

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

**Concepção e certificação de nova geração de
candeeiros de iluminação pública**

Emmanuel Loureiro Garrido

VERSÃO PROVISÓRIA

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major de Energia

Orientador: Prof. Dr. José Machado da Silva
Co-orientador: Prof. Dr. José Neves dos Santos

Junho de 2010

© Emmanuel Garrido, 2010

Resumo

Os candeeiros de iluminação pública podem integrar, actualmente, tecnologias bastante diferentes das utilizadas até há poucos anos.

O desenvolvimento de tecnologias como a fotovoltaica, para a produção de energia eléctrica, e da tecnologia de díodos emissores de luz, para uso como fonte luminosa, permitiu a sua integração na concepção de candeeiros de iluminação pública. Tais factos vieram também trazer novos desafios aos projectistas de candeeiros de iluminação pública, principalmente ao nível do dimensionamento eléctrico e da certificação dos produtos.

Neste trabalho pretende-se fazer uma abordagem às características gerais dos sistemas que podem integrar a nova geração de candeeiros de iluminação pública e, também, focar os aspectos importantes para o seu dimensionamento eléctrico, fornecendo princípios de cálculo adequados, fazendo referência, sempre que possível, às normas aplicáveis.

Os princípios de cálculo apresentados são ainda aplicados a dois casos concretos tendo em vista a demonstração da sua aplicação prática e a verificação das soluções implementadas nesses dois casos.

Palavras-chave: Candeeiros de Iluminação Pública, Energia Fotovoltaica, Díodos Emissores de Luz, Dimensionamento Eléctrico, Lâmpadas de Descarga, Baterias, Luminotecnia, Certificação de Produtos.

Abstract

The lighting columns may integrate current technologies, quite different from those used until a few years.

The development of technologies such as photovoltaic, to produce electricity, and light-emitting diodes for use as a light source, led to its integration in the design of lighting columns. These facts have also brought new challenges for designers of lighting columns, especially at the level of electrical design and certification of products.

This work is intended to make an approach to the general characteristics of systems that can integrate the next generation of lighting columns and also focus on the important aspects of its electrical design, providing adequate calculation principles, referring, when possible, the applicable standards.

The calculation principles presented are also applied to two cases in order to demonstrate its practical application and verification of the solutions implemented in these two cases.

Keywords: Lighting Columns, Fotovoltaic Energy, Light-Emmiting Diodes, Electrical Design, Discharge Lamps, Batteries, Luminotechnics, Product Certification.

Agradecimentos

Aos meus pais, a quem dedico este trabalho, pela paciência, pelo suporte económico, pela ajuda, pelo ânimo, enfim... por tudo o que já fizeram por mim e pelo que ainda hão-de fazer ao longo da minha vida.

À minha namorada, que me acompanhou ao longo de todo o meu percurso académico, pela compreensão, pela ajuda, pela paciência e pelo apoio nos momentos mais difíceis.

A todos os meus amigos, eles sabem quem são e o que significam para mim.

À equipa da Larus que desde o primeiro dia me fez sentir em casa, em especial, ao engenheiro Pedro Martins Pereira, que tornou possível a realização deste trabalho, pela confiança que depositou em mim, pelo apoio, pela disponibilização de meios e por me ter inserido nos projectos e eventos da empresa contribuindo para o enriquecimento das minhas competências.

Ao professor Machado da Silva e ao professor Neves dos Santos por aceitarem orientar este trabalho, pelas sugestões e correcções e, também, pelo apoio.

Aos professores Rui Ferreira e Machado e Moura pela disponibilização dos laboratórios.

E a todos aqueles que directa ou indirectamente contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos: MUITO OBRIGADO!

Emmanuel Garrido

Índice

| | |
|--|----------|
| Resumo | iii |
| Abstract..... | v |
| Agradecimentos | vii |
| Índice..... | ix |
| Lista de figuras | xi |
| Lista de tabelas | xiii |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 - Objectivos | 2 |
| 1.2 - Organização do trabalho | 2 |
| 2 Revisão de conceitos e tecnologias | 5 |
| 2.1 - Radiação solar | 5 |
| 2.1.1 - Propriedades da luz..... | 5 |
| 2.1.2 - Radiação solar | 6 |
| 2.2 - Tecnologia fotovoltaica | 10 |
| 2.2.1 - Produção de energia fotovoltaica | 10 |
| 2.2.2 - Tecnologias de conversão..... | 12 |
| 2.2.3 - Grandezas características das células fotovoltaicas | 13 |
| 2.2.4 - Efeitos da temperatura no funcionamento das células fotovoltaicas..... | 14 |
| 2.2.5 - Efeitos do valor de irradiância no funcionamento das células fotovoltaicas | 15 |
| 2.2.6 - Conceitos de célula, módulo e gerador fotovoltaico. | 16 |
| 2.3 - Baterias de acumuladores | 17 |
| 2.3.1 - Tipos de baterias secundárias..... | 18 |
| 2.3.2 - Parâmetros característicos de baterias secundárias | 20 |
| 2.3.3 - Métodos de carga de baterias..... | 21 |
| 2.4 - Reguladores de carga..... | 23 |
| 2.4.1 - Reguladores série | 23 |
| 2.4.2 - Reguladores paralelo | 23 |
| 2.4.3 - Reguladores MPPT..... | 24 |
| 2.5 - Noções luminotécnicas e luminárias de iluminação pública..... | 26 |
| 2.5.1 - Grandezas e conceitos luminotécnicos | 26 |
| 2.5.2 - A visão humana | 28 |
| 2.5.3 - Índices de avaliação do desempenho de fontes luminosas e luminárias..... | 29 |

| | |
|---|-----------|
| 2.5.4 - Principais tipos de lâmpadas usadas em iluminação pública | 30 |
| 2.5.5 - Luminárias de iluminação pública | 33 |
| 2.6 - Díodos emissores de luz | 35 |
| 2.6.1 - Efeito de electroluminescência | 35 |
| 2.6.2 - Tecnologias de produção de LEDs | 36 |
| 2.6.3 - LEDs para aplicações de iluminação pública | 37 |
| 2.6.4 - Motivação para o uso de LEDs em luminárias de iluminação pública | 38 |
| 2.6.5 - Circuitos de alimentação de LEDs | 41 |
| 3 Dimensionamento de Candeeiros de Iluminação Pública | 43 |
| 3.1 - Considerações gerais | 43 |
| 3.2 - Dimensionamento luminotécnico | 45 |
| 3.2.1 Dimensionamento luminotécnico de luminárias baseadas em LEDs | 45 |
| 3.2.1 Dimensionamento luminotécnico de luminárias baseadas em lâmpadas de descarga | 47 |
| 3.3 - Dimensionamento eléctrico | 48 |
| 3.3.1 - Dimensionamento de candeeiros autónomos | 48 |
| 3.3.2 - Dimensionamento de candeeiros com ligação à rede de distribuição | 56 |
| 4 Avaliação do dimensionamento das soluções da Larus | 59 |
| 4.1 - Avaliação “Coluna Solar” | 60 |
| 4.1.1 - Apresentação das características do candeeiro “Coluna Solar” | 60 |
| 4.1.2 - Avaliação do dimensionamento luminotécnico do candeeiro “Coluna Solar” | 62 |
| 4.1.3 - Ensaios em funcionamento do candeeiro “Coluna Solar” | 65 |
| 4.1.4 - Avaliação do dimensionamento eléctrico do candeeiro “Coluna Solar” | 69 |
| 4.1.5 - Comentários sobre a avaliação do dimensionamento eléctrico do candeeiro “Coluna Solar” | 70 |
| 4.2 - Avaliação “Coluna 17º” | 71 |
| 4.2.1 - Apresentação das características do candeeiro “Coluna 17º” | 71 |
| 4.2.2 - Avaliação do dimensionamento luminotécnico do candeeiro “Coluna 17º” | 73 |
| 4.2.3 - Avaliação do dimensionamento eléctrico do candeeiro “Coluna 17º” | 73 |
| 5 Certificação de candeeiros de iluminação pública | 75 |
| 5.1 - Certificação | 75 |
| 5.2 - Marcação CE | 76 |
| 5.3 - Normas aplicáveis e ensaios a realizar às soluções Larus | 77 |
| 5.3.1 - Normas e ensaios aplicáveis ao candeeiro “Coluna Solar” | 77 |
| 5.3.2 - Normas e ensaios aplicáveis ao candeeiro “Coluna 17º” | 78 |
| 6 Conclusões e comentários finais | 81 |
| Comentários finais | 82 |
| Referências | 83 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 - Candeeiro ligado à rede [1] | 2 |
| Figura 1.2 - Candeeiro autónomo [2] | 2 |
| Figura 2.1 - Efeito fotovoltaico..... | 11 |
| Figura 2.2 - Módulo de silício monocristalino [7]..... | 12 |
| Figura 2.3 - Módulo de silício policristalino [8]..... | 12 |
| Figura 2.4 - Curvas características de uma célula fotovoltaica [adaptado de 5]..... | 13 |
| Figura 2.5 - Influência da temperatura na curva tensão-corrente de uma célula fotovoltaica [5] | 14 |
| Figura 2.6 - Influência da temperatura na curva tensão-potência de uma célula fotovoltaica [5] | 14 |
| Figura 2.7 - Influência do valor de irradiância na curva tensão-corrente de uma célula fotovoltaica [adaptado de 5] | 15 |
| Figura 2.8 - Ligação de díodos de passo [5] | 16 |
| Figura 2.9 - Ligação de díodos de bloqueio [5] | 17 |
| Figura 2.10 - LED [17] | 35 |
| Figura 2.11 - Espectro de emissão LED branco (RGB) [17]..... | 39 |
| Figura 2.12 - Espectro de emissão LED branco (camada fosfórica) [17] | 39 |
| Figura 4.1 - Pormenor “Coluna Solar” | 60 |
| Figura 4.2 - Fluxo luminoso vs temperatura do ponto de referência LEDs usados na “Coluna Solar” [20]..... | 63 |
| Figura 4.3 - Diagrama polar de distribuição de intensidade luminosa “Coluna Solar”..... | 64 |
| Figura 4.4 - Representação em cores falsas distribuição de iluminância “Coluna Solar” .. | 65 |
| Figura 4.5 - Evolução da tensão em função do tempo “Coluna Solar” | 67 |
| Figura 4.6 - Evolução da corrente em função do tempo “Coluna Solar” | 68 |
| Figura 4.7 - Evolução da potência em função do tempo “Coluna Solar”..... | 68 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.6 - Pormenor “Coluna 17” | 70 |
| Figura 5.1 - Grafismo da sigla CE (Conformidade europeia) [24] | 77 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 - Classificação quanto à temperatura de cor | 29 |
| Tabela 2.2 - Classificação quanto ao IRC | 30 |
| Tabela 2.3 - Lâmpadas de vapor de mercúrio de alta pressão..... | 31 |
| Tabela 2.4 - Lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão..... | 31 |
| Tabela 2.5 - Lâmpadas de vapor de sódio de baixa pressão..... | 32 |
| Tabela 2.6 - Lâmpadas de iodetos metálicos..... | 32 |
| Tabela 2.7 - Materiais semicondutores utilizados nos LEDs [16]..... | 36 |
| Tabela 2.8 - Características das luminárias de LEDs..... | 38 |
| Tabela 3.1 - Rendimentos típicos de componentes para sistemas fotovoltaicos isolados..... | 50 |
| Tabela 4.1 - Características do módulo fotovoltaico “Coluna Solar” | 60 |
| Tabela 4.2 - Características das baterias “Coluna Solar” | 61 |
| Tabela 4.3 - Características luminária de LEDs “Coluna Solar” | 61 |
| Tabela 4.4 - Características do controlador “Coluna Solar” | 61 |
| Tabela 4.5 - Características dos LEDs utilizados na “Coluna Solar”..... | 62 |
| Tabela 4.6 - Requisitos da classe S2 vs. resultados da simulação “Coluna Solar” | 65 |
| Tabela 4.7 - Energia consumida “Coluna Solar” | 65 |
| Tabela 4.8 - Energia produzida “Coluna Solar” | 66 |
| Tabela 4.9 - Comparação entre rendimento previsto e efectivo “Coluna Solar” | 66 |
| Tabela 4.10 - Características da lâmpada utilizada na “Coluna 17º”..... | 69 |
| Tabela 4.11 - Características do balastro electrónico utilizado na “Coluna 17º” | 70 |
| Tabela 4.12 - Características dos condutores utilizados na “Coluna 17º” | 70 |
| Tabela 5.1 - Normas e ensaios aplicáveis à “Coluna Solar” | 76 |

| | |
|--|-----------|
| Tabela 5.1 - Normas e ensaios aplicáveis à “Coluna 17º” | 77 |
|--|-----------|

1 Introdução

Na actualidade os candeeiros de iluminação pública assumem aspectos construtivos bastante diversificados tendo em vista sempre o mesmo objectivo: assegurar níveis de iluminação que garantam a segurança dos utentes dos espaços públicos.

As crescentes preocupações relacionadas com questões de eficiência energética e a consequente procura de soluções que permitam a redução do consumo de energia eléctrica, levam a prever a utilização em grande escala de uma nova geração de candeeiros de iluminação pública autónomos, assim que este tipo de sistemas atinjam um grau de maturação que permita garantir uma fiabilidade adequada às tarefas que estes devem desempenhar.

Na situação actual os candeeiros de iluminação pública autónomos estão já a ser comercializados e aplicados, tipicamente, nas situações de menor exigência, como por exemplo a iluminação de jardins e vias pedonais. A par dos candeeiros autónomos têm sido desenvolvidas soluções, que podem ser vistas como soluções de transição, utilizando como fonte luminosa sistemas baseados em LEDs (Díodos emissores de luz), alimentados pela rede eléctrica de distribuição que, embora não permitam supressão total do consumo energético, têm garantido poupanças significativas.

Os factos acima, revelam uma necessidade de estudo relativamente aos aspectos construtivos das novas soluções de iluminação pública, tendo em vista a possibilidade de aperfeiçoamento das mesmas.



Figura 1.1 - Candeeiro ligado à rede [1]



Figura 1.2- Candeeiro autónomo [2]

1.1 - Objectivos

Nesta dissertação pretendem-se abordar os aspectos relevantes das tecnologias actualmente aplicadas em candeeiros de iluminação pública, dando especial atenção às tecnologias cuja aplicação é recente, desejando que este trabalho possa desempenhar um papel pedagógico.

É também objectivo deste trabalho estudar e apresentar soluções que permitam o correcto dimensionamento eléctrico dos principais tipos de candeeiros de iluminação pública, apresentando a sua aplicação prática em dois candeeiros cujas características são completamente distintas. Pretende-se com isto, evidenciar as diferenças ao nível do dimensionamento eléctrico introduzidas pela utilização de diferentes tecnologias.

1.2 - Organização do trabalho

Este trabalho encontra-se dividido em seis capítulos.

O presente capítulo é feita uma introdução geral dos temas abordados, a definição dos objectivos gerais do trabalho e a descrição da organização do mesmo.

O segundo capítulo deste trabalho é dedicado à apresentação das tecnologias envolvidas, pretendendo-se sempre fazer alusão aos seus princípios de funcionamento e, ao estado da arte de cada uma delas. Neste capítulo é dada especial atenção às tecnologias relacionadas com sistemas fotovoltaicos e com a iluminação do estado sólido (LEDs).

No terceiro capítulo, é abordada de uma forma geral a problemática do dimensionamento de candeeiros de iluminação pública, sendo depois propostos princípios de cálculo para o dimensionamento luminotécnico e eléctrico dos mesmos.

O quarto capítulo dedica-se à avaliação de dois candeeiros com características construtivas distintas, por aplicação dos princípios de cálculo apresentados no terceiro capítulo. Pretende-se com isto evidenciar as diferenças, em termos de concepção entre os candeeiros autónomos e os candeeiros com ligação à rede eléctrica.

No quinto capítulo é dedicado à problemática da certificação de candeeiros de iluminação pública sendo feita, em primeiro lugar, uma abordagem geral sobre a certificação e, depois, uma abordagem dedicada aos candeeiros de iluminação pública autónomos e por último aos candeeiros convencionais.

O sexto capítulo comporta as conclusões retiradas e os comentários finais ao trabalho.

2 Revisão de conceitos e tecnologias

2.1 - Radiação solar

O estudo das tecnologias feito ao longo deste capítulo requer o conhecimento das propriedades da luz e da radiação solar. Nesse sentido a presente secção deste trabalho é dedicada à apresentação destes dois conceitos.

2.1.1 - Propriedades da luz

A luz corresponde a radiação electromagnética [3] visível numa determinada gama de comprimentos de onda (λ). Sendo a luz radiação electromagnética a sua velocidade de propagação é condicionada pela permitividade eléctrica e pela permeabilidade magnética do meio em que se propaga. A velocidade da luz (c) pode ser determinada pela expressão:

$$c[m/s] = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}} \quad (2.1)$$

Em que, ϵ representa a permitividade eléctrica do meio, em (F/m), e μ representa a permeabilidade magnética do meio em (H/m).

Para o vazio o valor da velocidade da luz é conhecido e aproximadamente igual a 3×10^8 (m/s).

A radiação luminosa é constituída também por fotões, a energia destes obtém-se pela seguinte expressão:

$$W_{\text{fotão}} [J] = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.2)$$

Em que h representa a constante de Planck em (J.s), e λ o comprimento de onda, expresso em (m).

2.1.2 - Radiação solar

A radiação emitida pelo Sol pode ser comparada à radiação de um corpo negro à temperatura próxima de 6000 (K) a emitir continuamente radiação. Para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos é importante o conhecimento de duas grandezas, que caracterizam a radiação solar:

- Irradiância (G) - fluxo de potência radiante incidente numa superfície por unidade de área, em (W/m²).
- Radiância (H) - quantidade de energia incidente numa superfície por unidade de área num determinado período de tempo, em (J/m²) nas unidades do Sistema Internacional, frequentemente expressa em (Wh/m²) por simplicidade.

A densidade de potência da radiação (irradiância) emitida por um corpo negro pode ser calculada pela expressão:

$$G_{em} [W/m^2] = \sigma \cdot T^4 \quad (2.3)$$

Em que σ representa a constante de Boltzmann em (W.m⁻².K⁻⁴), e T representa a temperatura do corpo negro em (K).

Da energia emitida pelo Sol, apenas uma ínfima parte chega à Terra. Uma vez que a órbita descrita pela Terra em torno do Sol é elíptica, a radiação recebida varia ligeiramente ao longo do ano.

A radiação incidente na superfície exterior da atmosfera terrestre é atenuada por fenómenos de reflexão e absorção na sua passagem pela atmosfera, pelo que apenas parte desta radiação chega à superfície da Terra [4].

A radiação solar incidente na superfície da Terra pode ser decomposta em três componentes, sendo estas:

- A radiação directa, proveniente da incidência directa de raios solares.
- A radiação difusa, recebida de todo o céu visível, excluindo o disco solar, resultante da incidência de raios solares indirectos cuja direcção foi alterada devido aos fenómenos de refacção e reflexão na atmosfera.
- A radiação de albedo, resultante da reflexão da radiação directa ou difusa pelo meio circundante, fazendo-se notar apenas em planos inclinados em relação à horizontal.

Em relação à radiação solar é ainda possível definir a radiação global e a radiação total, resultantes da soma da radiação directa e difusa e da radiação directa difusa e de albedo, respectivamente.

Em seguida são apresentadas algumas definições importantes para o cálculo da irradiância e da radiância para um dado local na superfície da Terra.

- Declinação solar (δ):

Pode ser definida como o ângulo entre o plano do equador terrestre e a direcção Sol-Terra. Este ângulo pode ser calculado para cada dia do ano, de forma aproximada, pela expressão:

$$\delta [^\circ] = 23,45^\circ \cdot \sin \left[2\pi \cdot \frac{(284+n)}{365} \right] \quad (2.4)$$

Em que n representa o dia do ano em questão.

A declinação varia entre $-23,45^\circ$ no solstício de Inverno (21 de Dezembro) e $23,45^\circ$ no solstício de Verão (21 de Junho). Este ângulo é nulo nos equinócios da Primavera e do Outono (20 de Março e 22 de Setembro).

- Zénite (Z):

Corresponde ao plano normal ao local na superfície terrestre, ou seja, à vertical do local.

- Latitude (Φ):

É o ângulo entre o zénite e o plano do equador terrestre.

- Ângulo de saída do Sol (ω_s) e de pôr-do-sol (ω_p):

Representam os ângulos segundo os quais o Sol aparece e desaparece para um dado local e dia do ano. Estes dois ângulos são simétricos e podem ser calculados por:

$$\omega_s = -\omega_p = -\cos^{-1}(-\tan \delta \cdot \tan \Phi) \quad (2.5)$$

- Hora e ângulo solar:

É possível converter a hora solar no ângulo solar e vice-versa, usando a relação:

$$\text{Hora}_{\text{solar}} = 12 + \frac{\omega_{\text{solar}} [^\circ]}{15^\circ} \quad (2.6)$$

- Distância zenital (θ_z):

Define-se como o ângulo descrito entre o zénite do local e direcção da radiação directa incidente. Pode ser calculada por:

$$\theta_z = \cos^{-1}(\sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega_{solar}). \quad (2.7)$$

- Elevação solar (γ_s):

É o ângulo formado entre a horizontal do local e a radiação directa incidente no plano. Pode ser obtida por: $\gamma_s = 90^\circ - \theta_z$.

- Azimute solar (ψ_s):

Corresponde ao ângulo formado entre a direcção sul e a projecção sobre o plano horizontal do local da direcção Sol-Terra. É possível determiná-lo pela expressão:

$$\psi_s = \cos^{-1}\left(\frac{\sin \gamma_s \cdot \sin \phi - \sin \delta}{\cos \gamma_s \cdot \cos \phi}\right) \text{ para } \omega_{solar} > 0$$

e pela expressão , (2.8)

$$\psi_s = -\cos^{-1}\left(\frac{\sin \gamma_s \cdot \sin \phi - \sin \delta}{\cos \gamma_s \cdot \cos \phi}\right) \text{ para } \omega_{solar} < 0$$

Para um plano inclinado é necessário definir ainda mais duas grandezas para que seja possível determinar a radiação incidente. Sendo elas:

- Inclinação do plano (β):

É o ângulo que o plano forma com a horizontal do local em que se encontra.

