic tandem solar cells; processed from solution; PCDTBT; PCPDTBT.
56. **Pukhrem, Shivananda.** Solar Cells: Solar Cell Model & What Affects Solar Cell Performance & Efficiency. *Solar Love*. [Online] 07 2013. <http://solarlove.org/solar-cell-model-and-its-characteristics/>.
57. **Lange, Alexander, et al.** Solar cells with inkjet printed polymer layers. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2012, Vols. Energy Procedia 31 (2012) 150 – 158, Organic solar cells; inkjet printing; P3HT; PEDOT:PSS; grid; solvent system.
58. **Lund, H., et al.** Solar Cells. [Online] 2008. <http://org.ntnu.no/solarcells/pages/generations.php>.
59. Solar Cell Voltage - Current Characterization. *California Scientific*. [Online] <http://www.californiascientific.com/resource/Solar%20Cell.pdf>.
60. **Krogstrup, Peter, et al.** Single nanowire solar cells beyond the Shockley-Queisser limit. Center for Quantum Devices, Nano-Science Center, Niels Bohr Institute, University of Copenhagen, Denmark : s.n., 2011.
61. Silicon and Ferrosilicon: Global Industry Markets and Outlook, 13th edition 2011. *Roskill*. [Online] 2011. <http://www.roskill.com/reports/steel-alloys/silicon>.
62. **Portugal, Dechan, et al.** Scalability and stability of very thin, roll-to-roll processed, large area, indium-tin-oxide free polymer solar cell modules. *Organic Electronics*. 2013, Vols. Organic Electronics 14 (2013) 984–994, ITO free, Roll-to-roll printing and coating, Flexible, Barrier, ICT, Thin foil.
63. Renováveis na Hora - Informações. [Online] Ministério da Economia e do Emprego. <http://www.renovaveisnagora.pt/web/srm/informacoes>.
64. **Parkinson, Giles, Vorrath, Sophie and Gilding, Paul.** Reneweconomy. [Online] 2 4, 2013. <http://reneweconomy.com.au/2013/the-top-solar-countries-past-present-and-future-96405>.
65. **Yang, Chi-Jen.** Reconsideringsolargridparity. *Energy Policy*. 2010, Vols. Energy Policy 38 (2010) 3270–3273, Solar energy, Grid parity, Distributed energy.
66. **Singh, Parm Pal and Singh, Sukhmeet.** Realistic generation cost of solar photovoltaic electricity. *Renewable Energy*. 2010, Vols. Renewable Energy 35 (2010) 563–569, Solar photovoltaic economics,

Solar electricity price, Graduated payment loan, Levelized cost, Variable cost, SPV electricity generation cost.

67. **Albero, Josep, Clifford, John N. and Palomares, Emilio.** Quantum dot based molecular solar cells. *Coordination Chemistry Reviews*. 2013, Vols. Coordination Chemistry Reviews 263– 264 (2014) 53– 64, Quantum dot solar cells, Quantum dots, Charge recombination, SILAR, Organic Solar Cells.
68. **Ribeiro, Fernando, et al.** Public opinion on renewable energy technologies in Portugal. *Energy*. 2013, Vol. Energy xxx (2013) 1e12, Public opinion, Survey, Social acceptance, Renewable energy technology, NIMBY, Portugal.
69. **de La Tour, Arnaud, Glachant, Matthieu and Ménière, Yann.** Predicting the costs of photovoltaic solar modules in 2020 using experience curve models. *Energy*. 2013, Vols. Energy 62 (2013) 341-348, Learning curve, Solar photovoltaic energy, Cost prediction.
70. **Carvalho, Duarte, et al.** Photovoltaic energy mini-generation: Future perspectives for Portugal. *Energy Policy*. 2011, Vols. Energy Policy 39 (2011) 5465–5473, Mini-generation, PV Energy, Feasibility study.