- Ângulo de saída do Sol sobre o plano (ω_{splano}):

Pode ser calculado por,

$$\omega_{splano} = \max[\omega_s; -\cos^{-1}(-\tan \delta \cdot \tan(\phi - \beta))] \quad (2.9)$$

Estando definidas todas as grandezas relevantes é então possível calcular os valores de irradiância e de radiância para um plano inclinado pelo procedimento descrito em seguida:

Calcular a irradiância extraterrestre para o local em estudo, pela expressão

$$G_0 = G_{cte} \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot n}{365}\right)\right) \cdot (\sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega_{solar}) \quad (2.10)$$

Obter o valor da radiância diária extraterrestre dado por

$$H_0 = \left(\frac{24}{\pi}\right) \cdot G_{cte} \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot n}{365}\right)\right) \cdot (|\omega_s| \sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \sin|\omega_s|).$$

Nota: ω_s em radianos. (2.11)

Recolher os dados da radiância global diária de uma estação meteorológica próxima do local em estudo, ou então estimar o seu valor a partir do índice de insolação usando a seguinte expressão

$$H = H_0 \cdot \left(a + b \cdot \frac{n_{insolação}}{N}\right) \quad (2.12)$$

Em que a e b são factores de correlação típicos de cada zona; $n_{insolação}$ é o número de horas diárias em que a irradiância é superior a 100 (W/m²); N é o número de horas de duração do dia; $n_{insolação}/N$ é o índice de insolação.

Calcular o índice de atenuação (K_T), que representa a atenuação devida à existência da atmosfera, dado por $\frac{H}{H_0}$.

Estimar a componente difusa da radiância (H_d) a partir de radiância global e do índice de atenuação por um dos modelos de regressão existente, por exemplo pelo modelo Collares-Pereira [2] em que

$$H_d = H \cdot (1,188 - 2,272 \cdot K_T + 9,473 \cdot K_T^2 - 21,856 \cdot K_T^3 + 14,648 \cdot K_T^4, \text{ para } K_T \geq 0,17) \quad (2.13)$$

$$\text{e } H_d = 0,99, \text{ para } K_T < 0,17.$$

Calcular a radiância directa, dada pela relação $H_b = H - H_d$.

Calcular o coeficiente de correcção (R_b) dos valores de radiância para a inclinação do plano em estudo, dado por

$$R_b = \frac{\cos(\theta - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \sin |\omega_{\text{plano}}| + |\omega_{\text{plano}}| \cdot \sin(\phi - \beta) \cdot \sin \delta}{\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin |\omega_{\text{plano}}| + |\omega_{\text{plano}}| \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta}. \quad (2.14)$$

Por fim, calcular o valor da radiância total (H_t), por exemplo pelo modelo isotrópico de Duffie e Beckman[2] em que

$$H_t = H_b \cdot R_b + H_d \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + H_r \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \cdot \rho, \quad (2.15)$$

sendo ρ a reflectividade do solo.

Actualmente existe software que permite obter directamente, para uma dada inclinação e local, os valores de irradiância e radiância bem como outros elementos necessários ao dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, como é o caso do RETScreen® ou do site <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>, poupando o esforço de cálculo dedicado à determinação destas grandezas.

2.2 - Tecnologia fotovoltaica

Nesta secção são apresentados o princípio geral de funcionamento das células fotovoltaicas, as diferentes tecnologias de conversão existentes actualmente e os principais factores que condicionam a conversão de energia luminosa em energia eléctrica.

2.2.1 - Produção de energia fotovoltaica

As células fotovoltaicas têm como princípio de funcionamento o efeito fotovoltaico, descoberto em 1839 pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel [5]. O efeito fotovoltaico explica a conversão de energia luminosa incidente numa junção p-n (célula fotovoltaica) em energia eléctrica.

Segundo os princípios do efeito fotovoltaico, a incidência de fótons na camada n de um material semiconductor fornece energia aos electrões (portadores maioritários) que, quando superior à banda de energia intrínseca do semiconductor (*bandgap*) que separa as bandas de valência e de condução (cerca de 1eV) [3], provoca a criação de pares electrão-lacuna. O campo eléctrico devido à existência da junção p-n promove a

circulação dos electrões pelo circuito de carga [6] (exterior à célula fotovoltaica). A tensão da célula deve-se ao efeito de difusão que ocorre no material. O efeito de difusão e o campo eléctrico devido à junção p-n neutralizam-se de forma a atingir um ponto de equilíbrio, dependente da corrente que circula pela carga.

A recombinação de portadores na junção p-n, responsável pelo aparecimento da corrente de diodo, aumenta com o aumento da tensão externa. A diminuição da diferença de potencial aos terminais da célula, devida a aumento de carga, diminui o campo eléctrico da junção provocando uma difusão mais larga e conseqüentemente uma diminuição da corrente de diodo (contrária à corrente na carga).

Existem vários factores limitadores do processo de conversão de energia luminosa em energia eléctrica, entre os quais as perdas por:

- reflexão;
- não absorção, por energia insuficiente dos fotões (só uma pequena parte do espectro solar é capaz de excitar os electrões);
- transmissão (não se dá criação do par electrão-lacuna na camada n do semiconductor);
- cada fotão só poder excitar um electrão pelo que, para fotões com energia superior à “bandgap” existe um desperdício de energia que é transformada em calor.

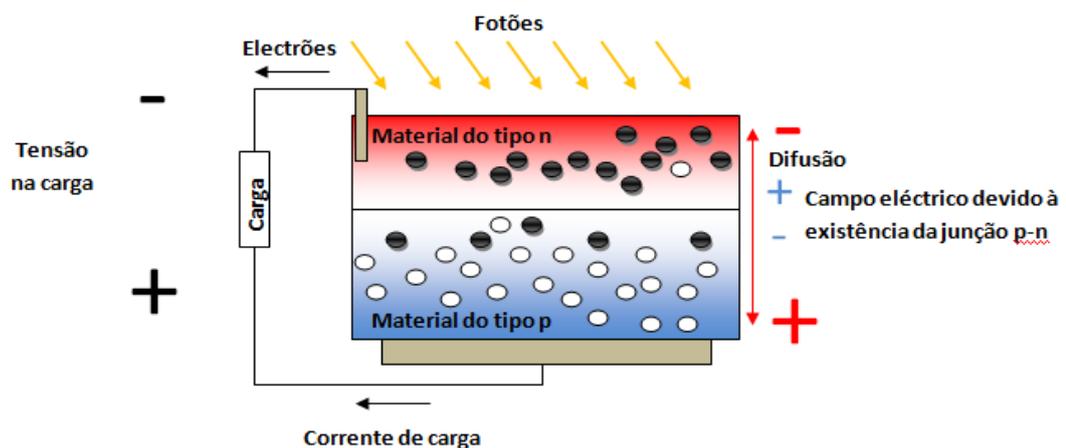


Figura 2.1 - Efeito fotovoltaico

2.2.2 - Tecnologias de conversão

As tecnologias de construção de células fotovoltaicas podem dividir-se em três gerações, da seguinte forma:

- Primeira geração: Silício cristalino (actualmente representa cerca de 90% das células disponíveis no mercado).
- Segunda geração: Películas finas aplicadas sobre substratos rígidos.
- Terceira geração: Películas finas aplicadas sobre substratos flexíveis.

As células que utilizam a tecnologia de silício cristalino podem ainda ser de dois tipos, silício monocristalino ou policristalino. Em ambos os casos, para o seu fabrico, é necessário obter inicialmente silício com um grau de pureza extremamente elevado (99,999999%). Através de diferentes processos industriais é obtido o silício monocristalino ou policristalino consoante o método de processamento utilizado.

A eficiência das células de silício monocristalino encontra-se entre os 13 e os 17% e a das células de silício policristalino situa-se entre os 11 e 14%. Apesar das primeiras apresentarem uma eficiência mais elevada o processamento do silício monocristalino é também mais dispendioso.

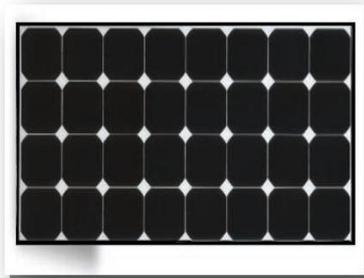


Figura 2.2 - Módulo de silício monocristalino [7]



Figura 2.3 - Módulo de silício policristalino [8]

As células com tecnologia de películas finas sobre substratos rígidos podem ser de quatro tipos consoante o tipo de material semiconductor utilizado. Os materiais usados neste tipo de células são: o silício amorfo (a-Si), o disseleneto de cobre e índio (CIS), o telureto de cádmio (CdTe) e o arseneto de gálio (GaAs). A eficiência deste tipo de células ronda os 7% para os três primeiros tipos atrás referidos, e os 30% para as células de arseneto de gálio (este tipo de células é utilizado quase exclusivamente em

aplicações espaciais devido ao seu custo elevado). Embora o rendimento das células de silício amorfo, disseleneto de cobre e índio, e de telureto de cádmio seja bastante inferior ao das células de silício cristalino este tipo de células apresenta algumas vantagens entre as quais, a menor quantidade de material e energia gasta no seu fabrico que conduz a um preço mais baixo, a menor perda de eficiência a altas temperaturas, o melhor desempenho em condições de baixa radiação e de radiação difusa e a menor sensibilidade aos sombreamentos devido à sua geometria (células longas e estreitas).

As células da denominada terceira geração não existem ainda no mercado, uma vez que se encontram ainda em fase de testes e, portanto, a sua produção industrial ainda não se iniciou. As tecnologias em desenvolvimento neste domínio passam pelo fabrico de: células multi-junção recorrendo a diferentes materiais semicondutores com gaps de energia sucessivamente mais baixos, possibilitando um melhor aproveitamento do espectro de radiação solar (a eficiência deste tipo de células para o caso de tripla junção atingiu já os 40% [4]); células constituídas por matérias orgânicas semicondutoras, como é o caso do dióxido de titânio, aplicadas sobre substratos flexíveis, cujo objectivo é, em geral, imitar o processo de fotossíntese (a eficiência deste tipo de células ronda ainda os 5% [5]); células designadas por termo-fotovoltaicas em que a energia da radiação solar é inicialmente convertida em calor e em seguida convertida em energia eléctrica por uma célula fotovoltaica concebida para operar numa banda de comprimentos de onda térmicos.

2.2.3 - Grandezas características das células fotovoltaicas

O conhecimento das grandezas características das células fotovoltaicas é importante para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. Tais grandezas podem ser obtidas por análise das curvas características da célula, normalmente fornecidas pelo fabricante.

A figura 2.6 ilustra o aspecto típico das curvas características de uma célula fotovoltaica.

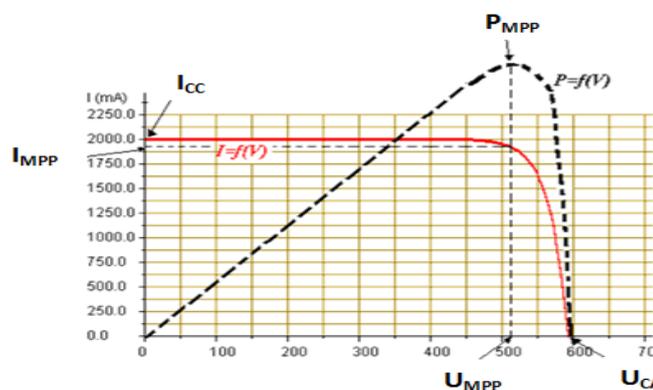


Figura 2.4 - Curvas características de uma célula fotovoltaica [adaptado de 5]

Na figura 2.6 estão representadas as seguintes grandezas características da célula:

I_{CC} - corrente de curto-circuito;

U_{CA} - tensão em circuito aberto;

P_{MPP} - potência máxima;

I_{MPP} - valor de corrente correspondente ao ponto de potência máxima;

U_{MPP} - valor de tensão correspondente ao ponto de potência máxima.

A estas podem acrescentar-se ainda as duas seguintes:

FF- factor de forma da célula definido por $FF = \frac{P_{MPP}}{I_{CC} \cdot U_{CA}}$

η - rendimento da célula definido por $\eta = \frac{P_{MPP}}{G \cdot A_{célula}}$, onde G é a irradiância em (W/m^2) e A representa a área da célula em (m^2).

2.2.4 - Efeitos da temperatura no funcionamento das células fotovoltaicas

A temperatura tem efeitos importantes no funcionamento de células fotovoltaicas pelo que não pode ser negligenciada. As figuras 2.7 e 2.8 ilustram a influência da temperatura de operação nas curvas características de uma célula.

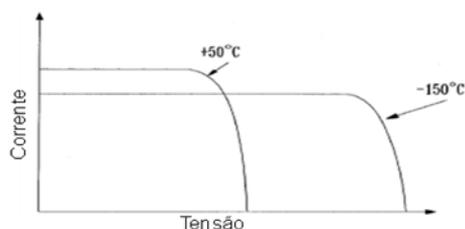


Figura 2.5 - Influência da temperatura na curva tensão-corrente de uma célula fotovoltaica [5]

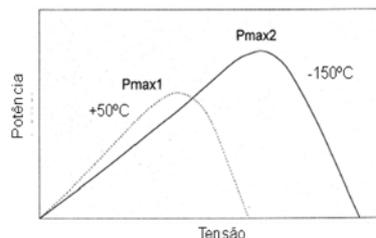


Figura 2.6 - Influência da temperatura na curva tensão-potência de uma célula fotovoltaica [5]

O aumento da temperatura provoca uma maior agitação das partículas e, portanto, uma maior recombinação de portadores de carga. Este fenómeno provoca uma diminuição da tensão da célula que, por sua vez, dá lugar a uma difusão mais larga que diminui a corrente de diodo, conseqüentemente verifica-se um pequeno aumento da corrente da célula.

A diminuição da tensão é mais notória do que o aumento da corrente, pelo que se verifica também uma diminuição da potência disponível aos terminais da célula e, portanto, um menor rendimento. A diminuição da potência disponível tem como consequência um aumento da temperatura pelo que o efeito se transforma num ciclo.

Para efectuar a correcção da temperatura são utilizados os coeficientes de correcção de temperatura para a corrente, a tensão e, por vezes para a potência. Estes coeficientes representam-se por α_I (A/°C ou %/°C), β_U (V/°C ou %/°C) e τ_P (W/°C ou %/°C).

As características da célula são, tipicamente, dadas para condições STC [*Standard Test Conditions* - Irradiância= 1000W/m²; T_{célula}=25°C; AM (massa de ar)=1,5], no entanto, estas podem ser corrigidas para outras condições de operação, recorrendo aos coeficientes de correcção da temperatura referidos acima e calculando a temperatura de funcionamento da célula para as novas condições, recorrendo à expressão:

$$T_{célula} = T_a + G \cdot \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) - \frac{P}{A \cdot (K_C + v_{vento} \cdot K_V)} \quad (2.16)$$

Em que P corresponde à potência da célula em (W), A representa a área da célula em (m²), K_C e K_V correspondem a perdas térmicas da célula, v_{vento} é a velocidade do vento em (m/s), T_a é a temperatura ambiente em (°C) e NOCT (*nominal operating cell temperature*) representa a temperatura nominal da célula dada pelo fabricante.

2.2.5 - Efeitos do valor de irradiância no funcionamento das células fotovoltaicas

A irradiância é um dos factores determinantes no funcionamento de células fotovoltaicas, influenciando fortemente o valor de algumas das suas grandezas características. A figura 2.9 ilustra os efeitos do valor da irradiância na sua característica tensão-corrente.

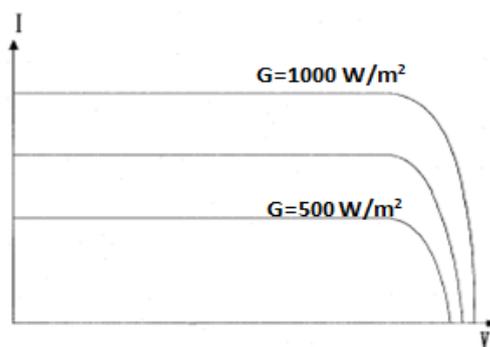


Figura 2.7 - Influência do valor da irradiância na curva tensão-corrente de uma célula fotovoltaica [adaptado de 5]

Um aumento do valor de irradiância provoca um aumento da corrente de curto-circuito da célula (a corrente é directamente proporcional ao valor da irradiância). Por sua vez, a tensão em circuito aberto mantém-se praticamente constante. A conjugação destes dois factos conduz a um aumento da potência e do rendimento da célula [5].

2.2.6 - Conceitos de célula, módulo e gerador fotovoltaico.

A célula fotovoltaica é a unidade básica que permite a conversão de energia luminosa em energia eléctrica. Ao conjunto de várias células associadas em série e/ou em paralelo dá-se o nome de módulo ou painel fotovoltaico [5]. A associação de vários módulos fotovoltaicos em série e/ou em paralelo designa-se por gerador fotovoltaico (array, da nomenclatura inglesa).

Quando se associam várias células ou módulos em série pretende-se aumentar a tensão do grupo, por outro lado, quando se associam várias células ou módulos em paralelo pretende-se aumentar a corrente do grupo. Em ambos os casos a potência do conjunto aumenta.

A equação característica de um módulo fotovoltaico é semelhante à de uma célula mas com as grandezas características do módulo. Se for conhecido o número de células em série e em paralelo que constituem um módulo fotovoltaico é possível estabelecer uma relação entre as grandezas da célula e do módulo.

A associação em série ou em paralelo de células ou módulos fotovoltaicos requer alguns cuidados, como nomeadamente a colocação de díodos de passo (bypass) e de bloqueio (fileira), respectivamente.

Os díodos de passo são colocados em paralelo com os módulos quando estes se encontram associados em série, desta forma, em caso de defeito numa das células ou módulos, por exemplo devido a sombreamento, a corrente produzida pelas restantes unidades é desviada pelo díodo isolando o defeito e evitando que todo o conjunto saia de serviço. A ligação de díodos de passo é exemplificada na figura 2.10.

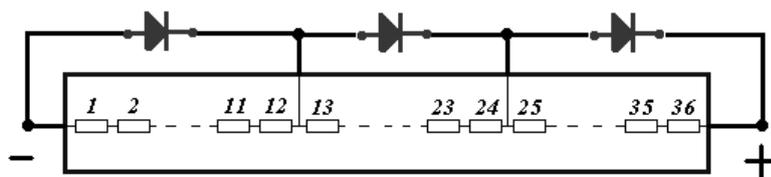


Figura 2.8 - Ligação de díodos de passo [5]

Os díodos de bloqueio são utilizados em série com cada célula ou fileira (conjunto de células ou módulos em série) para evitar curto-circuitos, correntes inversas ou potenciais diferentes entre elementos da associação em paralelo, em caso de defeito [3]. Os díodos utilizados para o efeito são frequentemente do tipo Schottky e, segundo a norma CEI 60364-7-712, devem apresentar uma tensão inversa igual ou superior à tensão em circuito aberto da célula ou fileira em condições STC. A figura 2.11 ilustra a sua aplicação.

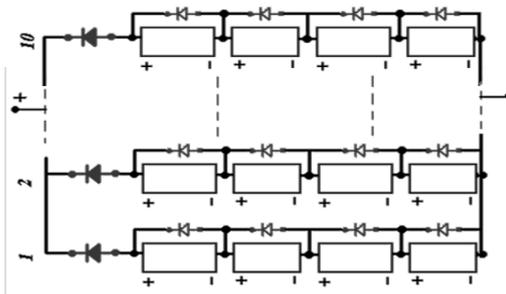


Figura 2.9 - Ligação de díodos de bloqueio [5]

2.3 - Baterias de acumuladores

As baterias desempenham um papel importante nos sistemas fotovoltaicos isolados para fazer face ao carácter intermitente da produção de energia eléctrica baseada neste tipo de tecnologia. As baterias desempenham a função de armazenamento de energia para que seja possível a alimentação das cargas nos períodos em que a produção é insuficiente para o efeito e mesmo para o período nocturno em que não existe produção.

As baterias utilizadas neste tipo de aplicações são baterias do tipo secundário, ou seja, baterias de acumuladores recarregáveis. Um acumulador, elemento básico de uma bateria, é constituído essencialmente por dois eléctrodos metálicos, um ânodo e um cátodo, imersos num electrólito, um ácido ou uma base, contido num vaso. Quando é acoplado aos terminais dos eléctrodos um circuito externo, uma carga ou uma fonte de tensão, dão-se reacções de oxidação-redução entre os eléctrodos e o electrólito que promovem trocas iónicas entre estes elementos fazendo com que circule no circuito externo uma corrente eléctrica. Invertendo-se o sentido dessa corrente inverte-se o sentido das reacções químicas, pelo que é possível carregar e descarregar os acumuladores [9]. Uma bateria consiste na associação,

normalmente em série, de vários acumuladores elementares, o que permite elevar a tensão fornecida aos terminais e a capacidade de armazenamento de energia.

2.3.1 - Tipos de baterias secundárias

Existem vários tipos de baterias de acumuladores utilizados em sistemas fotovoltaicos, constituídos por diferentes materiais que lhes conferem, por consequência, características distintas. É por essa razão importante conhecer as características dos diferentes tipos de baterias utilizados para que se possa fazer uma escolha adequada às exigências do sistema em que se pretendem aplicar.

Em seguida serão apresentadas as características dos principais tipos de baterias de acumuladores utilizados actualmente.

- Baterias chumbo-ácido:

São o tipo de baterias mais utilizado em sistemas fotovoltaicos devido ao seu baixo custo e nível de desempenho. Neste tipo de baterias os eléctrodos são constituídos por placas de chumbo imersos num electrólito ácido, tipicamente o ácido sulfúrico [9].

De um modo geral as baterias chumbo-ácido devem ser carregadas com correntes baixas, o que conduz a um tempo de carga elevado. Durante o processo de carga deve ser evitada a ocorrência de sobrecarga, uma vez que as baterias chumbo-ácido são sensíveis a este fenómeno. Este tipo de baterias nunca deve ser descarregado totalmente sendo que uma descarga total pode impossibilitar a recarga da bateria, ou pelo menos, diminuir a capacidade de carga. As baterias chumbo-ácido são ainda sensíveis a variações de temperatura, sendo que altas temperaturas aumentam a capacidade e diminuem o tempo de vida útil e baixas temperaturas diminuem a capacidade.

Existem dois grandes tipos de baterias chumbo-ácido:

- Baterias chumbo-ácido ventiladas ou abertas (VLA):

Neste tipo de baterias o electrólito encontra-se no estado líquido, em solução aquosa. Tal facto, obriga ao funcionamento numa posição fixa para que não se dê o derrame do electrólito, e à reposição periódica do nível de água uma vez que durante o funcionamento da bateria, principalmente em condições de sobrecarga, se dá a electrólise da água

que faz com que o oxigénio e o hidrogénio sejam libertados no estado gasoso.

o Baterias chumbo-ácido estanques ou reguladas por válvulas (VLRA):

Este tipo de baterias é selado possuindo, no entanto, válvulas que permitem a saída de gases quando a pressão no interior da bateria atinge níveis perigosos.

De uma maneira geral as baterias VLRA apresentam, face às VLA, a vantagem de permitirem a recombinação dos gases, reduzindo as perdas de água, o que faz com que não necessitem de manutenção.

Dentro deste tipo de baterias distinguem-se ainda duas tecnologias diferentes:

- Baterias com separador de microfibras de vidro, vulgarmente conhecidas por baterias AGM. Este separador absorve o electrólito o que evita que este se desloque livremente no interior da bateria.
- Baterias de gel em que o ácido se encontra misturado com sílica, conferindo ao electrólito a consistência de um gel, o que mantém o electrólito imóvel no interior da bateria.

•Baterias níquel-cádmio (Ni-Cd):

Este tipo de baterias é constituído basicamente por um ânodo de hidróxido de níquel, um cátodo de cádmio e um electrólito alcalino, tipicamente hidróxido de potássio [9]. As reacções de oxidação-redução dão-se apenas entre os eléctrodos, o que anula a ocorrência de sulfatação. As baterias constituídas por acumuladores Ni-Cd têm um preço inicial mais elevado do que as chumbo-ácido mas são mais resistentes a variações de temperatura e a condições de sobrecarga. Possuem ainda a vantagem de possibilitarem a sua carga com correntes elevadas o que conduz a um menor tempo de carga. Para além do seu preço inicial elevado a principal desvantagem das baterias Ni-Cd reside na existência de efeito de memória que obriga a descarregar totalmente a bateria para que não se dê lugar à sua viciação (fenómeno que diminui a tensão fornecida pela bateria). Normalmente são baterias seladas.

- Baterias níquel-hidretos metálicos (NiMH):

Estas baterias têm uma constituição semelhante às Ni-Cd. Fundamentalmente a diferença introduzida relativamente às baterias Ni-Cd reside na alteração dos materiais que constituem o cátodo (uma liga de elementos metálicos) que serve para anular o indesejável efeito de memória.

- Baterias de iões de lítio (Li-ion):

Um acumulador de iões de lítio, é constituído basicamente por um cátodo de lítio, um ânodo de carbono poroso e um electrólito composto por sais de lítio num solvente orgânico (solução não aquosa) [9].

Estas baterias são leves e tem um tempo de vida útil elevado. Podem ser carregadas com correntes altas, tal como as Ni-Cd, e suportam uma vasta amplitude de temperaturas de funcionamento. As principais desvantagens deste tipo de baterias residem na sua baixa eficiência e no preço elevado.

2.3.2 - Parâmetros característicos de baterias secundárias

Para o dimensionamento de um sistema utilizando baterias de acumuladores é necessário o conhecimento das suas características no sentido de seleccionar o tipo de bateria adequado às condições de funcionamento do sistema. Em seguida são apresentadas as principais características fornecidas pelos fabricantes nas folhas de características das baterias de acumuladores.

- Capacidade: A capacidade de uma bateria é normalmente expressa em ampére-hora (Ah) e representa o valor teórico de corrente que a bateria é capaz de fornecer durante uma hora de funcionamento a 25°C.
- Tempo de descarga: Tempo que corresponde à duração típica do processo de descarga da bateria.
- Energia específica: Quantidade total de energia que uma bateria pode fornecer por unidade de massa para uma dada taxa de descarga.
- Densidade energética: Quantidade de energia que uma bateria é capaz de fornecer por unidade de volume, para uma da taxa de descarga.

- Ciclos de vida útil: Representa o número de vezes que uma bateria pode ser carregada e descarregada até que a sua capacidade de carga não consiga ir além de 80% da capacidade de carga nominal.
- Taxa de auto-descarga: Quantidade de carga perdida pela bateria, expressa em percentagem, mesmo quando esta não se encontra em funcionamento.
- Profundidade de descarga: Este parâmetro é frequentemente referido por DOD (*Depth of Discharge*) e refere-se à quantidade de carga retirada da bateria num ciclo típico de funcionamento, expressa em percentagem da capacidade nominal desta.

É importante referir que no caso das baterias chumbo-ácido este parâmetro influencia fortemente o número de ciclos de vida útil da bateria, sendo que quanto maior for a profundidade de descarga menor é o número de ciclos de vida útil. Para este tipo de baterias existe um valor máximo para a profundidade de descarga admissível que sendo ultrapassado pode impossibilitar a recarga da bateria.

2.3.3 - Métodos de carga de baterias

Existem vários métodos que permitem carregar baterias secundárias. Estes variam quanto ao princípio de funcionamento, à simplicidade de implementação e à sua eficácia.

A selecção de um determinado método de carga deve sempre ter em conta o tipo de bateria em que este será aplicado.

Segue-se a apresentação dos principais métodos de carga utilizados.

- Corrente constante: O método de carga a corrente constante é fácil de implementar, conduzindo a circuitos de carga simples e de baixo custo [10].

No entanto o método apresenta desvantagens, por um lado a utilização de correntes elevadas é prejudicial quando se pretende carregar baterias sensíveis à sobrecarga, como é o caso das chumbo-ácido, por outro lado, a utilização de correntes baixas conduz a tempos de carga elevados que podem ser inviáveis, por exemplo no caso de sistemas fotovoltaicos com ciclo de descarga diário.

Este método pode então ser adequado a baterias pouco sensíveis a sobrecarga como as níquel-cádmio, uma vez que suportam também a utilização de correntes elevadas na sua carga, mas torna-se difícil aplicá-lo nas baterias chumbo-ácido.

- **Tensão constante:** Neste método a tensão de carga é mantida constante mas a corrente de carga varia ao longo do processo. A corrente é elevada no início do processo de carga e vai diminuindo até atingir valores muito baixos aquando da finalização do processo, tal facto faz com que tipicamente a finalização da carga seja muito lenta.

A tensão de carga tem de ser ajustada consoante o tipo de bateria a carregar, valores muito elevados da tensão de carga podem conduzir a sobrecarga na fase final da carga e, por consequência, desencadear um processo de aquecimento em cascata conhecido na nomenclatura inglesa como “*thermal runaway*” onde o aquecimento dá lugar a correntes mais elevadas que, por sua vez, provocam aquecimento por efeito Joule e assim sucessivamente até que ocorra a destruição da bateria.

- **Regulação automática:** Os grandes avanços ao nível da electrónica permitiram o desenvolvimento de métodos de carga mais sofisticados, muitos deles integrando microcontroladores, que permitem a redução do tempo de carga, bem como a ocorrência de sobrecarga. Este tipo de métodos de carga é o mais utilizado no presente e resulta, normalmente, da modificação de um dos métodos referidos anteriormente ou numa combinação dos dois métodos em diferentes etapas do processo de carga. A escolha do método de carga adequado exige um bom conhecimento das características da bateria a que se destina.

2.4 - Reguladores de carga

A utilização de módulos fotovoltaicos para produção de energia eléctrica em sistemas isolados faz-se acompanhar, na maioria das vezes, do uso de sistemas de armazenamento de energia, tipicamente baseados em baterias de acumuladores. Para assegurar o correcto funcionamento deste tipo de baterias é necessário monitorizar o estado da carga das mesmas e, deste modo, controlar a tensão durante o processo de carga das mesmas para que não ocorram situações de sobrecarga e, durante o processo de descarga, desligar as cargas sempre que a profundidade máxima de descarga seja atingida. Estas funções são desempenhadas por reguladores, tipicamente baseados em electrónica de potência, que podem assumir diferentes configurações. De seguida serão apresentados os principais tipos de reguladores utilizados em sistemas fotovoltaicos.

2.4.1 - Reguladores série

Este tipo de reguladores é constituído na sua essência por interruptores electrónicos, um detector de tensão (eventualmente digital) e um dispositivo de controlo, por exemplo um microcontrolador, capaz de efectuar a gestão do processo de carga e descarga das baterias através da análise dos valores de tensão lidos.

A designação regulador série advém da posição dos interruptores electrónicos em relação ao módulo fotovoltaico, sendo que estes se encontram em série.

O controlo dos processos de carga e descarga é feito pela comutação dos interruptores electrónicos, isolando o módulo fotovoltaico das baterias quando estas se encontram totalmente carregadas e, desligando as cargas das baterias quando, durante o processo de descarga, é atingida a profundidade máxima de descarga admissível [3].

2.4.2 - Reguladores paralelo

A sua constituição é semelhante à dos reguladores série, a principal diferença reside no facto de um dos interruptores electrónicos ser colocado em paralelo com o módulo fotovoltaico. Deste modo, a carga é controlada curto-circuitando momentaneamente o módulo fotovoltaico.

Este tipo de reguladores permite ainda evitar que o módulo funcione como carga durante a noite, mantendo-o curto-circuitado durante o período nocturno [3].

2.4.3 - Reguladores MPPT

Este tipo de regulador é o mais adequado para sistemas fotovoltaicos em que se pretende tirar o máximo partido do módulo fotovoltaico a utilizar. A função deste tipo de regulador, para além das já indicadas para os anteriores, é pesquisar o ponto de potência máxima e impor ao módulo a tensão correspondente a esse ponto, garantindo assim que o sistema opere sempre, pelo menos, em torno desse ponto. Os reguladores deste tipo têm normalmente uma constituição mais complexa que os anteriormente referidos, devido a maiores exigências ao nível do controlo e à necessidade de inclusão de um conversor DC/DC que permita impor ao módulo fotovoltaico o funcionamento no ponto de potência máxima.

Para a pesquisa do ponto de potência máxima foram desenvolvidos vários algoritmos com diferentes graus de complexidade e de eficiência [11], alguns dos quais serão em seguida descritos.

Um dos algoritmos bastante utilizado para esta tarefa é o de perturbar e observar. Na sua essência este algoritmo introduz, periodicamente, perturbações no valor da tensão imposta ao módulo fotovoltaico e analisa a variação que ocorre em termos de potência. Se a variação for positiva, então o sistema encontra-se a operar num ponto mais próximo do ponto de potência máxima e o controlador continua a perturbar o valor da tensão no mesmo sentido da primeira perturbação. Se pelo contrário a variação de potência for negativa então o sistema está a operar num ponto mais afastado do ponto de potência máxima, pelo que o controlador deve inverter o sentido das perturbações. Este processo repete-se até que as perturbações de tensão resultem numa variação de potência negativa independentemente do sentido da perturbação, o que indica que o sistema se encontra a operar, pelo menos na vizinhança do ponto de potência máxima. Este algoritmo tem as desvantagens de nunca fixar a operação do sistema no ponto de potência máxima, mas sim na vizinhança dele, e de poder assumir comportamentos errados aquando de variações rápidas das condições de operação, mas a sua implementação é simples e produz, ainda assim, resultados satisfatórios.

Outro algoritmo utilizado para a pesquisa do ponto de potência máxima é o algoritmo dito de tensão constante. O seu funcionamento assenta no pressuposto de que o quociente entre a tensão no ponto de potência máxima e a tensão de circuito aberto é constante e inferior a um, para um dado módulo. Dado o valor do quociente, pré-determinado, o que o controlador faz é isolar periodicamente o módulo fotovoltaico, registar o valor da tensão em circuito aberto, calcular, como percentagem desta, o valor da tensão para o ponto de potência máxima e impor esse valor de tensão ao módulo. Este algoritmo proporciona uma grande simplicidade de implementação, contudo, devido ao pressuposto em que assenta, tende a ter uma eficiência reduzida sempre que as condições de temperatura e irradiação

se afastem significativamente daquelas para as quais foi determinado o quociente entre as duas tensões. Outro factor que reduz também a eficiência deste método, e que pode até ter um efeito bastante indesejável sempre que se pretenda alimentar cargas sem que exista um sistema de armazenamento de energia, é o facto de o módulo ser isolado periodicamente para aquisição da tensão de circuito aberto.

Um outro algoritmo também utilizado para realizar esta tarefa é o da condutância incremental, este algoritmo assenta nas propriedades da derivada da potência de um módulo fotovoltaico em ordem à tensão aos seus terminais, que permitem realizar a pesquisa do ponto de potência máxima. Para esta derivada, tendo em conta que ela se anula no ponto de potência máxima, pode escrever-se a seguinte equação:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V.I)}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV} = 0, \text{ para o ponto de potência máxima. } (2.17)$$

Rearranjando a equação anterior é possível obter a seguinte relação:

$$-\frac{I}{V} = \frac{dI}{dV}, \text{ para o ponto de potência máxima.}$$

Em que o membro da esquerda representa o simétrico do valor da condutância do módulo fotovoltaico.

Esta relação permite avaliar, dados os valores de tensão e corrente relativos a um ponto de operação do módulo, se este se encontra a operar a uma tensão inferior ou superior à do ponto de potência máxima. Podem ocorrer três casos distintos, sendo que:

$$\text{Se } -\frac{I}{V} = \frac{dI}{dV}, \text{ então } \frac{dP}{dV} = 0 \text{ e a tensão corresponde ao ponto de potência máxima.}$$

$$\text{Se } -\frac{I}{V} < \frac{dI}{dV}, \text{ então } \frac{dP}{dV} > 0 \text{ e a tensão está abaixo da do ponto de potência máxima.}$$

$$\text{Se } -\frac{I}{V} > \frac{dI}{dV}, \text{ então } \frac{dP}{dV} < 0 \text{ e a tensão está acima da do ponto de potência máxima.}$$

Posto isto, para a aplicação do algoritmo é necessário medir o valor da tensão e da corrente do módulo fotovoltaico, calcular as respectivas derivadas, concluir, com base nos casos atrás considerados, se o módulo se encontra a operar a uma tensão inferior, superior, ou igual à do ponto de potência máxima e, por fim, actuar no valor da tensão no sentido de impor ao módulo fotovoltaico a operação no ponto de potência máxima.

Este algoritmo permite obter eficiências elevadas mesmo sob variações rápidas das condições de operação.

2.5 - Noções luminotécnicas e luminárias de iluminação pública

O dimensionamento de candeeiros de iluminação pública requer o conhecimento de algumas grandezas e conceitos luminotécnicos que permitem avaliar as características da luz emitida por determinada fonte de luz e assim aferir a sua adequação para o desempenho das funções pretendidas. Nesse sentido serão em seguida apresentadas algumas grandezas e conceitos luminotécnicos [12].

2.5.1 - Grandezas e conceitos luminotécnicos

- O fluxo luminoso (F) emitido por uma fonte luminosa representa quantidade de luz emitida num segundo, expresso em lumen (lm). É possível medir o fluxo emitido por uma fonte luminosa recorrendo a uma esfera de Ulbricht.
- O ângulo sólido (ω) define-se como sendo a superfície abraçada por uma esfera com centro no vértice do ângulo e o quadrado do raio da mesma. O ângulo sólido pode ser calculado pela expressão $\omega = \frac{A}{r^2}$ e é expresso em esterradiano (sr).
- A intensidade luminosa (I luminosa) pode ser definida como a quantidade de fluxo luminoso por unidade de ângulo sólido em que é emitido, admitindo que a fonte luminosa é pontual. Esta grandeza é dada pela expressão $I_{luminosa} = \frac{F}{\omega}$ e é expressa em candela (cd). O conhecimento da intensidade luminosa emitida por uma fonte, em conjunto com o conhecimento dos ângulos de emissão, permite a construção de diagramas polares de distribuição de intensidade luminosa.
- A iluminância (E) é a quantidade de fluxo luminoso recebido por unidade de área (A) iluminada. Pode ser calculada pela expressão $E = \frac{F}{A}$ e é expressa em lux (lx). Esta grandeza pode ser medida por intermédio de um luxímetro.

O conhecimento da localização dos pontos de igual iluminância sobre um plano a iluminar, permite o traçado das linhas isolux.

- A luminância pode definir-se como a quantidade de intensidade luminosa emitida por uma fonte luminosa ou por uma superfície reflectora por unidade de área aparente (A_a), em que a área aparente resulta da projecção da área observada num plano perpendicular à direcção de observação. Esta grandeza pode ser calculada pela expressão $L = \frac{I_{luminosa}}{A_a}$ e exprime-se em candelas por metro quadrado (cd/m²). Esta grandeza pode também ser medida recorrendo a um luminâncímetro.

- A lei do inverso do quadrado da distância resulta de aproximações e só é aplicável para casos em que as dimensões da fonte luminosa são muito inferiores à distância entre a fonte e o ponto em estudo. Tipicamente para distâncias superiores a cinco vezes o maior diâmetro da fonte luminosa os resultados obtidos com recurso a esta lei são quase exactos.

Nas condições anteriormente descritas a lei do inverso do quadrado da distância indica que, para um ponto numa dada superfície que se encontre na perpendicular baixada da fonte luminosa, a iluminância é directamente proporcional à intensidade luminosa emitida nessa direcção e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre a fonte e o ponto.

Nestas condições a iluminância pode ser calculada pela expressão $E [lx] = \frac{I_{luminosa}}{d^2}$.

- A lei do co-seno do ângulo de incidência indica que para um ponto numa dada superfície horizontal formando com a perpendicular baixada da fonte luminosa um ângulo γ a iluminância é directamente proporcional à intensidade luminosa emitida nessa direcção e ao cubo do co-seno de γ e inversamente proporcional ao quadrado da altura da fonte em relação ao ponto. Para as condições descritas acima a iluminância pode ser calculada pela expressão $E [lx] = \frac{I_{luminosa}(\gamma)}{h^2} \cdot \cos^3 \gamma$.

- Existem superfícies para as quais a luminância é independente do ângulo de observação. Sobre estas superfícies diz-se que obedecem à lei de Lambert. Resumidamente a lei de Lambert indica que para uma superfície que obedeça às condições anteriormente descritas a intensidade luminosa segundo uma direcção formando um ângulo γ com a perpendicular baixada da fonte, pode ser obtida pelo produto entre a intensidade luminosa emitida na perpendicular ($I_{luminosa 0}$) e o co-seno do ângulo γ , sendo dada pela expressão

$$I_{luminosa \gamma} = I_{luminosa 0} \cdot \cos \gamma .$$

- Existem vários tipos de reflexão, que variam conforme as características dos materiais em que ocorrem, nomeadamente:

- A reflexão especular ou regular ocorre nas superfícies espelhadas ou polidas, neste tipo de reflexão o ângulo de reflexão é igual ao de incidência.

- A reflexão composta ocorre em superfícies rugosas. Neste tipo de reflexão não existe uma reprodução da luz incidente, ou seja, os ângulos de reflexão vêm alterados, no entanto, a intensidade máxima reflectida ocorre para um ângulo de reflexão igual ao ângulo de incidência.

- A reflexão difusa ocorre normalmente em superfícies sem brilho ou mate que obedecem à lei de Lambert. Neste tipo de reflexão a luz incidente é reflectida em todas as direcções, e a intensidade máxima reflectida ocorre para a direcção perpendicular à superfície reflectora.

- A reflexão mista ocorre em superfícies que, apesar de não serem polidas, apresentam brilho. Trata-se de uma situação intermédia entre a reflexão regular e a difusa, sendo que parte da luz incidente é difundida e a restante é reflectida.

2.5.2 - A visão humana

A luz corresponde a uma banda de radiação electromagnética perceptível ao olho humano, situada entre os comprimentos de onda compreendidos entre os 380nm e os 780nm. O olho humano possui três “modos de operação” diferentes, consoante as condições de iluminação em que opera [13]. Sendo eles:

- Visão fotópica ou diurna, que ocorre para níveis de iluminância superior a 30lux em que todos os elementos do olho estão em funcionamento pleno, proporcionando uma qualidade de visão total.

- Visão escotópica ou nocturna, que se verifica para níveis de iluminância inferiores a 10lux e caracteriza-se pelo não funcionamento dos cones, responsáveis pela percepção das cores, pelo que não é possível distinguir cores neste modo de visão.

- Visão mesópica que corresponde a modo de visão intermédio, em que todos os componentes do olho estão em funcionamento mas, no entanto, a sua eficácia é reduzida, pelo que a qualidade de visão é inferior à conseguida no modo fotópico quer a nível da percepção das cores quer no que concerne à capacidade focal. Este modo de visão é importante no âmbito da iluminação pública, uma vez que, é o modo de visão que ocorre para os níveis de iluminância tipicamente fornecidos pelas instalações deste tipo.

2.5.3 - Índices de avaliação do desempenho de fontes luminosas e luminárias

Existem vários tipos de fontes luminosas utilizadas tipicamente em iluminação pública. Estas podem diferir quanto ao princípio de funcionamento, ao equipamento auxiliar necessário, à sua eficiência, durabilidade, preço e às características da luz emitida. No sentido de permitir a comparação entre diferentes tipos de fontes foram criados ao longo dos anos, por parte de algumas comissões e organizações técnicas e até pela própria indústria de iluminação, alguns índices de referência. Em seguida serão expostos os principais índices de referência [14] bem como as características das fontes luminosas utilizadas, normalmente, em iluminação pública.

- **Rendimento luminoso:** Pode ser considerado como uma medida da eficiência do processo de transformação de energia eléctrica em energia luminosa e é dado pelo quociente entre o fluxo luminoso emitido e a potência eléctrica absorvida e exprime-se (lm/W).
- **Temperatura da cor:** É uma referência da cor da luz emitida por determinada fonte luminosa e expressa-se em (°K). Um aumento da temperatura da cor corresponde, em termos do espectro de radiação electromagnética, a uma deslocação no sentido da radiação infravermelha para a ultravioleta, ou seja, a luz apresenta uma cor avermelhada (quente) para temperaturas baixas e azulada (fria) para temperaturas altas.