71. **Coelho, Bruno, et al.** Optimization of an atmospheric air volumetric central receiver system: Impact of solar multiple, storage capacity and control strategy. *Renewable Energy*. 2014, Vols. Renewable Energy 63 (2014) 392-401, Concentrating solar power (CSP), Central receiver systems (CRS), Atmospheric air volumetric receiver, Optimization.
72. **Barbero, David R., et al.** Nano-Engineering of SWNT Networks for Enhanced Charge Transport at Ultralow Nanotube Loading. *Advanced Materials*. 2014, Vol. Volume 26, Advanced Energy Materials.
73. **Stefan, Ailincă and Devezas, Tessaleno Campos.** *Materials for Solar Cells*. Universidade da Beira Interior : s.n., 2013.
74. **Galagan, Yulia, et al.** ITO-free flexible organic solar cells with printed current collecting grids. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2011, Vols. Solar Energy Materials & Solar Cells 95 (2011) 1339–1343, Organic solar cells, Organic photovoltaics, ITO-free, Current collecting grid, Printed anode, High conductive PEDOT:PSS.
75. **Barrientos, Miguel and Soria, Claudia.** index mundo. [Online] 2013. <http://www.indexmundi.com/g/g.aspx?v=79&c=xx&l=en>.
76. **Shahriar, Md., Khan, Parvez and Farzana, Esmat.** Impurity Photovoltaic Effect in Multijunction Solar Cells. *Procedia Technology*. 2013, Vols. Procedia Technology 7 (2013) 166 – 172, Multijunction Solar Cell; Impurity Photovoltaic Effect; Double Junction; Efficiency;Carrier Lifetime.
77. **Yang, Xiaoguang, et al.** Improved efficiency of InAs/GaAs quantum dots solar cells by Si-doping. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2013, Vols. Solar Energy Materials & Solar Cells 113 (2013) 144– 147, Solar cells, Intermediate-band, Quantum dots, Si-doping.

78. **Krajacic, Goran, Duic, Neven and Carvalho, Maria da Graça.** How to achieve a 100% RES electricity supply for Portugal? *Applied Energy*. 2011, Vols. *Applied Energy* 88 (2011) 508–517, Renewable energy, H2RES, Sustainable energy planning, Energy storage, 100% Renewable systems, Portugal.
79. **Knier, Gil.** How do Photovoltaics Work. *National Aeronautics and Space Administration*. [Online] 2002. <http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells/>.
80. **Montcada, Núria F., et al.** High open circuit voltage in efficient thiophene-based small. *Organic Electronics*. 2013, Vols. *Organic Electronics* 14 (2013) 2826–2832, Small molecule solar cells, Solution processing solar cells, High open circuit voltage.
81. **Bommali, Ravi Kumar, et al.** Growth and tailoring of physical properties of Si quantum dots in a-SiNx:H matrix. *Energy Procedia*. 2013, Vols. *Energy Procedia* 41 (2013) 50 – 56, Silicon rich silicon nitride, PECVD, Swift Heavy Ion Irradiation, Photoluminescence.
82. **Bhandari, Ramchandra and Stadler, Ingo.** Grid parity analysis of solar photovoltaic systems in Germany. *Solar Energy*. Elsevier, Junho 25, 2009, Vols. *Solar Energy* 83 (2009) 1634–1644, Solar photovoltaic; Benefit cost analysis; Breakeven analysis; Grid parity, p. 11.
83. **Voigt, Monika M., et al.** Gravure printing for three subsequent solar cell layers of inverted structures on flexible substrates. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2011, Vols. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 95 (2011) 731–734, Organic solar cells, Printing, Gravure, P3HT:PCBM, Wetting behaviour, Inverted structures.
84. **Kopola, Palvi, et al.** Gravure printed flexible organic photovoltaic modules. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2011, Vols. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 95 (2011) 1344 – 1347, Organic photovoltaics Polymer solar cell Gravure printing Solution processing Module fabrication.