Para além da temperatura da cor existem três intervalos com siglas e classificações diferentes de acordo com o aspecto da luz emitida, conforme a tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Classificação quanto à temperatura da cor

| Temperatura de cor | Sigla | Classificação | Tonalidade da cor |
|-------------------------|-------|---------------|-------------------|
| >5300 °K | C | Fria | Branco frio |
| Entre 3300 °K e 5300 °K | I | Intermédia | Branco neutro |
| <3300 °K | W | Quente | Branco quente |

- **Índice de restituição cromática (IRC):** Também conhecido por CRI (colour rendering index, da nomenclatura inglesa). Serve para classificar as fontes luminosas quanto à sua capacidade de reproduzir com exactidão as cores de um objecto ou superfície iluminada, este índice varia entre zero e cem, sendo que uma fonte luminosa que apresente um IRC igual a cem reproduz fielmente as cores das superfícies iluminadas. Existem ainda para cinco intervalos de valores de IRC classes

que permitem a classificação das fontes luminosas, essas classes estão definidas na tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Classificação quanto ao IRC

| Índice de restituição cromática (IRC) | Classe |
|---------------------------------------|--------|
| $IRC \geq 90$ | 1A |
| $80 \leq IRC < 90$ | 1B |
| $60 \leq IRC < 80$ | 2 |
| $40 \leq IRC < 60$ | 3 |
| $IRC \leq 40$ | 4 |

- **Duração de vida média:** É uma medida do tempo médio de vida das fontes luminosas e representa o tempo de funcionamento, expresso em horas, para o qual 50% dos elementos de um universo significativo de um determinado tipo de fontes luminosas, de um dado fabricante e lote, falham. Como falha pode ser entendida a avaria definitiva da fonte luminosa ou a degradação acentuada do fluxo emitido por envelhecimento dos componentes.

- **Factor de utilização:** Este parâmetro é muito importante na avaliação de desempenho de luminárias de iluminação pública e exprime-se pelo quociente entre o fluxo emitido pela luminária e o fluxo luminoso recebido pelo plano a iluminar, indicando assim, qual a parcela do fluxo luminoso emitido por uma luminária que é convertida em iluminação útil. Regra geral, quanto maior for o factor de utilização menor será o encandeamento e a poluição luminosa produzidos.

2.5.4 - Principais tipos de lâmpadas usadas em iluminação pública

As fontes luminosas mais utilizadas, actualmente, em iluminação pública são as lâmpadas de descarga, que têm como princípio básico de funcionamento a descarga eléctrica entre dois eléctrodos na presença de um gás que ao entrar em condução emite radiação electromagnética. Em seguida são apresentadas as principais características dos diferentes tipos de lâmpadas utilizados em iluminação pública.

- **Vapor de mercúrio de alta pressão:** Este tipo de lâmpadas é constituído por dois eléctrodos principais e dois auxiliares que se encontram dentro do tubo de descarga em que existe uma mistura de mercúrio sob alta pressão e argón, este último de

vaporização mais fácil o que facilita o arranque. Entre o tubo de descarga e a ampola exterior da lâmpada existe, normalmente, um gás inerte que permite a estabilidade térmica no interior da lâmpada. Alguns modelos têm também uma camada de pó fluorescente, adequados á produção de radiação vermelha, na parte interior do invólucro com o objectivo de transformar parte da radiação ultravioleta emitida em luz visível. Esta prática melhora significativamente o aspecto da luz emitida mas não se traduz numa grande melhoria do rendimento luminoso nem do índice de restituição cromática. As principais características das lâmpadas de vapor de mercúrio de alta pressão encontram-se resumidas na tabela 2.3.

Importa referir que este tipo de lâmpadas não é permitido pela actual norma que regula a concepção de instalações de iluminação pública (EN 13201).

Tabela 2.3 - Lâmpadas de vapor de mercúrio de alta pressão

| Características das lâmpadas de vapor de mercúrio de alta pressão | |
|---|---|
| Rendimento luminoso | De 36lm/W a 60lm/W |
| Temperatura de cor | De 3000°K a 4200°K |
| Índice de restituição cromática | Aproximadamente 50 |
| Duração de vida média | 10000h |
| Tempo de arranque | Aproximadamente 4 minutos |
| Luminância | De 4cd/cm ² a 15cd/cm ² |
| Equipamento auxiliar | Balastro e condensador |
| Posição de funcionamento | Qualquer |

•Vapor de sódio de alta pressão: Este tipo de lâmpadas é constituído essencialmente por dois eléctrodos inseridos num tubo de descarga de óxido de alumínio sinterizado. Dentro do tubo de descarga existe sódio, mercúrio e também xénon, em menor quantidade, para facilitar o arranque. O tubo de descarga é normalmente inserido dentro de uma ampola de vidro em vácuo, que forma o invólucro exterior da lâmpada.

Na tabela 2.4 existe um resumo das características relevantes das lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão.

Tabela 2.4 - Lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão

| Características das lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão | |
|--|---|
| Rendimento luminoso | De 65lm/W a 130lm/W |
| Temperatura de cor | De 1900°K a 2500°K |
| Índice de restituição cromática | De 25 a 80 |
| Duração de vida média | De 8000h a 12000h |
| Tempo de arranque | Aproximadamente 5 minutos |
| Luminância | De 25cd/cm ² a 500cd/cm ² |
| Equipamento auxiliar | Ignitor, balastro e condensador |
| Posição de funcionamento | Qualquer |

- Vapor de sódio de baixa pressão: Este tipo de lâmpadas é composto por um tubo de descarga em vidro, em forma de “U” com um eléctrodo em cada extremidade, desenhado para reflectir a radiação infravermelha a fim de garantir uma temperatura suficientemente elevada para que seja possível a vaporização do sódio. Dentro do tubo de descarga existe sódio e um gás inerte que possibilita o arranque da lâmpada. O tubo de descarga encontra-se dentro de uma ampola de vidro que constitui o invólucro exterior da lâmpada.

Segue-se a tabela 2.5 com o resumo das características deste tipo de lâmpada.

Tabela 2.5 - Lâmpadas de vapor de sódio de baixa pressão

| Características das lâmpadas de vapor de sódio de baixa pressão | |
|---|----------------------------|
| Rendimento luminoso | De 98lm/W a 200lm/W |
| Temperatura de cor | Aproximadamente 1700°K |
| Índice de restituição cromática | 0 |
| Duração de vida média | 12000h |
| Tempo de arranque | Aproximadamente 10 minutos |
| Luminância | 6cd/cm ² |
| Equipamento auxiliar | Ignitor e balastro |
| Posição de funcionamento | Qualquer |

- Iodetos metálicos: Este tipo de lâmpadas tem basicamente a mesma constituição que as lâmpadas de vapor de mercúrio de alta pressão, excepto na mistura de substâncias contida no tubo de descarga. Nas lâmpadas de iodetos metálicos são adicionadas ao mercúrio misturas com emissores iónicos ou com emissores moleculares, sendo que se obtêm uma emissão de luz com um espectro de riscas ou contínuo, respectivamente. Um exemplo de uma mistura utilizada com emissores iónicos é a composta por iodetos de sódio, tálio e índio. Uma mistura utilizada, com bons resultados, contendo emissores moleculares é conseguida pela junção de iodeto e cloreto de estanho.

Na tabela 2.6 encontram-se resumidas as principais características das lâmpadas de iodetos metálicos.

Tabela 2.6 - Lâmpadas de iodetos metálicos

| Características das lâmpadas de iodetos metálicos | |
|---|--|
| Rendimento luminoso | De 65lm/W a 100lm/W |
| Temperatura de cor | De 3000°K a 6000°K |
| Índice de restituição cromática | De 81 a 95 |
| Duração de vida média | De 3000h a 9000h |
| Tempo de arranque | Aproximadamente 4 minutos |
| Luminância | De 100cd/m ² a 6000cd/m ² |
| Equipamento auxiliar | Ignitor, balastro e condensador / balastro electrónico |
| Posição de funcionamento | Pode haver restrições |

2.5.5 - Luminárias de iluminação pública

As luminárias, ou armaduras de iluminação pública são constituídas por um conjunto de elementos eléctricos, ópticos e mecânicos. As luminárias de iluminação pública destinam-se a assegurar a distribuição de fluxo luminoso desejada com o melhor rendimento possível evitando sempre o encandeamento dos utilizadores, verificar as condições técnicas para o bom funcionamento dos elementos eléctricos, garantindo a segurança dos próprios componentes e dos utilizadores, e a protecção face às condições climatéricas das lâmpadas, do sistema óptico e dos componentes eléctricos.

Numa luminária de iluminação pública podem encontrar-se diversos componentes que importa conhecer, em seguida é feita a descrição de alguns desses componentes [15].

- **Reflectores:** São componentes ópticos que visam modificar a distribuição do fluxo luminoso pelo princípio da reflexão regular ou mista, podem assumir diversas formas e são normalmente construídos em vidro espelhado, alumínio abrihantado ou crómio polido quando se pretende obter reflexão regular, ou de alumínio martelado ou chapas pintadas quando se pretende obter reflexão mista.
- **Refractores:** Destinam-se também à alteração da distribuição do fluxo luminoso, mas pelo princípio da refração dos corpos transparentes, são tipicamente construídos em vidro ou em materiais plásticos que garantam uma resistência adequada a choques mecânicos e à fadiga provocada pelas condições climatérica.
- **Difusores:** Têm como principal função a diminuição da luminância das lâmpadas visando melhorar o conforto visual. São normalmente construídos em vidro claro quando se pretende um difusor transparente, em vidro despolido ou plástico claro quando se pretende um difusor translúcido, ou em plástico ou vidro opalinos quando se pretende um difusor opalino.
- **Ignitores:** Trata-se de um dispositivo que visa promover o arranque em lâmpadas de descarga, para tal o ignitor gera impulsos de tensão de valor superior ao valor de tensão de alimentação da lâmpada após o seu arranque. Os impulsos de tensão de valor elevado facilitam o início da descarga no gás.

- **Balastros:** São equipamentos eléctricos que se destinam a limitar o valor da corrente durante o funcionamento de lâmpadas de descarga, estes dispositivos podem ser magnéticos ou electrónicos.

Os balastros electromagnéticos são tipicamente constituídos por uma bobina enrolada num núcleo ferromagnético, sendo portanto um circuito indutivo.

Os balastros electrónicos são geralmente mais eficientes que os anteriores e permitem acumular também as funções de ignitor e regulador no fluxo no mesmo dispositivo, são normalmente constituídos basicamente por uma fonte comutada. Quando a frequência de comutação é elevada consegue-se anular o efeito estroboscópico e ainda aumentar a eficiência da lâmpada, o que constitui também uma vantagem face aos balastros electromagnéticos.

- **Condensadores de compensação:** Os circuitos de alimentação de lâmpadas de descarga tendem a ter um factor potência fortemente indutivo, pelo que é comum utilizar-se condensadores para gerar energia reactiva tendo em vista a correcção do factor potência.

- **Suporte das lâmpadas:** O órgão destinado ao suporte das lâmpadas deve assegurar o bom contacto eléctrico com a aparelhagem auxiliar e a manutenção da posição das lâmpadas mesmo quando a luminária é sujeita a vibrações.

- **Corpo da luminária:** O corpo da luminária serve de suporte mecânico para todos os outros componentes, pode também desempenhar total ou parcialmente as funções do sistema óptico. Deve garantir as condições para a fixação e bom funcionamento da aparelhagem auxiliar, das lâmpadas e do sistema óptico (quando este é independente do corpo), pelo que deve apresentar uma boa resistência mecânica a choques e vibrações e deve assegurar a protecção contra a corrosão. Deve permitir ainda o fácil acesso às lâmpadas e aparelhagem auxiliar para que possam ser substituídas.

- **Órgão de fixação da luminária:** É o elemento responsável pela fixação da luminária ao poste e pode, ou não, ser parte integrante da luminária. Este elemento pode ser fixo ou permitir a regulação da posição da luminária, mas em todo o caso deve garantir que a luminária permanece inalterável após o seu posicionamento.

- **Dispositivos de regulação:** Para assegurar uma maior versatilidade de utilização, algumas luminárias possuem dispositivos que permitem a adaptação às características da sua distribuição luminosa à superfície a iluminar ou a diferentes tipos de

lâmpadas. Tal pode ser conseguido através de mecanismos que permitam ajustar a posição da lâmpada em relação ao sistema óptico ou vice-versa.

- Ambientador isostático: É utilizado em luminárias fechadas com o objectivo de reter a humidade e o pó que pode penetrar na luminária, juntamente com o ar frio que entra. Este dispositivo é formado por um tubo para circulação do ar e por um cartucho perfurado contendo uma substância hidroabsorvente e outra que absorve o pó. Este equipamento evita com eficácia a acumulação de pó e humidade dentro da armadura que degradam o desempenho óptico e diminuem o tempo de vida útil dos componentes contidos na armadura.

2.6 - Díodos emissores de luz

Uma fonte luminosa que começou recentemente a ser utilizada para iluminação pública, e que tem fortes possibilidades vir a ser usada em larga escala em sistemas de iluminação, são os díodos emissores de luz, comumente conhecidos por LEDs (light-emitting diodes, da nomenclatura inglesa). Esta tecnologia, ainda em constante evolução, é já uma realidade em colunas de iluminação pública existentes no mercado e tem apresentado resultados bastante promissores. Deste modo, a presente secção deste trabalho é dedicada à apresentação da tecnologia LED.



Figura 2.10 - LED [17]

2.6.1 - Efeito de electroluminescência

Os LEDs têm como princípio geral de funcionamento o fenómeno da electroluminescência que ocorre em junções p-n constituídas por materiais semicondutores adequados para o efeito.

O efeito de electroluminescência ocorre em junções p-n quando é aplicada, por um circuito externo, uma tensão entre o ânodo e o cátodo. Se a tensão aplicada for de valor adequado os electrões do material do tipo n e as lacunas do material do tipo p deslocam-se em direcção à junção p-n e, quando se encontram, formam pares electrão-lacuna, transitando para um nível de energia inferior. A energia em excesso é libertada sob a forma de fotões. O comprimento de onda da radiação emitida depende da banda de energia entre dois níveis consecutivos do material semiconductor. Deste modo, a radiação emitida pelos LEDs pode ir desde ultravioleta até infravermelha dependendo dos materiais semicondutores utilizados. A tabela seguinte refere alguns dos materiais utilizados para o fabrico de LEDs emitindo em diferentes zonas do espectro.

Tabela 2.7 - Materiais semicondutores utilizados nos LEDs [16]

| Tipo de radiação/ Banda do espectro | Materiais semicondutores |
|--|--|
| Ultravioleta ($\lambda < 400$) | <ul style="list-style-type: none"> • Diamante • Nitreto de boro • Nitreto de alumínio • Nitreto de alumínio, gálio e índio |
| Violeta ($400 < \lambda < 450$) | <ul style="list-style-type: none"> • Nitreto de gálio e índio |
| Azul ($450 < \lambda < 500$) | <ul style="list-style-type: none"> • Seleneto de zinco |
| Verde ($500 < \lambda < 570$) | <ul style="list-style-type: none"> • Fosforeto de gálio • Fosforeto de alumínio, gálio e índio • Fosforeto de alumínio e gálio • Nitreto de gálio e índio /Nitreto de gálio(III) |
| Amarelo ($570 < \lambda < 590$) | <ul style="list-style-type: none"> • Fosforeto de alumínio, gálio e índio • Fosforeto de gálio(III) |
| Cor-de-laranja ($590 < \lambda < 610$) | <ul style="list-style-type: none"> • Fosforeto de gálio(III) • Arseneto de alumínio e gálio |
| Vermelho ($610 < \lambda < 760$) | <ul style="list-style-type: none"> • Fosforeto de alumínio, gálio e índio • Fosforeto de gálio (III) |
| Infravermelho ($\lambda > 760$) | <ul style="list-style-type: none"> • Arseneto de gálio • Arseneto de alumínio e gálio |

2.6.2 - Tecnologias de produção de LEDs

Actualmente são conhecidas três tecnologias distintas para a produção de LEDs, que se encontram em estágios de desenvolvimento. Em seguida são apresentados os diferentes tipos de LED decorrentes da aplicação dessas tecnologias.

- Cristalinos:

Utilizam materiais semicondutores cristalinos. Foram os primeiros a ser construídos, evoluíram já bastante ao longo dos anos e hoje são os mais eficientes. São utilizados em inúmeras aplicações, que vão desde o simples indicador luminoso até a iluminação pública e de interiores.

- Orgânicos:

Este tipo de LEDs utiliza materiais semicondutores orgânicos. Costumam denominar-se por OLEDs (Organic light-emitting diodes, da nomenclatura inglesa). São menos eficientes do que os cristalinos, mas possuem a vantagem de serem mais leves e de poderem ser flexíveis quando o material usado é um polímero. A sua principal aplicação, neste momento, é em ecrãs de pequenas dimensões.

- Pontos quânticos:

Trata-se de uma tecnologia ainda muito recente e em desenvolvimento, mas os envolvidos na pesquisa acreditam que possa vir a apresentar bons desempenhos no futuro.

Esta tecnologia consiste em revestir um LED convencional (cristalino) de cor azul com pontos quânticos (nanocristais semicondutores) que emitem brilho quando estimulados por radiação na região azul do espectro. A sua eficiência é ainda bastante inferior à dos LEDs convencionais, mas possuem a vantagem de se poder produzir luz praticamente em qualquer região do espectro, ou seja, de qualquer cor.

2.6.3 - LEDs para aplicações de iluminação pública

Do ponto de vista dos projectos de iluminação pública os LEDs que têm interesse são os chamados LEDs de alta luminância ou alta potência, também conhecidos como HBLEDs (high-brightness light-emitting diodes, da nomenclatura inglesa) de luz branca. Não é possível a produção directa de luz branca recorrendo aos LEDs convencionais (com a eficiência mais elevada até ao momento), uma vez que a radiação produzida directamente pelos LEDs se situa em regiões do espectro com comprimentos de onda bem definidos. Para a produção de luz branca, ou da sensação de luz branca, é necessária uma emissão que abranja comprimentos de onda em todo o espectro de radiação visível, ou pelo menos nas regiões das cores vermelha, verde e azul (cores primárias). Desenvolveram-se então dois métodos para a produção de luz branca.

Um deles consiste em revestir um LED de alta potência emitindo na região da luz azul, ou até dos ultravioleta, com materiais fosfóricos que quando excitados por radiação dentro

destes comprimentos de onda produzem radiação numa região alargada do espectro, produzindo então luz branca. Dependendo das misturas de materiais fosfóricos utilizadas é possível produzir luz com diferentes temperaturas de cor e com diferentes índices de restituição cromática. Este processo de obtenção de luz branca é semelhante ao utilizado nas lâmpadas fluorescentes e é actualmente o método mais utilizado para produzir LEDs de luz branca para aplicações de iluminação.

O outro processo de obtenção de luz branca (RGB) consiste na utilização de três LEDs, um deles emitindo na região do espectro correspondente à luz vermelha, outro na região da luz verde e o último na região de luz azul. Deste modo é possível produzir a sensação de luz branca, ou até de qualquer outra cor. Variando o fluxo emitido pelos LEDs obtém-se uma mistura de radiação diferente e, por consequência, diferentes temperaturas de cor. Embora este método ofereça uma maior flexibilidade do que o anteriormente descrito, ele é pouco utilizado em aplicações de iluminação, uma vez que é mais caro e, para além disso, os LEDs sofrem uma degradação do fluxo luminoso emitido diferente ao longo da vida útil de acordo com a cor, e portanto, é difícil conservar as características da luz emitida.

Os LEDs utilizados para iluminação possuem normalmente no seu encapsulamento um sistema de lentes para que se consiga um maior ângulo de abertura em termos de emissão de luz.

As luminárias baseadas em tecnologia LED resultam normalmente de uma associação de vários LEDs e não do seu uso isolado. Segue-se a tabela 2.8 onde se encontram resumidas as principais características das luminárias de LEDs para iluminação pública.

Tabela 2.8 - Características das luminárias de LEDs

| Características das luminárias de LEDs | |
|--|--------------------------|
| Rendimento luminoso | De 60lm/W a 100lm/W |
| Temperatura de cor | De 3000°K a 6000°K |
| Índice de restituição cromática | Igual ou superior a 70 |
| Duração de vida média | De 30000h a 60000h |
| Tempo de arranque | Praticamente instantâneo |
| Luminância | - |
| Equipamento auxiliar | Fonte de alimentação DC |
| Posição de funcionamento | Qualquer |

2.6.4 - Motivação para o uso de LEDs em luminárias de iluminação pública

Os LEDs apresentam diversas vantagens quando comparados com as restantes fontes de luz tipicamente utilizadas em luminárias de iluminação pública (lâmpadas de descarga).

Devido às suas características de emissão de luz, os LEDs permitem obter uma elevada qualidade de iluminação, para as condições de iluminação pública, que assenta essencialmente no índice de restituição cromática, na temperatura de cor e no factor de utilização proporcionados por esta tecnologia.

Em termos de restituição de cores, os LEDs exibem tipicamente um índice de restituição cromático igual ou superior a 70, sendo somente iguados, ou superados, pelas lâmpadas de iodetos metálicos. Tal facto contribui para a qualidade da iluminação, uma vez que, um elevado IRC favorece a distinção das diferentes cores do meio circundante, proporcionando uma maior acuidade visual e uma maior sensação de segurança aos utilizadores do espaço iluminado.

No que diz respeito à temperatura de cor da luz emitida, os LEDs apresentam uma grande flexibilidade, permitindo obter praticamente qualquer cor de luz. No entanto, no caso dos LEDs para iluminação pública, têm sido utilizadas temperaturas de cor entre o branco quente e o branco frio, o que constitui um benefício em termos de qualidade de iluminação. De facto, constata-se que para as condições de luminância e iluminância tipicamente proporcionadas por instalações de iluminação pública, o olho humano opera no modo de visão mesópico para o qual a sua sensibilidade é mais elevada para a banda de radiação azul (cores frias), em que os LEDs “brancos” exibem uma forte componente de emissão de luz, como demonstrado nas figuras 2.13 e 2.14, o que favorece o desempenho da visão humana [18].

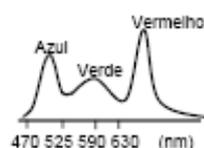


Figura 2.11 - Espectro de emissão LED branco (RGB) [17]

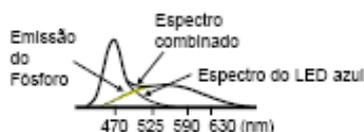


Figura 2.12 - Espectro de emissão LED branco (camada fosfórica) [17]

Relativamente a este tema, existe actualmente uma falha que dificulta a correcta comparação entre diferentes fontes de luz para uso em iluminação pública. Tal fica a dever-se ao facto de o fluxo luminoso emitido por uma fonte de luz ser medido em lúmens fotópicos quando no caso da iluminação pública o olho humano opera normalmente no modo de visão mesópica. Assim, a correcta comparação entre diferentes fontes de luz para as condições de iluminação pública deve ser feita em termos de lúmens mesópicos mas tal não é normalmente possível, uma vez que existe uma lacuna em termos de normas internacionais que definam um procedimento para que se possa avaliar fluxo emitido para o

modo de visão mesópico. Contudo, existem já alguns estudos que concluem que, para as condições de visão mesópica, os LEDs e as lâmpadas de iodetos metálicos, devido ao seu espectro de emissão de luz, apresentam um desempenho muito superior ao das lâmpadas de vapor de sódio de alta e baixa pressão, ao contrário do que acontece para as condições de visão fotópica.

O uso de LEDs permite também a obtenção de factores de utilização elevados. Isto fica a dever-se essencialmente às reduzidas dimensões dos LEDs e ao facto de radiarem apenas num dos hemisférios, o que permite dirigir o fluxo luminoso para o plano a iluminar por intermédio de lentes, de forma mais eficiente do que a conseguida com recurso a reflectores e/ou difusores para as restantes fontes de luz. Um factor de utilização elevado é normalmente sinónimo de três vantagens simultâneas:

- Baixo nível de encandeamento;
- Baixo nível de poluição luminosa;
- Necessidade de menor quantidade de fluxo luminoso emitido para obter os mesmos níveis de iluminação útil.

Resumidamente, a forte componente de emissão de luz na banda de radiação azul e o elevado factor de utilização característicos dos LEDs, fazem com que, apesar do rendimento luminoso das luminárias baseadas em LEDs ser igual e por vezes até inferior ao obtido com outras fontes de luz, se consiga, na prática, obter os mesmos níveis de iluminação útil recorrendo a uma potência eléctrica inferior. Isto constitui uma das principais motivações para o uso de LEDs em iluminação pública.

Existem ainda dois aspectos que importam referir relativamente à tecnologia LED. Por um lado, os LEDs, ao contrário das restantes fontes de luz utilizadas em iluminação pública, não conterem mercúrio na sua constituição, o que representa uma vantagem ecológica aquando do fim do ciclo de vida útil dos mesmos. Por outro lado, o período de vida útil dos LEDs é muito superior ao das restantes fontes de luz, o que implica menor quantidade de resíduos resultantes da sua substituição e, também, menor necessidade de manutenção.

Em suma, conclui-se que a utilização de LEDs em iluminação pública apresenta, face às restantes tecnologias utilizadas, claras vantagens energéticas e ecológicas.

É importante referir, que em termos económicos a utilização de LEDs, considerando horizontes temporais de curto prazo, poderá, por enquanto, não ser a opção mais vantajosa, tal como é referido por Tiago Samuel de Almeida Pereira Ribeiro na sua dissertação intitulada “Luminotecnia - Métodos de avaliação” dedicada à avaliação do ciclo de vida de sistemas de iluminação.

2.6.5 - Circuitos de alimentação de LEDs

Tal como os outros tipos de díodos, os LEDs possuem uma relação exponencial entre a tensão aplicada aos seus terminais e a corrente que os atravessa (característica V-I). Tal facto tem implicações na forma como estes são alimentados. Devido à sua característica V-I uma pequena variação na tensão de alimentação dos LEDs pode implicar uma forte variação na corrente que os atravessa o que pode levar à destruição dos LEDs. Por esta razão os LEDs são tipicamente alimentados a corrente constante, garantindo assim que a corrente não atinge em nenhuma circunstância valores que possam levar à destruição dos LEDs.

Existem vários métodos de obter fontes de corrente controlada, entre estes um dos mais usados na alimentação de LEDs é o que recorre a fontes comutadas largamente conhecido por PWM (*pulse-width modulation*, da nomenclatura inglesa). Este método permite um controlo preciso do valor de corrente fornecido, bem como a sua variação de forma simples, variando apenas a frequência de comutação, o que possibilita a regulação do fluxo luminoso emitido pelos LEDs.

Um dos problemas verificados nos LEDs de alta luminância actualmente comercializados prende-se com as elevadas densidades de corrente de operação que provocam o aumento da temperatura da junção p-n dos LEDs e, por consequência, a sua degradação e até mesmo a sua destruição se não forem tomadas medidas para contrariar o aquecimento. Para contrariar esses efeitos são implementados, nos módulos de LEDs, dissipadores e existem também fontes de alimentação para LEDs que possuem sensores de temperatura, o que permite reduzir a corrente de alimentação até que a temperatura desça para níveis adequados. Para além destes dois métodos, começaram a ser comercializados recentemente, em 2009, os chamados LEDs líquidos que consistem basicamente em circuitos de LEDs convencionais imersos num fluido de refrigeração. Os LEDs líquidos possuem boas características de dissipação e, para além disso, os fluidos normalmente utilizados melhoram também as propriedades ópticas dos LEDs. Têm sido fabricados até à data com encapsulamentos adequados à substituição de lâmpadas convencionais, podendo vir a revelar-se um forte concorrente para as lâmpadas fluorescentes compactas.

3 Dimensionamento de Candeeiros de Iluminação Pública

3.1 - Considerações gerais

O dimensionamento de candeeiros de iluminação pública requer, cada vez mais, o domínio de diferentes áreas do conhecimento, dadas as constantes evoluções de ordem técnica e as crescentes preocupações ao nível da eficiência energética, da qualidade da luz emitida e até mesmo de ordem estética do ponto de vista da integração das colunas com o meio circundante. No âmbito deste trabalho são propostos procedimentos para o dimensionamento de candeeiros de iluminação pública procurando, sempre que possível, fazer referência às normas aplicáveis. Uma sequência possível de procedimentos a seguir é proposta em seguida.

A primeira fase do processo de dimensionamento de um candeeiro de iluminação pública deve passar pela definição do campo de aplicação do mesmo (iluminação de vias pedonais, de circulação rápida, etc.), estipulando de acordo com o disposto na norma EN 13201-1 a classe de iluminação a que se pretende obedecer, ou pelo menos a família de classes adequadas ao tipo de aplicação. Definida a classe de iluminação a cumprir, deve ser feita a recolha dos requisitos de desempenho correspondentes à classe, de acordo com o estipulado em EN 13201-2. Esta primeira fase permite ao projectista tomar consciência das exigências que deve respeitar em termos do desempenho fotométrico da luminária.

Uma segunda fase de desenvolvimento deve comportar essencialmente um processo de tomada de decisões acerca do tipo de fonte luminosa a usar, do tipo de luminária e

respectivo sistema óptico a utilizar, bem como, da altura de montagem a adoptar, com vista a cumprir os requisitos definidos na fase anterior.

Numa terceira fase do processo de dimensionamento deve ser feito o desenho e um protótipo da luminária, tendo em vista a realização de ensaios fotométricos que possibilitem tirar conclusões acerca do desempenho da luminária de acordo com o definido na primeira fase. Durante esta fase deve ter-se em conta as prescrições presentes em EN-60598-2-3. A concepção do protótipo e a realização dos ensaios pode ser adiada, no caso de o desenho ser assistido por software de simulação que permita a obtenção de previsões fiáveis quanto ao desempenho da luminária.

Verificado o desempenho da luminária, em termos de iluminação, é possível passar a uma quarta fase do processo, dedicada ao desenho da coluna que servirá de suporte à luminária, à selecção dos materiais para a sua construção, e ao seu dimensionamento. Durante esta fase deve ter-se em conta a norma EN 40.

A quinta fase do processo deve ser dedicada ao dimensionamento eléctrico do candeeiro. Nesta fase é necessário ter em conta o tipo de fonte luminosa utilizado e das potências envolvidas, para que seja possível identificar e dimensionar os equipamentos eléctricos necessários ao seu correcto funcionamento. Nomeadamente, nesta fase deve ainda decidir-se se se pretende alimentar a coluna a partir da rede eléctrica ou com recurso a módulos fotovoltaicos, que permitam o seu funcionamento autónomo. É de salientar que apesar de o funcionamento autónomo, com recurso a módulos fotovoltaicos, apresentar, à primeira vista, claras vantagens, nem sempre é viável, do ponto de vista económico, quando as potências envolvidas são elevadas, pelo que é importante fazer uma avaliação de custos antes de optar por este tipo de solução.

Durante a fase de dimensionamento eléctrico é necessário ter em conta a norma EN 60598-2-3, bem como outras normas aplicáveis ao tipo de equipamentos utilizados, entre as quais se encontram: a norma EN 62035 referente a lâmpadas de descarga, a norma EN 60927 relativa a ignitores para lâmpadas de descarga e a norma EN 61730 relativa a módulos fotovoltaicos. As normas relativas aos equipamentos atrás referidas servem apenas, na maioria das vezes, para selecção de equipamentos certificados, uma vez que, normalmente, a concepção destes equipamentos não é da responsabilidade do projectista do candeeiro de iluminação pública.

A sexta e última fase do processo de dimensionamento deve ser dedicada à construção de um protótipo do produto final, para realização de testes de conformidade com as normas aplicáveis e para efeitos de certificação do produto.

A divisão e sequência acima descritas representam apenas uma opção entre várias possíveis. Na prática, muitas vezes, as fases de dimensionamento ocorrem por ordem diferente, ou até em paralelo. Um exemplo disso, que ocorre frequentemente, é o caso em que o processo de desenvolvimento do candeeiro de iluminação pública surge a partir de um

desenho do produto final. Quando assim é, é importante que o autor do desenho tenha noções técnicas acerca dos sistemas que integrarão o candeeiro, ou então, que esteja disposto a introduzir alterações ao desenho inicial se tal for necessário para o cumprimento dos requisitos técnicos, caso contrário, o desempenho do candeeiro poderá ficar comprometido.

3.2 - Dimensionamento luminotécnico

A previsão rigorosa do desempenho de uma configuração escolhida para uma luminária é uma tarefa árdua, se for feita analiticamente, uma vez que a previsão da distribuição da luz pela superfície a iluminar obriga à realização de cálculos luminotécnicos para um grande número de pontos, o que é laborioso, visto que os fenómenos de reflexão, difusão e refração da luz são difíceis de modelar. Por estas razões, um estudo aprofundado de uma luminária, em termos luminotécnicos, só é possível através de testes em laboratório luminotécnico especializado, ou através do uso de *software* de simulação adequado. Contudo, de um modo aproximado, recorrendo a cálculos simples, é possível determinar o fluxo luminoso que a fonte de luz a utilizar numa luminária deve emitir para que se consiga obter o nível de iluminação desejado no plano que se pretende iluminar. Este cálculo fornece, apenas, informações sobre o fluxo luminoso necessário e não sobre a distribuição fotométrica da luminária. Os princípios de cálculo a aplicar diferem consoante a composição do sistema óptico e o tipo fonte de luz utilizada. Tipicamente, as diferenças são significativas entre as luminárias baseadas em LEDs e as luminárias baseadas em lâmpadas de descarga, pelo que são apresentados neste trabalho princípios de cálculo genéricos para estas duas situações.

3.2.1 Dimensionamento luminotécnico de luminárias baseadas em LEDs

Para determinar o número de LEDs a utilizar para garantir um determinado nível de iluminação, num plano a iluminar, é necessário reunir informação diversa, nomeadamente a seguinte:

- A folha de características do modelo de LEDs que se pretende utilizar;
- O fluxo luminoso que a luminária deve emitir ou, alternativamente, área a iluminar e iluminância média que se deseja garantir;

- O tipo de sistema óptico a utilizar e respectivos rendimentos ópticos (admite-se, neste caso, que o sistema óptico é constituído por lentes e com uma tampa da luminária em vidro ou plástico, não existindo reflectores);
- Temperatura ambiente máxima sob a qual a luminária funcionará em condições normais;

Tendo em conta as informações recolhidas sobre as características dos LEDs a utilizar e sobre a temperatura ambiente máxima de operação, pode, então, ser escolhido um valor para a corrente directa a aplicar aos LEDs. Aquando desta tomada de decisão, é conveniente que o projectista tenha presente as limitações em termos de corrente, indicadas pelo fabricante dos LEDs, de acordo com a temperatura de operação. Deve, também, ser tido em conta que embora o uso de correntes directas mais elevadas se traduza numa redução do número de LEDs necessários (uma vez que aumenta o fluxo luminoso emitido por cada unidade), o aumento do valor da corrente provoca uma diminuição do rendimento luminoso e, para a mesma temperatura de junção, pode ser também sinónimo de uma degradação mais rápida do fluxo luminoso emitido. Assim, o projectista deve escolher de forma criteriosa o valor de corrente a utilizar, sendo que a vantagem económica resultante do uso de menor número de LEDs pode ficar comprometida pela perda de eficiência do sistema, pela diminuição do tempo de vida útil do sistema ou, pelo aumento de custos do sistema relativo à necessidade de uma fonte de alimentação (*driver*) mais potente, e/ou ao uso de um sistema de dissipação de calor mais eficiente, para que seja possível garantir uma temperatura de junção mais baixa e, consequentemente atingir o tempo de vida útil desejado [19].

Seleccionado o valor para corrente directa a utilizar e, admitindo que as condições de operação não são iguais às condições de teste, às quais se referem os dados presentes na folha de características dos LEDs, é necessário calcular a temperatura da junção dos LEDs correspondente ao valor da corrente directa a aplicar e da temperatura ambiente prevista, para que se possam fazer as devidas correcções no que diz respeito ao fluxo luminoso emitido. A temperatura de junção pode ser calculada pela expressão:

$$T_j = T_a + R\theta_{j-a} \times I_d \times V_d \quad (3.1)$$

Sendo, T_j a temperatura da junção do LED e T_a a temperatura ambiente esperada, ambas em °C; $R\theta_{j-a}$ a resistência térmica entre a junção e o ambiente, em °C/W; I_d e V_d a corrente e tensão directas a aplicar ao LED, em A e V, respectivamente.

Calculada a temperatura da junção é possível, por consulta da folha de características dos LEDs, obter o valor do factor de correcção térmico para o fluxo luminoso emitido, que neste trabalho é representado por $K_{\text{térmico}}$.

Se a corrente directa a aplicar aos LEDs for diferente da corrente de teste, é necessário recolher da folha de características o valor do factor de correcção devido à corrente, representado neste trabalho por K_{corrente} .

Finalmente, o número de LEDs necessários para atingir um determinado nível iluminação, pode ser calculado pela expressão:

$$n^{\circ} \text{ LEDs} = \frac{F_{\text{pretendido}}}{F_{\text{unitário}} \times K_{\text{térmico}} \times K_{\text{corrente}} \times K_{\text{utilização}} \times \eta_{\text{óptico}}} \quad (3.2)$$

Sendo, $F_{\text{pretendido}}$ o fluxo luminoso que a luminária deve emitir e $F_{\text{unitário}}$ o fluxo luminoso emitido por cada LED, ambos expressos em lúmen; $\eta_{\text{óptico}}$ o rendimento do sistema óptico da luminária e $K_{\text{utilização}}$ o factor de utilização previsto para a luminária, ambos expressos em %.

3.2.1 Dimensionamento luminotécnico de luminárias baseadas em lâmpadas de descarga

Para as luminárias baseadas em lâmpadas de descarga, é também possível determinar o fluxo luminoso que as lâmpadas devem emitir para que se obtenha, à saída da luminária, o valor de fluxo luminoso necessário para uma aplicação em concreto.

Neste caso, é necessário o conhecimento das características do sistema óptico a utilizar (rendimento óptico de todos os componentes e geometria do reflector) e o valor de fluxo luminoso que se pretende atingir ou da área a iluminar e da respectiva iluminância média que se deseja obter. Devem também ser conhecidas, para o tipo de lâmpada a utilizar, as características de degradação de fluxo luminoso ao longo do seu tempo de vida útil, sendo que neste caso a degradação do fluxo luminoso pode ser bastante mais significativa do que para o caso dos LED.

As maiores dificuldades relativamente ao cálculo do fluxo luminoso que a lâmpada deve emitir, residem, tipicamente, na determinação da percentagem de fluxo que é reflectida, na avaliação do fluxo que se possa “perder” dentro da própria luminária e, na estimativa do factor de utilização que a luminária virá a apresentar. As dificuldades serão tanto maiores, quanto menos regular for a geometria do sistema óptico, em particular, do reflector.

Determinados todos estes parâmetros, o fluxo luminoso necessário pode ser calculado por:

$$F_{\text{lamp}} = \frac{F_{\text{pretendido}}}{(\%F_{\text{reflectido}} \times \eta_{\text{reflector}} + \%F_{\text{directo}}) \times \eta_{\text{tampa}} \times K_{\text{degF}} \times K_{\text{utilização}}} \quad (3.3)$$

,em que, F_{lamp} representa é o fluxo luminoso que a lâmpada deve emitir, em lúmen. $\%F_{\text{reflectido}}$ e $\%F_{\text{directo}}$, ambos expressos em %, representam as quantidades de fluxo luminoso reflectido e directo, respectivamente. $\eta_{\text{reflector}}$ e η_{tampa} , expressos em %, simbolizam os rendimentos ópticos do reflector e da tampa da luminária. K_{degF} e $K_{\text{utilização}}$, em %, representam os factores de degradação do fluxo luminoso e de utilização estimados para a luminária.

3.3 - Dimensionamento eléctrico

3.3.1 -Dimensionamento de candeeiros autónomos

Um candeeiro de iluminação pública autónomo, alimentado por módulos fotovoltaicos mais não é do que um sistema fotovoltaico isolado. No entanto, o seu projecto apresenta normalmente duas dificuldades adicionais. A primeira prende-se com o facto de a área disponível para aplicação de módulos fotovoltaicos ser bastante reduzida. A segunda está relacionada com o facto de o sistema não poder ser previsto apenas para o funcionamento num determinado local, uma vez que, tipicamente, os candeeiros de iluminação pública são fabricados com o intuito de serem comercializados pelo menos em todo o território nacional, estando por isso sujeitos a exposições solares distintas.

Para que se possa iniciar o dimensionamento eléctrico, é necessário o conhecimento das características da carga a alimentar, potência absorvida, tensão de alimentação e características da onda, tempo de funcionamento diário. Conhecidas essas características é possível definir os componentes necessários, como por exemplo reguladores de carga, inversores, entre outros.

A recolha dos dados acima enunciados permite, por um lado o cálculo da energia diária absorvida pela carga e, por outro lado estimar rendimentos típicos para cada tipo de equipamento que deverá integrar o sistema.

A energia activa diária absorvida pela carga pode ser calculada pela expressão $W_D = P_c \times t_f$, em que P_c representa a potência nominal absorvida pela carga (luminária) e t_f representa o tempo diário de funcionamento da carga.

É de salientar que, num candeeiro de iluminação pública, devido à natureza das funções que o mesmo desempenha, o tempo de funcionamento diário da carga (luminária) varia ao

longo do ano, atingindo o seu máximo no Solstício de Inverno. Por tal facto é recomendável utilizar, para efeitos de dimensionamento, como valor do tempo de funcionamento diário, o tempo médio de duração da noite no mês em que ocorre o Solstício de Inverno, uma vez que corresponde ao caso mais desfavorável.

O passo seguinte do dimensionamento passa, pela escolha de um valor para a inclinação do gerador fotovoltaico. Nos candeeiros de iluminação pública, não se justifica normalmente o uso de sistemas de seguimento solar, pelo facto de se tratar de sistemas fotovoltaicos de baixa potência. Assim sendo, e tratando-se de sistemas isolados, interessa fundamentalmente maximizar a energia produzida nos meses de menor exposição solar. Essa maximização pode tornar-se difícil, atendendo a que os candeeiros de iluminação pública terão de ser previstos para funcionarem numa gama de latitudes diferentes e não numa latitude fixa, deve então considerar-se a latitude da localização mais desfavorável, isto é, com menor exposição solar. A localização mais desfavorável pode ser determinada recorrendo a atlas solares que indiquem os valores médios de irradiação recebidos pela superfície da Terra no território em que se pretende comercializar o candeeiro. Determinada a latitude do local mais desfavorável, a inclinação que maximiza a produção nos meses de menor exposição solar, pode ser considerada, com boa aproximação, como um ângulo calculado pela expressão, ângulo de inclinação = latitude+20°.

Escolhido o ângulo de inclinação, podem ser obtidos, por cálculo, ou mais facilmente recorrendo, por exemplo, à página da UE (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>), os valores de irradiação média mensal, para a localização mais desfavorável segundo a inclinação do gerador fotovoltaico. Com os dados obtidos é possível calcular, para o valor de irradiação mais baixo (caso mais desfavorável), o número de horas de pico de Sol (HPS), ou seja o número de horas equivalente a uma irradiação de 1000W/m², pela expressão:

$$HPS = \frac{H_t}{1000} \quad (3.4)$$

,em que H_t representa a radiância total média diária em (Wh/m²/dia).

Determinado o valor de HPS, e estimando os rendimentos energéticos dos diferentes componentes do sistema, inclusive das baterias de acumuladores (cujo tipo deve ser escolhido nesta fase), é possível determinar o valor mínimo para a potência do gerador fotovoltaico a utilizar. Existem valores típicos para os rendimentos energéticos de cada tipo de componentes como os que se encontram na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Rendimentos típicos de componentes para sistemas fotovoltaicos isolados

| Equipamento | η (rendimento energético) |
|--------------------------|--------------------------------------|
| Regulador | Cerca de 95% |
| Inversor | Cerca de 95% |
| Conversores CC/CC | 75% a 95% (dependendo da tecnologia) |
| Baterias de acumuladores | 60% a 90% (dependendo da tecnologia) |
| Condutores | 99% (para comprimentos pequenos) |

A potência mínima do gerador fotovoltaico a utilizar pode ser calculada pela expressão seguinte:

$$P_{\min FV} = \frac{W_D}{\left(\prod_{i=1}^n \eta_i\right) \times HPS} \quad (3.5)$$

,em que η_i representa o rendimento dos diferentes componentes a utilizar no sistema, em (%).