85. **Díaz, Paula and Masó, Joan.** Evolution of production and the efficient location of. *Energy Procedia*. 2013, Vols. *Energy Procedia* 40 (2013) 15 – 24, New renewables; renewables policies; EROI; energy efficiency; Geographic Information Systems.
86. **Kühn, Michael, et al.** Energy, Resources & the Environment - Some future challenges -. *Energy Procedia*. 2013, Vols. *Energy Procedia* 40 (2013) 1 – 5, EGU; European Geosciences Union; Energy; CCS; CO2 storage; meteorology; geothermics; exploration; hydrocarbons;.
87. **Amorim, Filipa, et al.** Electricity decarbonisation pathways for 2050 in Portugal: A TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) based approach in closed versus open systems modelling. *Energy*. 2014, Vols. *Energy xxx* (2014) 1-9, Iberian electricity market (MIBEL), The integrated MARKAL-EFOM system, Hourly dynamics, Renewable electricity, Roadmap 2050, (TIMES).
88. **Spertino, Filippo, Di Leo, Paolo and Cocina, Valeria.** Economic analysis of investment in the roof top photovoltaic systems: A long-term research in the two main markets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013, Vols. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28 (2013) 531–540, Photovoltaic systems, Performance ratio, Final yield, Investment, Net present value, Internal rate of return.

89. **Ju, Minkyu, et al.** Double screen printed metallization of crystalline silicon solar cells as low as 30 mm metal line width for mass production. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2012, Vols. Solar Energy Materials & Solar Cells 100 (2012) 204–208, Solar cell, Fine line screen printing, Double printing, Mass production, High efficiency.
90. DGEG - Direcção Geral de Energia e Geologia . [Online] Governo de Portugal. <http://www.dgeg.pt/>.
91. **Rehman, Shafiqur, Bader, Maher A. and Al-Moallem, Said A.** Cost of solar energy generated using PV panels. *Renewable and Sustainable Energy*. 2006, Vol. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Solar radiation; Photovoltaic; Electricity; Solar energy; Renewable energy; Capacity; Sunshine.
92. **Dittrich, Thomas, Belaidi, Abdelhak and Ennaoui, Ahmed.** Concepts of inorganic solid-state nanostructured solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2011, Vols. Solar EnergyMaterials&SolarCells95(2011)1527–1536, Inorganic nanostructured solar cells, Nanostructured metaloxide, Extremely thinabsorber, Ultra-thin nano-composite absorber, Quantum dots.
93. *Chasing Grid Parity: Understanding the Dynamic Value of Renewable Energy*. **Olson, Arne and Jones, Ryan.** s.l. : The Electricity Journal, 2012, Vols. April 2012, Vol. 25, Issue 3.
94. **Lund, P. D.** Boosting new renewable technologies towards grid parity e Economic. *Renewable Energy*. 2011, Vol. ScienceDirect, Renewable electricity Cost parity Climate change mitigation Financial support Breakthrough.
95. **Green, Martin.** Approaches to PV Cell Efficiency. <http://greenecon.net/>. [Online] http://greenecon.net/wp-content/uploads/2007/10/pv_eff.jpg.
96. **Zheng, Cheng and Kammen, Daniel M.** An innovation-focused road map for a sustainable global photovoltaic industry. *Energy Policy*. 2014, Vols. Energy Policy 67 (2014) 159–169, Photovoltaic innovation, Research and development, Learning curve.
97. **Liu, Yao, et al.** All polymerphotovoltaics:Fromsmallinverteddevicestolargeroll-to-roll coated and printed solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2013, Vols. Solar Energy Materials & Solar Cells 112 (2013) 157–162, Roll-to-roll process, Inverted geometry, All-polymer solarcells.
98. **Benson, Christopher L. and Magee, Christopher L.** A Framework for Analyzing the Underlying Inventions that Drive Technical Improvements in a Specific Technological Field. *Engineering Management Research*. 2012, Vols. Engineering Management Research Vol. 1, No. 1; May 2012.