Tendo em conta o valor encontrado para a potência mínima do gerador fotovoltaico, pode ser seleccionado um módulo que apresente uma potência igual ou superior. É de salientar que em aplicações de potência elevada, muitas vezes o gerador é formado pela associação de módulos em serie e em paralelo, mas tal não é comum nos candeeiros de iluminação pública, uma vez que é uma aplicação que envolve potências relativamente baixas.

O passo seguinte do dimensionamento pode ser dedicado à determinação da capacidade da bateria (ou banco de baterias) de acumuladores a utilizar.

Neste passo é necessário ter em consideração a tecnologia a utilizar, que condiciona o valor da profundidade máxima de descarga e o valor do rendimento.

O projectista deve decidir qual o valor da tensão nominal da bateria (ou banco de baterias) - normalmente igual à tensão nominal do gerador - e qual o número de dias de autonomia desejado para o sistema. Uma vez tomadas estas decisões, a capacidade mínima das baterias a instalar, em (Ah) pode ser determinada pela expressão:

$$C_{\min bat} = \frac{W_D \times Autonomia}{U_{bat} \times PD_{\max} \times \eta_{bat} \times \prod_{i=1}^n \eta_{i jus}} \quad (3.6)$$

,sendo que U_{bat} representa a tensão nominal da bateria (ou do banco de baterias) expresso em (V), PD_{\max} é a profundidade máxima de descarga, η_{bat} o rendimento da bateria e $\eta_{i jus}$ o

rendimento dos equipamentos a jusante da bateria (ou do banco de baterias) expressos em (%). A autonomia é expressa em dias.

Posto isto, é possível escolher um modelo concreto que apresente uma capacidade nominal igual ou superior à capacidade mínima encontrada pela equação (3.3). No caso de se recorrer a um banco de baterias é também possível determinar o número de unidades a utilizar.

O passo seguinte pode ser dedicado ao dimensionamento dos equipamentos electrónicos necessários, nomeadamente as suas grandezas características, como por exemplo a sua potência, corrente ou tensão nominais.

Uma vez que os candeeiros de iluminação pública autónomos alimentados por painéis fotovoltaicos são sistemas isolados, deverão ter sempre um regulador que controle a carga das baterias. Com o objectivo de otimizar o funcionamento do sistema esse regulador deve ser capaz de situar o ponto de operação gerador fotovoltaico no ponto de potência máxima (regulador MPPT). Nestas condições, e tendo em conta o tipo de baterias e de gerador fotovoltaico a utilizar é possível escolher o regulador de carga. O regulador deve apresentar na sua entrada (para ligação ao gerador fotovoltaico) valores de corrente e de tensão nominais iguais ou superiores aos valores de corrente e de tensão correspondentes ao ponto de potência máxima do gerador fotovoltaico. Por outro lado, na sua saída (para ligação à bateria) o regulador deve garantir os níveis de tensão e de corrente necessários para que seja possível carregar convenientemente a bateria, isto é, aquele deve ter a capacidade de implementar um método de carga adequado ao tipo de bateria escolhida.

Se o sistema se destinar à alimentação de uma luminária de LEDs é necessário prever um circuito de alimentação para os LEDs que forneça à sua saída corrente constante. Assim, deve ser escolhido um equipamento que tenha na sua entrada uma tensão nominal igual à tensão nominal do sistema a montante. Para além desta característica, é necessário que o equipamento tenha uma potência nominal igual ou superior à potência da carga a alimentar e uma corrente de saída igual à corrente nominal do módulo de LEDs. Se o dispositivo permitir a regulação da corrente de saída, com o intuito de regular o fluxo luminoso emitido pela luminária, deve ter sempre um limite máximo de corrente de saída inferior à corrente máxima admissível do módulo de LEDs.

Se, por outro lado, o sistema se destinar à alimentação de uma luminária que necessite de alimentação em corrente alternada, é necessário utilizar um inversor, ou seja, um conversor DC/AC, que tenha uma tensão nominal de entrada igual à tensão nominal do sistema em corrente contínua, uma potência nominal igual à potência da luminária e uma tensão nominal de saída, em corrente alternada, igual à da luminária, em valor eficaz e em frequência (230V a 50Hz, para o caso europeu).

Seleccionados todos os equipamentos que integrarão o sistema, é necessário o dimensionamento dos condutores eléctricos que farão a interligação de todos os

equipamentos, bem como o dimensionamento de todos os aparelhos de corte e protecção, quando aplicáveis. Em seguida são apresentados princípios de cálculo para dimensionamento dos condutores e aparelhos de corte e protecção.

- Dimensionamento dos condutores de interligação entre o gerador fotovoltaico e o regulador:

De acordo com o estipulado na norma IEC 60346-7-712, a corrente máxima admissível em regime permanente dos condutores (I_z) deve respeitar a condição:

$$I_z \geq 1,25 \times I_{CC (STC)} \quad (3.7)$$

,em que $I_{CC(STC)}$ representa a corrente de curto-circuito do gerador fotovoltaico para condições STC.

Quanto à temperatura admissível, a mesma norma indica que os condutores deverão suportar uma temperatura superior a 70° C.

No que diz respeito à tensão nominal de funcionamento dos condutores, estes deverão ser previstos para uma tensão nominal igual ou superior à tensão de circuito aberto do gerador fotovoltaico para a temperatura de -10° C. Essa tensão de circuito aberto pode ser obtida através da expressão seguinte:

$$U_{CA(-10^\circ)} = U_{CA(STC)} \times (1 + \beta_u \times \Delta T) \quad (3.8)$$

,onde $U_{CA(STC)}$ representa a tensão de circuito aberto do gerador fotovoltaico para condições STC em (V), β_u representa o coeficiente de variação térmica da temperatura do gerador, expresso em (%/°C) e ΔT representa a variação da temperatura em (°C).

O dimensionamento dos condutores deve, ainda, ser feito tendo em conta as quedas de tensão admissíveis. Tipicamente, em sistemas fotovoltaicos isolados, as quedas de tensão admitidas vão até aos 3% da tensão nominal. No entanto, no caso presente, visto que no caso dos candeeiros de iluminação pública autónomos os comprimentos dos condutores nunca são muito elevados, poderemos estipular como valor máximo para a queda de tensão, um valor de 1% da tensão nominal, ou mesmo inferior.

Definido o valor máximo admissível para a queda de tensão, a secção mínima dos condutores pode ser calculada pela expressão:

$$s_{\min} = \frac{2 \times l \times \rho_{(T_{\max})} \times I_{MPP}}{\Delta U_{MPP}} \quad (3.9)$$

, em que l é o comprimento dos condutores em (m), $\rho_{(T_{\max})}$ é a resistividade eléctrica do material condutor para a temperatura máxima admissível nos condutores expressa em ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$), I_{MPP} é a corrente correspondente ao ponto de potência máxima do gerador fotovoltaico em (A) e, por último, ΔU_{MPP} é a queda de tensão máxima considerada, expressa em (V) e calculada em relação à tensão do ponto de potência máxima do gerador fotovoltaico.

- Dimensionamento dos condutores de interligação entre o regulador e as baterias:

Os condutores de corrente contínua de interligação entre o regulador de carga e as baterias poderão ter de suportar uma corrente de serviço superior à dos condutores que interligam o gerador fotovoltaico ao regulador de carga, uma vez que, tipicamente a tensão de carga das baterias terá um valor inferior ao valor da tensão para o ponto de potência máxima do gerador fotovoltaico. Assim sendo, é importante verificar se a corrente de serviço, para a situação mais desfavorável (durante o início da carga das baterias) não excede o valor da corrente máxima admissível dos condutores seleccionados para realizar a interligação entre o gerador fotovoltaico e o regulador de carga. A corrente máxima de serviço ($I_{s \max}$) nestas condições pode ser calculada pela expressão:

$$I_{s \max} = \frac{P_{MPP}}{U_{\min \text{ carga}}} \quad (3.10)$$

Sendo que, P_{MPP} representa a potência máxima do gerador fotovoltaico em (W) e $U_{\min \text{ carga}}$ representa a tensão mínima aplicada à bateria durante o processo de carga em (V).

Relativamente à tensão nominal e à temperatura admissível, os critérios de dimensionamento aplicáveis são os mesmos que no caso dos condutores de interligação entre o gerador fotovoltaico e o regulador de carga; excepção para o valor de tensão a considerar, o qual, neste caso, deverá ser igual à tensão máxima de carga das baterias.

A secção dos condutores pode ser calculada, da mesma forma, no que se refere à queda de tensão máxima admissível, modificando apenas os valores de corrente e de variação de tensão na expressão (3.6).

- Dimensionamento dos condutores de interligação entre as baterias e o circuito de alimentação dos LEDs ou o inversor:

O dimensionamento destes condutores pode ser feito recorrendo aos mesmos princípios de cálculo apresentados para o caso anterior (condutores de interligação entre o regulador e as baterias), substituindo os valores da corrente de serviço e da tensão nominal de funcionamento pelos valores adequados. A corrente de serviço máxima a considerar pode ser calculada pela expressão:

$$I_{s\text{ máx}} = \frac{P_{n\text{ carga}}}{U_{\text{min descarga}}} \quad (3.11)$$

, em que $P_{n\text{ carga}}$ representa a potência nominal da carga em (W) e $U_{\text{min descarga}}$ representa a tensão mínima aos terminais da bateria durante o processo de descarga em (V).

- Dimensionamento dos condutores de interligação entre o inversor e a luminária:

Não existem, ainda, normas específicas que estabeleçam condições para o dimensionamento de condutores para este tipo de aplicação, pelo que, neste trabalho, são admitidos, para efeitos de dimensionamento, os mesmos princípios de cálculo aplicáveis aos condutores para candeeiros com ligação à rede eléctrica de distribuição. Desta forma, para o dimensionamento destes condutores deverão ser usados os princípios de cálculo que são apresentados na subsecção seguinte (3.3.2 - Dimensionamento de Candeeiros com Ligação à Rede de Distribuição).

- Protecção contra curto-circuitos e choques eléctricos em corrente contínua:

Neste tipo de candeeiros, tendo em conta que as potências envolvidas são baixas, existe todo o interesse, do ponto de vista de protecção contra choques eléctricos, em utilizar tensões nominais abaixo do valor de TRS - Tensão Reduzida de Segurança (120V para corrente contínua). Assim sendo, a protecção contra choques eléctricos em corrente contínua, não é contemplada neste trabalho, uma vez que a utilização de

tensões dentro daquela gama, é só por si só, garantia de uma adequada protecção de pessoas.

Num candeeiro autónomo, de entre os circuitos alimentados em corrente contínua, devem ser protegidos contra curto-circuitos, os condutores directamente ligados à bateria (ou baterias), sendo que esta é a única fonte possível de correntes de curto-circuito elevadas. Para assegurar a protecção contra curto-circuitos desses condutores, é necessário conhecer directamente o valor da corrente de curto-circuito da bateria ou, pelo menos, o valor da resistência interna da bateria. Neste último caso, a corrente de curto-circuito pode ser calculada pela expressão $I_{cc} = U_{bat} / R_{bat}$. É importante referir que a resistência interna das baterias aumenta ao longo do seu tempo de vida útil e varia de acordo com o estado de carga das mesmas. Tipicamente, o valor fornecido pelo fabricante refere-se a baterias novas, totalmente carregadas, pelo que, em rigor, o valor da resistência interna a utilizar no cálculo da corrente de curto-circuito deve ser corrigida de forma a obter a corrente de curto-circuito mínima. No entanto, esta pode ser uma tarefa árdua, pelo facto de não se conhecerem as características de variação da resistência. Felizmente que, uma vez que as correntes de serviço são (normalmente) muito inferiores à corrente de curto-circuito mínima, isso possibilita o uso de dispositivos de protecção de calibres baixos, com um tempo de actuação, seguramente, muito curto face ao tempo de fadiga térmica dos condutores.

Posto isto, e conhecido (ou calculado) o valor aproximado da corrente de curto-circuito, deve escolher-se um fusível (adequado para corrente contínua), a colocar, junto à saída da bateria, que cumpra simultaneamente as seguintes condições:

- Ter um poder de corte superior à corrente de curto-circuito da bateria;
- Ter um calibre superior à corrente de serviço do circuito em que será aplicado e inferior à corrente máxima admissível nos condutores desse circuito;
- Ter um tempo de actuação inferior ao tempo de fadiga térmica (t_{ft}) dos condutores, a ser calculado pela expressão:

$$t_{ft} = \left(k \cdot \frac{s}{I_{cc}} \right)^2 \quad (3.12)$$

Em que k é uma constante característica do condutor, s é a secção recta do condutor em (mm^2) e I_{cc} representa a corrente de curto-circuito em (A).

3.3.2 - Dimensionamento de candeeiros com ligação à rede de distribuição

Os condutores para alimentação de candeeiros ligados a uma rede de iluminação pública, conforme o estipulado no artigo 70º do Regulamento de Segurança de Redes de Distribuição de Energia Eléctrica em Baixa Tensão, deverão ser isolados, ter uma secção mínima de 1,5 (mm²), se o material condutor for o cobre, e uma tensão nominal não inferior a 450V/750V.

Deverá ainda existir na coluna de iluminação uma portinhola, a uma distância não inferior a 0,5 m do solo, para realização das ligações eléctricas e para realização da protecção dos condutores por fusíveis do tipo gG de bases cilíndricas.

Estes condutores, para além de obedecer às condições acima referidas, devem apresentar uma queda de tensão inferior a 1% e, obviamente, apresentar uma corrente máxima admissível igual ou superior à corrente de serviço.

A corrente de serviço (I_s) pode ser calculada, tendo em conta a potência nominal da luminária e o factor potência, pela expressão:

$$I_s = \frac{P_n \text{ carga}}{U_n \times fp} \quad (3.13)$$

Em que $P_n \text{ carga}$ é a potência nominal da luminária em (W) e U_n representa a tensão nominal de alimentação em (V) e fp representa o factor potência.

Calculada a corrente de serviço é possível determinar a secção mínima dos condutores de modo a que estes não excedam o valor máximo estipulado para as quedas de tensão. Para o efeito pode ser usada a expressão 3.9 substituindo apenas pelos valores adequados. Note-se que esta expressão conduz a valores aproximados, uma vez que em corrente alternada para obter valores rigorosos é necessário ter em conta também a reactância dos condutores, contudo esta é muito baixa em relação à resistência, nas condições aqui consideradas, e por isso a aproximação é válida.

No caso de existirem ignitores, os condutores de ligação entre estes e as lâmpadas devem, para além de obedecer às condições já referidas, possuir um isolamento que suporte uma tensão superior ao pico de tensão gerado pelo ignitor.

- Protecção contra curto-circuitos e choques eléctricos em corrente alternada:

A protecção contra curto-circuitos e choques eléctricos será assegurada, exclusivamente, por fusíveis do tipo gG, de alto poder de corte. No âmbito da protecção contra choques eléctricos, o esquema a considerar deverá ser o Sistema

TN-C, sendo o utilizado na rede eléctrica de distribuição em baixa tensão. Deste modo, todas as massas condutoras do candeeiro devem ser ligadas ao condutor de neutro, que por sua vez deve ser ligado á terra, assegurando que qualquer contacto entre o condutor de fase e uma massa condutora dê origem a um curto-circuito fase-neutro, a ser eliminado de forma eficaz, num tempo suficientemente curto, pelo fusível existente na portinhola. Para selecção do fusível e verificação do seu tempo de actuação, é necessário o conhecimento do valor da corrente de curto-circuito mínimo que pode ocorrer; no entanto, esse valor não pode ser calculado com rigor, uma vez que as características da rede a montante são desconhecidas. Assim sendo, a corrente de de curto-circuito mínima fase-neutro pode ser estimada pela expressão aproximada seguinte:

$$I_{cc\ min}^{FN} = \frac{0,8 \times U_{n\ rede}}{R_{N(Tmáx)} + R_{F(Tmáx)}} \quad (3.14)$$

Sendo $R_{N(Tmáx)}$ e $R_{F(Tmáx)}$ as resistências em (Ω), calculadas para a temperatura máxima admissível, em regime de curto-circuito, do condutor de neutro e fase, respectivamente.

Estimado o valor da corrente de curto-circuito, é possível, então, verificar todas as condições para a escolha do fusível a utilizar, ou seja: garantir que o seu calibre é superior á corrente de serviço dos condutores a proteger; garantir um tempo de actuação inferior ao tempo de fadiga térmica dos condutores (e nunca superior a cinco segundos) recorrendo à expressão 3.12.

- Considerações adicionais para colunas ligadas à rede, com luminária de LEDs:

Se o candeeiro integrar uma luminária baseada em LEDs, é necessário assegurar a sua alimentação em corrente contínua, recorrendo a um rectificador. Tal rectificador deverá ter uma tensão nominal de entrada igual à tensão da rede de alimentação e a saída com corrente controlada com um valor adequado às características dos LEDs.

Os condutores de interligação entre o rectificador e a luminária de LEDs podem ser dimensionados de acordo com os princípios de cálculo apresentados atrás para corrente contínua.

4 Avaliação do dimensionamento das soluções da Larus

A Larus, proponente do tema deste trabalho, é uma empresa de *design* urbano que tem em mãos um projecto de desenvolvimento de candeeiros de iluminação pública autónomos, com o nome “Coluna Solar”, destinam-se a assegurar a iluminação de jardins, vias pedonais e ciclovias.

A “Coluna Solar” é um candeeiro alimentado por um módulo fotovoltaico, cuja luminária se baseia na tecnologia LED e trata-se de um projecto que se encontra ainda na fase de final de desenvolvimento.

Paralelamente, a Larus possui entre os seus produtos, um candeeiro de iluminação pública com ligação à rede de distribuição de energia eléctrica, com o nome “Coluna 17°”. Este candeeiro tem, também, como propósito a iluminação de jardins e a sua constituição assenta nas tecnologias convencionalmente utilizadas em iluminação pública.

Nas secções seguintes são apresentadas as características, e avaliadas estas soluções de iluminação, tendo em conta as considerações de dimensionamento de candeeiros de iluminação pública abordadas no capítulo 3 do presente trabalho.

4.1 - Avaliação “Coluna Solar”



Figura 4.1 - Pormenor Coluna Solar

A presente secção é dedicada à avaliação da solução “Coluna Solar” da Larus. Nesse sentido, segue-se a descrição das características de cada um dos componentes deste candeeiro.

4.1.1 - Apresentação das características do candeeiro “Coluna Solar”

- Módulo fotovoltaico:

Tabela 4.1 - Características do módulo fotovoltaico “Coluna Solar”

| | |
|--------------------------------------|------------------------|
| Tecnologia de conversão | Silício policristalino |
| Potência máxima | 45 W |
| Tensão nominal | 12V |
| Corrente de curto-circuito | 2,79 A |
| Tensão em circuito aberto | 22 V |
| Corrente no ponto de potência máxima | 2,56 A |
| Tensão no ponto de potência máxima | 17,6 V |
| Coefficiente de variação da tensão | -85 a -65 mV/°C |
| NOCT | 45°C |

- Baterias:

Tabela 4.2 - Características das baterias “Coluna Solar”

| | |
|---------------------------------|--------------|
| Tecnologia | VLRA (gel) |
| Capacidade | 15 Ah |
| Tensão nominal | 12V |
| Corrente de curto-circuito | Indisponível |
| Profundidade máxima de descarga | 70 % |
| Rendimento previsto | 70% |

- Luminária de LEDs:

Tabela 4.3 - Características luminária de LEDs “Coluna Solar”

| | |
|--------------------|--------|
| Potência nominal | 10,5 W |
| Corrente nominal | 350 mA |
| Tensão nominal | 30 V |
| Fluxo luminoso | 843 lm |
| Rendimento óptico | 80% |
| Temperatura da cor | 5300 K |
| IRC | 70 |
| Índice IP | IP 66 |

- Controlador do sistema (regulador MPPT; fonte de alimentação dos LEDs):

Este equipamento encontra-se ainda em desenvolvimento por uma empresa fornecedora da Larus, pelo que as características indicadas na tabela 4.4 baseiam-se nas especificações mínimas impostas para o dimensionamento do mesmo.

Tabela 4.4 - Características do controlador “Coluna Solar”

| | |
|--|--------|
| Eficiência do regulador MPPT | 90% |
| Rendimento da fonte alimentação dos LEDs | 80% |
| Tensão máxima de carga das baterias | 29,4 V |
| Corrente máxima de alimentação dos LEDs | 350 mA |

•Condutores:

Os condutores não se encontram ainda dimensionados, sendo esta tarefa da responsabilidade da empresa que está a desenvolver o controlador do sistema. Pelos factos acima referidos os condutores não serão avaliados neste trabalho.

Descritas as características do equipamento utilizado, é necessário ainda referir que:

- o candeeiro “Coluna Solar” utiliza duas baterias em série com as características presentes na tabela 4.2;
- está previsto o funcionamento da luminária de LEDs durante cinco horas (para os meses de Inverno) à potência máxima, operando no restante tempo de funcionamento a metade da sua potência nominal reduzindo o fluxo emitido para cerca de metade;
- a comercialização do candeeiro “Coluna Solar” está prevista, por enquanto, para Portugal continental, sendo a inclinação do módulo fotovoltaico fixa e igual a 60° e a autonomia mínima das baterias de dois dias.

4.1.2 - Avaliação do dimensionamento luminotécnico do candeeiro “Coluna Solar”

A presente subsecção é dedicada à verificação do dimensionamento da luminária utilizada na “Coluna Solar” e à avaliação do seu desempenho fotométrico. Nesse sentido, são apresentadas nesta secção: as características dos LEDs utilizados, da luminária e os resultados da simulação efectuada no *software* de cálculo luminotécnico DIALux, para um caso de típico de aplicação da “Coluna Solar”.

Na luminária que integra a “Coluna Solar” são utilizados dez LEDs da gama “LUXEON® Rebel ES” da Philips Lumileds, cujas características relevantes são em seguida apresentadas.

Tabela 4.5 - Características dos LEDs utilizados na “Coluna Solar”

| | |
|--|----------------|
| Referência | LXLW-PWCI-0100 |
| Fluxo luminoso mínimo | 105 lm |
| Corrente directa (I_d) | 350 mA |
| Tensão directa (V_d) | 3 V |
| Temperatura do ponto de referência (T_{ref}) | 25°C |
| Resistência térmica entre o ponto de referência e o ambiente ($R\theta_{ref,a}$) | 6 W/°C |

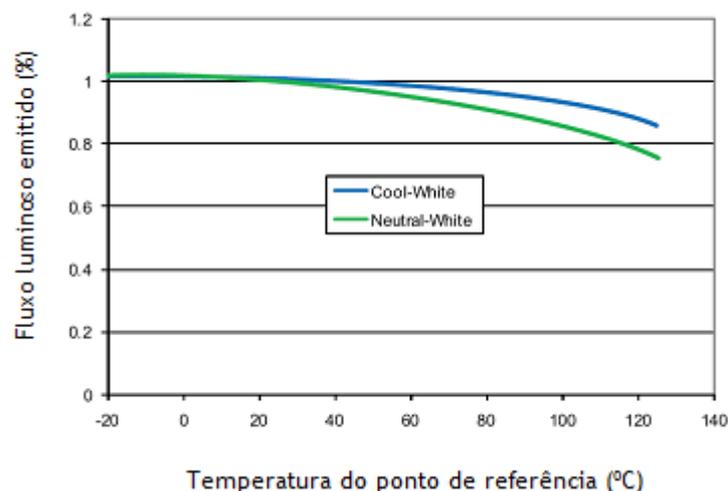


Figura 4.2 - Fluxo luminoso vs temperatura do ponto de referência LEDs usados na “Coluna Solar” [20]

Considerando a informação presente na tabela 4.5 e na figura 4.2 acerca dos LEDs utilizados e as características da luminária descritas na tabela 4.3, é então possível verificar a adequação do número de LEDs utilizados de acordo com o fluxo emitido pela luminária e com as condições de funcionamento da mesma, usando as expressões 3.1 e 3.2.

Devem ser tidas em conta algumas considerações antes da aplicação das equações. Em primeiro lugar, no caso dos LEDs utilizados, os dados exibidos na tabela 4.5 tem como referência, em termos de temperatura, a temperatura de um ponto de referência diferente da junção, em todo caso, a equação 3.1 é válida fazendo as substituições adequadas.

Em segundo lugar, a temperatura ambiente máxima considerada neste caso para efeitos de cálculo, atendendo a que se trata de uma aplicação que opera em ambiente exterior e exclusivamente durante a noite, é de 40 °C.

Existe ainda um terceiro aspecto a ter em conta, relacionado com a aplicação da equação 3.2, que se prende com o facto de neste caso o factor de correcção da corrente directa ser igual a um (a corrente directa de operação é igual à corrente directa de teste) e do factor de utilização ser também igual a um, pelo que estes dois factores são omitidos por simplicidade. Posto isto, da aplicação da equação 3.1 resulta:

$$T_{ref} = 40 + 6 \times 0,350 \times 3 = 46,3 \text{ °C}$$

Consultando o gráfico presente na figura 4.2, constata-se que o factor de correcção térmico, para este caso, tem valor unitário pelo que também é omitido. Da aplicação da equação 3.2 resulta, finalmente:

$$n^{\circ}_{LEDs} = \frac{843}{105 \times 0,80} \cong 10,04$$

, de onde se conclui que, o número de LEDs utilizados na luminária é suficiente para as condições de operação da aplicação.

É no entanto necessário avaliar se a luminária é capaz de garantir os níveis de iluminação para os quais foi concebida. Para tal é necessário, em primeiro lugar, ter em conta os requisitos, em termos fotométricos, que se pretendem cumprir. Sendo que se trata de um candeeiro destinado à iluminação de jardins, vias pedonais e ciclovias, a classe de iluminação da norma EN 13101-2 que se pretende cumprir é a classe S2, adequada a esta situação de iluminação. A classe S2 exige uma iluminância média de 10 (lux) e uma iluminância mínima de 3 (lux).

Em termos de concepção, a “Coluna Solar” destina-se a cumprir as exigências da classe S2 para uma altura de montagem de 3,5 (m) e um espaçamento entre luminárias de 12,25 (m), com uma inclinação de 10° para a luminária.

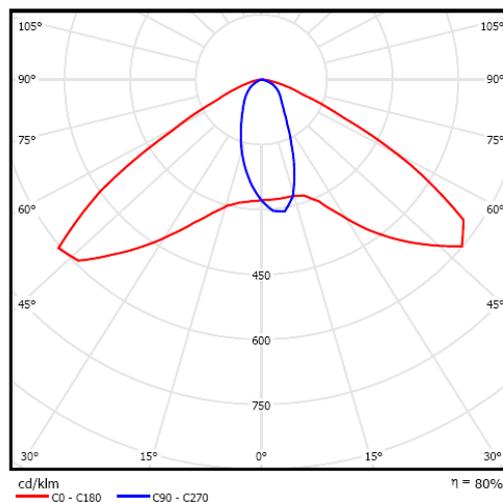


Figura 4.3 - Diagrama polar de distribuição de intensidade luminosa “Coluna Solar”

A fim de avaliar a capacidade do candeeiro para cumprir com os requisitos fotométricos estipulados, foi feita uma simulação no *software* DIALux, para as condições referidas atrás (altura de montagem, inclinação e espaçamento).

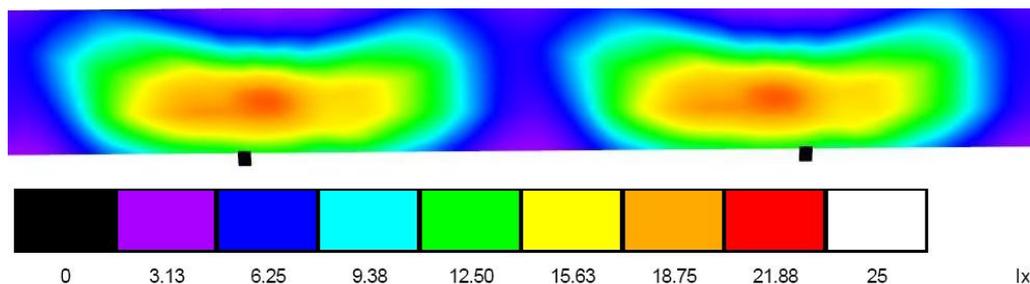


Figura 4.4 - Representação em cores falsas distribuição de iluminância “Coluna Solar”

Da simulação efectuada resultaram os valores presentes na tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Requisitos da classe S2 vs. resultados da simulação “Coluna Solar”

| Parâmetros | Requisitos da classe S2 | Resultados “Coluna Solar” |
|--------------------|-------------------------|---------------------------|
| Iluminância média | 10 lux | 11 lux |
| Iluminância mínima | 3 lux | 4,46 lux |

Os resultados revelam que em termos fotométricos a “Coluna Solar” garante um desempenho ligeiramente superior àquele que serviu de referência durante a fase de projecto, pelo que o seu dimensionamento luminotécnico é adequado.

4.1.3 - Ensaios em funcionamento do candeeiro “Coluna Solar”

Nesta subsecção, são apresentados os resultados da monitorização levada a cabo, pelo fabricante da luminária e do controlador ao candeeiro “Coluna Solar”, em condições reais de funcionamento. Esta monitorização teve lugar em Águeda entre os dias 12 e 15 de Março do presente ano, iniciando-se com a descarga das baterias, devida ao funcionamento da luminária, estando as baterias totalmente carregadas. Embora esta não seja a situação ideal de teste para o sistema, permite retirar conclusões importantes acerca do rendimento dos componentes do sistema, nomeadamente, do banco de baterias, do regulador MPPT e da fonte de alimentação da luminária.

Como complemento dos dados resultantes da monitorização levada a cabo pelo fabricante, e como forma de facilitar a compreensão do funcionamento do sistema, são apresentados também nesta subsecção gráficos resultantes da monitorização do sistema realizada no âmbito deste trabalho no Porto, entre os dias 9 e 10 de Julho.

Tabela 4.7 - Energia consumida “Coluna Solar”

| Data | W_{desc_bat} (Wh) | $W_{consum_luminária}$ (Wh) | $t_{100\%}$ (h) | $t_{50\%}$ (h) |
|------------|----------------------|------------------------------|-----------------|----------------|
| 12-03-2010 | 104,29 | 87,23 | 5,00 | 6,53 |
| 13-03-2010 | 103,99 | 87,03 | 5,00 | 6,50 |
| 14-03-2010 | 103,87 | 85,96 | 5,00 | 6,45 |

Tabela 4.8 - Energia produzida “Coluna Solar”

| Data | W_{FV} (Wh) | W_{carga_bat} (Wh) |
|------------|---------------|-----------------------|
| 13-03-2010 | 149,55 | 138,82 |
| 14-03-2010 | 147,60 | 136,97 |
| 15-03-2010 | 149,16 | 137,95 |

Utilizando os valores presentes nas tabelas 4.5 e 4.6, é possível determinar o valor do rendimento efectivo de cada um dos componentes do sistema.

- Regulador MPPT:

$$\eta_{MPPT} = \frac{\sum W_{carga_bat}}{\sum W_{FV}} = \frac{138,82 + 136,97 + 137,95}{149,55 + 147,60 + 149,16} \cong 0,93$$

- Banco de baterias:

$$\eta_{bat} = \frac{\sum W_{desc_bat}}{\sum W_{carga_bat}} = \frac{104,29 + 103,99 + 103,87}{138,82 + 136,97 + 137,95} \cong 0,75$$

- Fonte de alimentação da luminária LED:

$$\eta_{fonte_LEDs} = \frac{\sum W_{consum_luminária}}{\sum W_{desc_bat}} = \frac{87,23 + 87,03 + 85,96}{104,29 + 103,99 + 103,87} \cong 0,83$$

Tendo em conta os valores obtidos, constata-se que os rendimentos efectivos do regulador MPPT e da fonte de alimentação da luminária, se encontram ligeiramente acima dos valores previstos, mais concretamente, 3% acima do valor previsto para estes dois componentes. No caso das baterias verifica-se, também, que o valor efectivo do rendimento é 5% superior ao valor previsto.

Tabela 4.9 - Comparação entre rendimento previsto e efectivo “Coluna Solar”

| Componente | Rendimento previsto | Rendimento efectivo |
|---------------------------------------|---------------------|---------------------|
| Regulador MPPT | 0,90 | 0,93 |
| Banco de baterias | 0,70 | 0,75 |
| Fonte de alimentação da luminária LED | 0,80 | 0,83 |
| Sistema completo | 0,50 | 0,58 |

Pela análise da tabela 4.7, conclui-se que o rendimento global efectivo do sistema é 8% superior ao valor previsto.

Em seguida são apresentados gráficos construídos a partir dos resultados da monitorização em funcionamento do candeeiro “Coluna Solar” levada a cabo, no âmbito deste trabalho, entre as 5 horas e 8 minutos do dia 9 e as 5 horas e 8 minutos do dia 10 de Julho.

É de salientar que resultados obtidos apresentam erros devido às limitações do equipamento empregue na monitorização, deste modo, os gráficos seguintes devem ser vistos como meramente indicativos do comportamento do sistema em funcionamento, e não como uma reprodução fiel dos valores de tensão, corrente e potência em jogo.

Importa ainda referir que os valores presentes no eixo das abcissas dos gráficos das figuras 4.5, 4.6 e 4.7, representam o tempo de funcionamento do sistema decorrido desde a hora de início da monitorização (5 horas e 8 minutos do dia 9 de Julho).

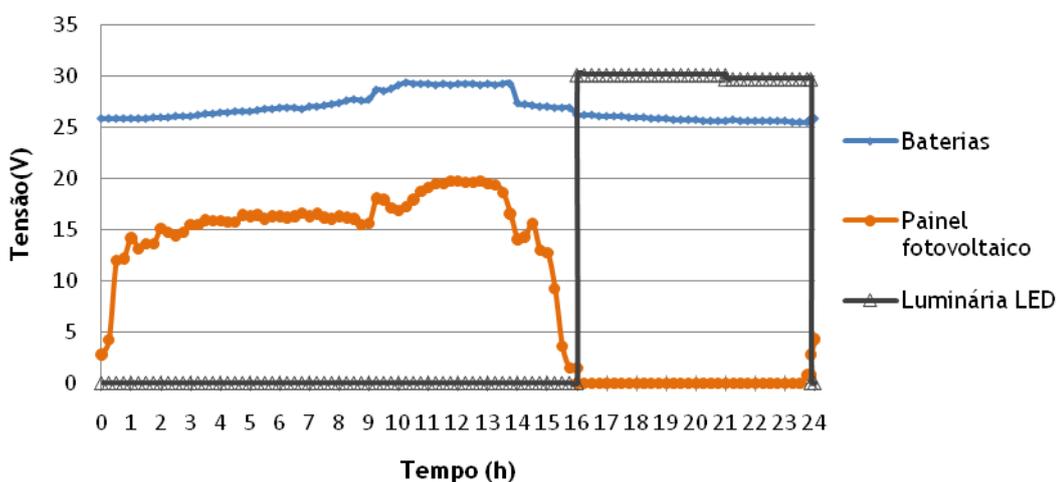


Figura 4.5 - Evolução da tensão em função do tempo “Coluna Solar”

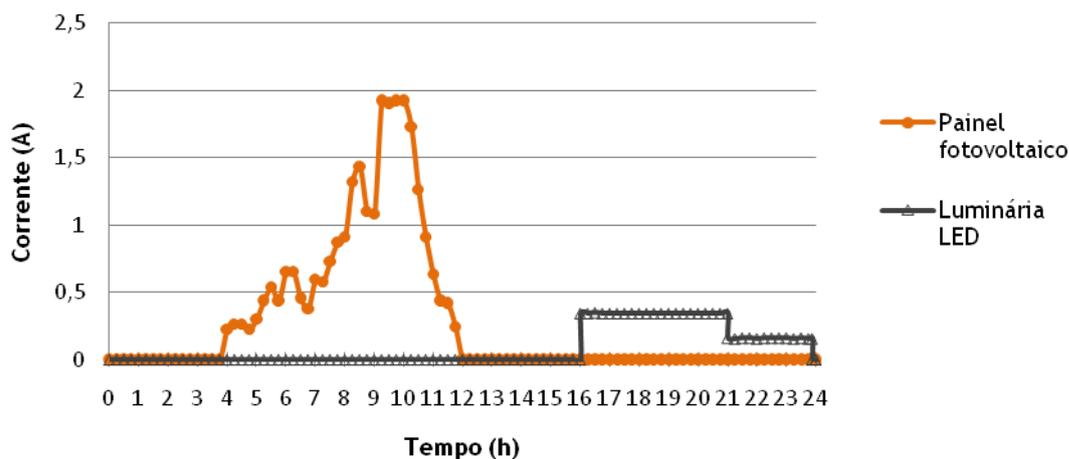


Figura 4.6 - Evolução da corrente em função do tempo “Coluna Solar”

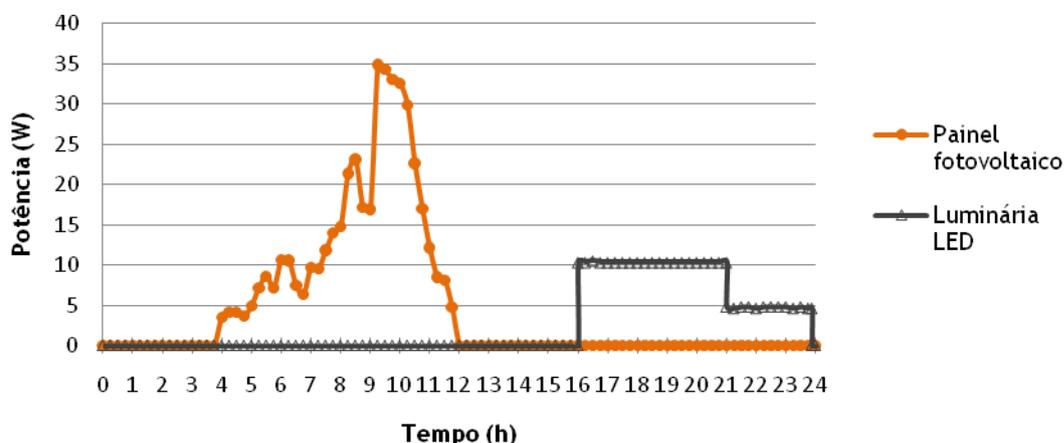


Figura 4.7 - Evolução da potência em função do tempo “Coluna Solar”

A análise dos gráficos presentes nas figuras 4.5, 4.6 e 4.7, permite evidenciar algumas das características de funcionamento dos componentes do candeeiro “Coluna Solar”.

No que diz respeito ao painel fotovoltaico, verifica-se que, embora exista tensão aos seus terminais a partir do início da monitorização (5 horas e 8 minutos), só passadas 4 horas se produzem valores de corrente e potência significativos, para que as baterias sejam carregadas. A figura 4.6 evidencia variações abruptas nos valores de corrente produzidos pelo painel, este facto indica variações rápidas do valor de irradiância recebido pelo painel, o que reflecte o efeito da “passagem” de nuvens durante o dia.

Relativamente ao ciclo de carga e descarga das baterias, conclui-se que a carga se inicia decorridas 4 horas após o início da monitorização e termina passadas 8 horas (12 horas desde o início da monitorização), período a partir do qual a corrente do painel fotovoltaico passa a ter valor nulo, continuando a ser aplicado às baterias um valor de tensão mais elevado do que a tensão nominal do banco de baterias, o que indica que o processo de carga se encontra no estágio de carga denominado “carga de manutenção”. Constata-se também que decorridas 14

horas desde o início da monitorização, os valores de tensão produzidos pelo painel fotovoltaico deixam de ser suficientes para manter o sistema no referido estágio de carga.

No que diz respeito ao funcionamento da luminária LED, verifica-se que o seu funcionamento tem início quando o valor de tensão do painel fotovoltaico desce abaixo dos 3 (V), e termina quando a tensão do painel fotovoltaico volta a atingir um valor superior a 3 (V). Após o início do funcionamento da luminária, esta opera durante 5 horas à potência máxima (tal como o estipulado na subsecção 4.1.1), decorrido este período de tempo a luminária passa a funcionar a metade da sua potência máxima até amanhecer. Neste caso concreto o tempo total de operação da luminária é de cerca de 8 horas.

A análise dos gráficos das figuras 4.5 e 4.6 permite ainda verificar uma característica importante do funcionamento dos LEDs - a relação exponencial entre a tensão e a corrente -. De facto, analisando os gráficos constata-se que a uma redução pequena do valor de tensão aplicada à luminária (cerca de 1%) corresponde uma variação no valor de corrente de aproximadamente 50%. Este facto realça a necessidade de fontes de alimentação com saída em corrente controlada para que seja possível o bom funcionamento das luminárias baseadas na tecnologia LED.

4.1.4 - Avaliação do dimensionamento eléctrico do candeeiro “Coluna Solar”

Para o efeito da avaliação do dimensionamento da “Coluna Solar” são usados os princípios de cálculo descritos na subsecção 3.3.1 deste trabalho, pelo que, os mesmos não são aqui repetidos, passando-se à sua aplicação directa.

Para a avaliação do dimensionamento do painel fotovoltaico é necessário, em primeiro lugar, definir o número de horas de funcionamento da luminária, para que seja possível calcular a energia consumida, no caso mais desfavorável. Sendo que se trata de iluminação pública o número de horas de funcionamento no caso mais desfavorável, o mês de Dezembro, ronda as quinze horas diárias, pelo que será esse o valor admitido para o dimensionamento.

É necessário também identificar o caso mais desfavorável em termos de localização geográfica, que neste caso será considerado como sendo a cidade de Bragança.

Posto isto, e usando os princípios de cálculo atrás apresentados, obtém-se para a energia diária consumida a expressão:

$$W_D = 10,5 \times 5 + 5,25 \times (15 - 5) = 105 \text{ Wh}$$

Por simulação na página da UE (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>), obtém-se para o mês de Dezembro, em Bragança, para uma inclinação de 60° um valor de radiância total diária, 2350 (Wh/dia), o que resulta em HPS= 2,35 (h/dia).

Com estes dados, e tendo em conta os rendimentos de todos os equipamentos, determinados na secção 4.1.2, chega-se a um valor de potência mínima para o módulo fotovoltaico, pela expressão:

$$P_{\min \text{ FV}} = \frac{105}{2,35 \times 0,75 \times 0,83 \times 0,93} \cong 77,18 \text{ W}$$

Concluí-se por isso que o módulo fotovoltaico utilizado na “Coluna Solar” se encontra subdimensionado.

Quanto à determinação da capacidade mínima das baterias, tendo em conta que a autonomia mínima desejada é de dois dias e que a tensão nominal é de 24 V, obtém-se:

$$C_{\min \text{ bat}} = \frac{105 \times 2}{24 \times 0,70 \times 0,75 \times 0,83} \cong 20,08 \text{ Ah}$$

Atendendo a que são utilizadas duas baterias de 15 (Ah) com tensão nominal de 12V, em série para obter a tensão nominal desejada, constata-se que também o banco de baterias se encontra subdimensionado.

4.1.5 - Comentários sobre a avaliação do dimensionamento eléctrico do candeeiro “Coluna Solar”

A avaliação feita na subsecção anterior, revela o subdimensionamento do módulo fotovoltaico e do banco de baterias escolhidos pela Larus. Contudo, em termos de funcionamento do candeeiro, tal facto não se fará sentir de forma tão evidente, se for tido em conta que todos os dias é reposta nas baterias parte da energia produzida pelo módulo de 45 (W). Para avaliar essa situação pode calcular-se para as mesmas condições de funcionamento a energia produzida pelo módulo de 45 (W), pela expressão:

$$W_{\text{FV}} = P_{\text{MPP}} \times \text{HPS} \times \eta_{\text{MPPT}} = 45 \times 2,35 \times 0,93 \cong 98,35 \text{ Wh} \quad (4.1)$$

Tendo em conta este valor de energia produzida diariamente, é possível determinar a quantidade de energia reposta nas baterias, que será igual a 75% desse valor, ou seja, 73,76(Wh). Considerando também a energia diária consumida pela luminária e pela sua fonte de alimentação, que será aproximadamente igual a 126,51 (Wh) (valor obtido pela divisão

entre energia consumida pela luminária e o rendimento da fonte de alimentação), é possível calcular o valor do défice de energia diário que será igual a 52,75 (Wh) (126,51-73,76). Convertendo o valor da carga disponível nas baterias em Watt-hora, admitindo que estas estão completamente carregadas, obtém-se um valor de energia disponível nas baterias de 252 (Wh), multiplicando a sua capacidade pela profundidade máxima de descarga e pelo valor de tensão nominal. Se se dividir o valor de energia disponível nas baterias pelo défice de energia, verifica-se que, no caso de estas se encontrarem completamente carregadas, só será atingida a sua profundidade máxima de descarga ao fim de 4,78 dias de funcionamento.

Pretende-se com isto evidenciar que o efeito subdimensionamento do módulo fotovoltaico, dependerá fortemente do nível de radiância média diária ocorrido no mês anterior e, por consequência, do estado da carga das baterias quando os valores de radiância baixam para níveis em que se faz sentir o subdimensionamento do módulo fotovoltaico.

No que diz respeito ao subdimensionamento do banco de baterias, verifica-se que os efeitos deste se farão sentir ao nível da autonomia e do tempo de vida útil das baterias, uma vez que, tratando-se de baterias chumbo-ácido, o tempo de vida útil depende fortemente da profundidade de descarga das baterias.

4.2 - Avaliação “Coluna 17º”



Figura 4.8 - Pormenor “Coluna 17º”

Esta secção é dedicada à avaliação da solução “Coluna 17º” da Larus. Nesse sentido, segue-se a descrição das características construtivas deste candeeiro.

4.2.1 - Apresentação das características do candeeiro “Coluna 17º”

A “Coluna 17º” é um candeeiro de iluminação pública que usa na sua luminária um conjunto constituído por: uma lâmpada de iodetos metálicos, um reflector em crómio polido, e uma tampa em vidro cerâmico. O funcionamento da luminária é assegurado por um balastro

electrónico que acumula as funções de balastro e ignitor. A protecção contra curto-circuitos do candeeiro é assegurada por um fusível, instalado no condutor de fase, de bases cilíndricas do tipo gG, com o calibre de 6 (A). As tabelas seguintes exibem as características relevantes dos constituintes da “Coluna 17”.

Tabela 4.10 - Características da lâmpada utilizada na “Coluna 17”

| | |
|--------------------|-------------------|
| Tecnologia | Iodetos metálicos |
| Potência nominal | 70 W |
| Tensão nominal | 90 V |
| Fluxo luminoso | 6300 lm |
| Temperatura de cor | 2800 °K |

Tabela 4.11 - Características do balastro electrónico utilizada na “Coluna 17”

| | |
|----------------------------------|-------|
| Potência nominal | 70 W |
| Tensão nominal de entrada | 230 V |
| Factor potência | 0,95 |
| Pico máximo de tensão de ignição | 4 kV |

Tabela 4.12 - Características dos condutores utilizados na “Coluna 17”

| Condutores de interligação entre a rede e o balastro electrónico | |
|---|-------------------------|
| Referência | FXV |
| Tensão nominal | 0,6/1 kV |
| Secção nominal | 3 x 2,5 mm ² |
| Temperatura máxima admissível em regime permanente | 90 °C |
| Corrente máxima admissível (30°C) | 36 A |
| Condutores de interligação entre o balastro electrónico e a lâmpada | |
| Referência | SiF-HV |
| Tensão nominal | 5 kV |
| Secção nominal | 1,5 mm ² |
| Temperatura máxima admissível em regime permanente | 180 °C |
| Corrente máxima admissível (30°) | 26 A |

4.2.2 - Avaliação do dimensionamento luminotécnico do candeeiro “Coluna 17º”

Lamentavelmente, por avaria do equipamento do laboratório luminotécnico em que seriam feitos os ensaios, não existem dados fotométricos relativos à luminária deste candeeiro, por esse motivo, não é feita no âmbito deste trabalho a avaliação do seu dimensionamento.

4.2.3 - Avaliação do dimensionamento eléctrico do candeeiro “Coluna 17º”

Em termos eléctricos é necessário avaliar a adequação do dimensionamento dos condutores e o tempo de actuação do fusível em situação de curto-circuito. Em seguida é feita a avaliação destes aspectos.

No que diz respeito aos condutores de interligação entre a rede de alimentação e o balastro electrónico, a corrente de serviço pode ser calculada pela aplicação da expressão 3.13, de onde resulta:

$$I_s = \frac{70}{230 \times 0,95} \cong 0,32 \text{ A}$$

, de onde se verifica que a corrente admissível dos condutores utilizados é suficiente, sendo até muito superior à corrente de serviço. A diferença entre a corrente de serviço e a corrente máxima admissível dos condutores utilizados, leva a prever que a queda de tensão seja nos condutores seja extremamente baixa, contudo, é feito o cálculo do seu valor, admitindo para o efeito um comprimento para os condutores de 5 (m). Com base no comprimento dos condutores e na sua resistividade para a temperatura máxima admissível, manipulando adequadamente a equação 3.9, vem:

$$\Delta U = \frac{2 \times 5 \times 0,0215 \times 0,32}{2,5} \cong 0,0275 \text{ V}$$

, este valor é aproximadamente igual a 0,01% de 230 (V), pelo que se verifica que também em termos de quedas de tensão os condutores utilizados cumprem os requisitos.

No caso dos condutores de interligação entre o balastro e a lâmpada a verificação é feita recorrendo aos mesmos princípios de cálculo, introduzindo as alterações necessárias, em termos de secção dos condutores, corrente de serviço, resistividade e temperatura máxima admissível. Admitiu-se para efeitos de cálculo que os condutores têm um comprimento de 2 (m). Da aplicação das equações resulta uma corrente de serviço de 0,82 (A) e uma queda de

tensão de 0,0598 (V), cerca de 0,03% de 230 (V), de onde se conclui que os condutores cumprem as condições que dizem respeito às quedas de tensão e à corrente admissível.

Neste caso os condutores verificam a condição de apresentarem uma tensão nominal superior ao valor máximo de tensão de pico durante o arranque da lâmpada.

Em termos globais, a condição de quedas de tensão é também cumprida, sendo que a queda de tensão total é igual a 0,04%.

É necessário verificar ainda se a protecção contra curto-circuitos é assegurada, neste caso concreto, o fusível assegura apenas a protecção dos condutores de interligação entre a rede de alimentação e o balasto, sendo que este possui dispositivos próprios para a eliminação de defeitos a jusante. Posto isto, a verificação da condição de protecção contra curto-circuitos passa em primeiro lugar pelo cálculo aproximado da corrente de curto-circuito mínimo fase-neutro. Aplicando a equação 3.14, vem:

$$I_{cc\ min}^{FN} = \frac{0,8 \times 230}{2 \times 5 \times (0,0334/2,5)} \approx 1,38\ kA$$

Com este valor da corrente de curto-circuito é possível calcular o tempo de fadiga térmica dos condutores, usando a expressão 3.12, de onde resulta:

$$t_{ft} = \left(143 \times \frac{2,5}{1380} \right)^2 \cong 0,067\ s$$

Utilizando este valor, é necessário verificar se o tempo de actuação do fusível gG de calibre 6 (A) é inferior ao tempo de fadiga térmica. Consultando a curva tempo-corrente correspondente a este tipo de fusíveis, verifica-se que o tempo de actuação é inferior a 0,004 (s), pelo que a protecção contra curto-circuitos está assegurada. Note-se que neste caso, sendo que é utilizado o sistema TN-C, também a protecção contra choques eléctricos é assegurada pelo fusível.

5 Certificação de candeeiros de iluminação pública

A concepção de candeeiros de iluminação pública, tal como a concepção de todos os outros produtos, deve cumprir os padrões de segurança e qualidade definidos nas normas aplicáveis.

Do ponto de vista da comercialização dos candeeiros é importante que se apliquem mecanismos que forneçam ao comprador uma garantia de qualidade e segurança dos produtos. Nesse sentido, existem dois processos que avaliam e atestam a conformidade dos produtos com as normas aplicáveis: a certificação e a marcação CE.

5.1 - Certificação

O processo de certificação voluntária de um produto, é o mecanismo mais completo que permite atestar a conformidade dos produtos com as normas aplicáveis. Neste processo estão sempre envolvidas, pelo menos, três entidades: um organismo de certificação, um laboratório de certificação e, o fabricante do produto [21].

O organismo de certificação é uma entidade acreditada pela autoridade competente, no caso português o Instituto Português de Acreditação (IPAC), com competências para conceder a um determinado produto o “estatuto” de produto certificado. No âmbito de um processo de certificação esta entidade tem como função a realização de auditorias e inspecções às instalações do fabricante do produto, com a finalidade de avaliar se este reúne as condições técnicas que permitam a concepção e o fabrico do produto de acordo com os padrões de qualidade e segurança estabelecidos nas normas aplicáveis [22]. É também da competência do organismo de certificação a emissão do certificado do produto, no fim do processo de certificação.

O laboratório de certificação é uma entidade independente acreditada pela autoridade competente (IPAC, para o caso português) que tem por função, num processo de certificação, a realização de ensaios laboratoriais de acordo com o prescrito nas normas

aplicáveis ao produto em avaliação, cujos resultados permitam avaliar a conformidade com os padrões normativos.

Durante o processo de certificação o fabricante do produto deve realizar um relatório técnico que comporte uma memória descritiva e justificativa do produto a certificar, a indicação de peças de substituição e as instruções de montagem e manutenção do produto. Paralelamente, o fabricante deve fornecer ao laboratório de certificação exemplares do produto e/ou provetes para a realização dos ensaios laboratoriais necessários.

É importante referir que o processo de certificação de um produto pode envolver mais do que um laboratório de certificação, sempre que um único laboratório não reúna as condições que permitam realizar todos os ensaios impostos pelas normas aplicáveis.

No final do processo de certificação, caso o produto cumpra todos os requisitos normativos, é emitido o certificado do produto que permite ao fabricante apor no produto o símbolo do organismo de certificação envolvido no processo, ou uma marca equivalente, o que pode ser encarado como uma garantia independente de conformidade do produto com as normas que lhe são aplicáveis.

5.2 - Marcação CE

A marcação CE (em que CE significa “conformidade europeia”), é um mecanismo mais simples de atestar a conformidade de um produto com as normas europeias aplicáveis e é, actualmente, um requisito necessário à livre circulação de produtos dentro do espaço económico europeu. Neste processo, a conformidade pode ser atestada pelo próprio fabricante do produto, através da emissão de uma declaração de conformidade. No entanto, sempre que este não reúna todas as condições necessárias para realizar os ensaios laboratoriais que permitam garantir a conformidade do produto com as prescrições normativas, deve ser envolvido no processo um, ou mais laboratórios com competência para levar a cabo os ensaios necessários.

É de salientar que a marcação CE não fornece uma garantia de qualidade do produto equiparável à proporcionada pela certificação, uma vez que este processo não necessita da aprovação de um organismo de certificação independente, dependendo, muitas vezes exclusivamente, da capacidade e rigor técnico do fabricante [23].

A marcação CE culmina, como o próprio nome sugere, com a aposição no produto da sigla CE, com o grafismo idêntico ao da figura 5.1.



Figura 5.1 - Grafismo da sigla CE (Conformidade europeia) [24]

5.3 - Normas aplicáveis e ensaios a realizar às soluções Larus

No âmbito da certificação ou da marcação CE de um produto, é necessário definir quais as normas aplicáveis e os ensaios a realizar de forma a verificar a conformidade com as prescrições normativas. Neste contexto, são apresentados na presente secção dois exemplos de produtos com características distintas, contudo, com uma função semelhante, com o objectivo de evidenciar as diferenças que as características construtivas podem implicar em termos de normas e ensaios aplicáveis.

5.3.1 - Normas e ensaios aplicáveis ao candeeiro “Coluna Solar”

O candeeiro “Coluna Solar” da Laurs, é um produto que se destina à iluminação de jardins, vias pedonais e ciclovias, pelo que se enquadra na designação de candeeiro de iluminação pública, no entanto, este apresenta algumas particularidades face aos candeeiros de iluminação convencionais pelo facto de se tratar de um sistema autónomo alimentado por um painel fotovoltaico e, também, por funcionar em níveis de tensão muito reduzidos.

No contexto da verificação de conformidade com as normas aplicáveis, os candeeiros de iluminação pública inserem-se, normalmente, no âmbito de aplicação da directiva de baixa tensão (Directiva 2006/95/CE). No entanto este documento é aplicável apenas a equipamentos eléctricos com uma tensão nominal compreendida entre 75 (V) e 1500 (V) para o caso de corrente contínua e, entre 50 (V) e 1000 (V) para corrente alternada. Tal facto constitui uma lacuna em termos normativos, sendo que as prescrições da norma EN 60598-2-3, relativa a luminárias de iluminação pública, são aplicáveis no domínio da directiva de baixa tensão. Deste modo, apesar de a “Coluna Solar” ser um candeeiro de iluminação pública, não são aplicáveis todas as prescrições da norma pelo facto de os níveis de tensão usados não se encontrarem dentro das gamas definidas para este tipo de equipamentos uma vez que a tensão mais elevada verificada neste candeeiro é de 30 (V), em corrente contínua, e diz respeito à alimentação da luminária LED [21]. Posto isto, só parte das prescrições da norma EN 60598-2-3 são aplicáveis à “Coluna Solar”.

São ainda aplicáveis à “Coluna Solar” as prescrições das normas EN 55015 e EN 61547 relativas à compatibilidade electromagnética no âmbito da emissão e imunidade a perturbações, respectivamente.

Na tabela 5.1, é apresentado um resumo das prescrições aplicáveis a este candeeiro.

Tabela 5.1 - Normas e ensaios aplicáveis à “Coluna Solar”

| Norma | Prescrições e/ou ensaios aplicáveis |
|--|---|
| EN 60598-3-2: Prescrições particulares - Luminárias para iluminação pública | <p>4.12 - Parafusos</p> <p>4.13 - Resistência mecânica</p> <p>4.18 - Resistência à corrosão</p> <p>4.25 - Perigos mecânicos</p> <p>4.3 - Caminhos de cabos</p> <p>5.3 - Conexões internas</p> <p>8 - Protecção contra choques eléctricos</p> <p>9 - Protecção contra intrusão de sólidos e líquidos</p> <p>11 - Linhas de fuga e distâncias no ar</p> <p>13 - Resistência ao fogo</p> |
| EN 55015: Limites de emissão e métodos de medição de perturbações electromagnéticas características de aparelhos eléctricos de iluminação e equipamentos similares | Todas as prescrições |
| EN 61547: Requisitos imunidade electromagnética em equipamentos para iluminação geral | Todas as prescrições |

5.3.2 - Normas e ensaios aplicáveis ao candeeiro “Coluna 17º”

A “Coluna 17º” da Larus, tal como a “Coluna Solar”, é um candeeiro destinado à iluminação pública, mais concretamente à iluminação de jardins, vias pedonais e ciclovias. Este é um candeeiro com ligação à rede de distribuição de energia eléctrica, com uma tensão de alimentação de 230 (V) em corrente alternada. Este é, portanto, um produto que se insere no âmbito da directiva de baixa tensão e por consequência, são aplicáveis todas as prescrições da norma EN 60598-2-3 relativa a luminárias de iluminação pública. Cumulativamente são, também, aplicáveis as normas relativas à compatibilidade electromagnética EN 55015 e EN61547.

A tabela 5.2 apresenta um resumo das prescrições e ensaios aplicáveis a este candeeiro.

Tabela 5.2 - Normas e ensaios aplicáveis à “Coluna 17º”

| Norma | Prescrições e/ou ensaios aplicáveis |
|---|-------------------------------------|
| EN 60598-3-2: Prescrições particulares - Luminárias para iluminação pública | Todas as prescrições |
| EN 55015: Limites de emissão e métodos de medição de perturbações electromagnéticas características de aparelhos eléctricos de iluminação e equipamentos similares | Todas as prescrições |
| EN 61547: Requisitos imunidade electromagnética em equipamentos para iluminação geral | Todas as prescrições |

6 Conclusões e comentários finais

Cada vez mais, a problemática da gestão dos recursos energéticos ocupa um lugar central nas preocupações da Humanidade. Deste modo, todos os contributos para uma redução dos consumos energéticos são importantes.

Ao longo deste trabalho, tornou-se evidente que é possível actualmente, em termos técnicos, substituir, em muitas situações, os convencionais candeeiros de iluminação pública por candeeiros de uma nova geração, totalmente autónomos, suprimindo assim os consumos de electricidade associados. A concepção deste tipo de candeeiros assume contornos completamente distintos dos tradicionais, requerendo conhecimentos em domínios totalmente distintos, como se pretendeu realçar no decorrer deste trabalho.

Apesar das suas virtudes, este tipo de candeeiros não pode ser adoptada para todas as situações de iluminação pública, devido ao facto de os painéis fotovoltaicos necessitarem de uma boa exposição solar. Contudo nestes casos, a tecnologia LED pode ser utilizada, como forma de conceber uma iluminação eficiente e com menores consumos energéticos associados. De facto, a tecnologia LED apresenta já várias vantagens, como se demonstrou, face às tecnologias convencionalmente utilizadas em iluminação pública e, para além disso, trata-se de uma tecnologia em constante desenvolvimento, para a qual se prevêem desempenhos muito superiores aos actuais num futuro próximo.

É também possível concluir que a avaliação actual das fontes de luz é desajustada para aplicações de iluminação pública e, por essa razão é importante criar normas que estabeleçam novos métodos que permitam uma correcta avaliação de desempenho das fontes de luz, facilitando a sua comparação.

Finalmente, a certificação de candeeiros de iluminação pública, tema abordado neste trabalho, revela também algumas lacunas, no que diz respeito às normas aplicáveis aos candeeiros autónomos, que constituem uma dificuldade acrescida na certificação deste tipo de produtos. Espera-se que estas lacunas venham a ser eliminadas a curto prazo.

Comentários finais

De uma maneira geral, os objectivos definidos para este trabalho foram atingidos, apesar da inexistência de meios, para realização de ensaios fotométricos e até mesmo de monitorização do sistema fotovoltaico constituinte da “Coluna Solar”.

Como trabalhos futuros, acerca dos temas deste trabalho, seria interessante estudar a viabilidade económica da implementação de candeeiros autónomos e explorar o uso de outras fontes de energia renovável, como por exemplo, a energia eólica, ou até a construção de soluções híbridas integrando diferentes fontes de energia renovável.

Não posso deixar de referir o contributo importante que este trabalho constituiu para o meu enriquecimento enquanto estudante de engenharia, não só pela aquisição de conhecimentos decorrente da realização do próprio trabalho, mas também pela oportunidade que me foi dada, na Larus, de contactar com a realidade do mundo profissional, através da participação nas actividades da empresa, como por exemplo, a apresentação da “Coluna Solar” na TECMA 2010, em Madrid.

Referências

- [1] Coluna Solar. http://www.larus.pt/Media/Downloads/pt/iluminacao/col_solar.pdf. Acesso em 26-02-2010.
- [2] Coluna 17°. <http://www.larus.pt/Default.aspx?action=ArticleViewer&target=486&code=1>. Acesso em 26-02-2010.
- [3] Morais, Josué; “Sistemas Fotovoltaicos da Teoria à Prática”; ISBN: 978-989-96101-0-1.
- [4] Monteiro, Cláudio; “Energia Solar Fotovoltaica Aula 2-A Radiação Solar”, FEUP 2009.
- [5] Alexandre Becquerel. http://pt.wikipedia.org/wiki/Alexandre_Edmond_Becquerel, Acesso em 27-02-2010.
- [6] Monteiro, Cláudio; “Energia Solar Fotovoltaica Aula 3-A Célula FV”, FEUP 2009.
- [7] Monocristalino. <http://www.troquedeenergia.com/Produtos/LogosModulosSolares/spr90.JPG>. Acesso em 02-03-2010.
- [8] Policristalino. <http://www.vallconsult.com/greenpower/imagenes/policristalino.jpg>. Acesso em 02-03-2010.
- [9] A. Vicent, Colin; “Modern Batteries- An Introduction to Electrochemical Power Sources ” ; Second Edition(1997);ISBN: 0-7506-7092-4.
- [10] Handbook of Secondary Storage Batteries and Charge Regulators in Photovoltaic Systems Final Report. <http://www.azsolarcenter.org>. Acesso em 05-03-2010
- [11] D.P.Hohm,M.E.Ropp;”Comparative Study of Maximum Power Tracking Algorithms”, 22 de Novembro 2002.
- [12] Teixeira, Armínio; “Grandezas Usadas em Luminotecnia”, FEUP.
- [13] Teixeira, Armínio; “Natureza da Luz - Fisiologia da Visão”, FEUP.
- [14] Teixeira, Armínio; “Tipos de Lâmpadas”, FEUP.
- [15] Teixeira, Armínio; “Iluminação Pública - Armaduras para Iluminação Pública”, FEUP.
- [16] Light-emmiting diodes. http://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode. Acesso em: 15-03-2010.
- [17] LED. http://www.lighting.philips.com/pt_pt/trends/led/index.php?main=pt_pt&parent=1&id=pt_pt_trends&lang=pt. Acesso em 21-04-2010.

- [18] “Iluminação pública a LED- Um novo conceito”. Disponível em http://www.energiaviva.pt/pdf/dossier/iluminacao_publica_a_LED_um_novo_conceito.pdf. Acesso em 20-04-2010.
- [19] “LED Luminaire Design Guide” Disponível em http://www.cree.com/products/pdf/LED_Luminaire_Design_Guide.pdf. Acesso em 27-04-2010.
- [20] “Folha de características dos LEDs LUXEON Rebel ES”. Disponível em <http://www.philipslumileds.com/pdfs/DS61.pdf>. Acesso em 2-05-2010.
- [21] Conversa pessoal com o engenheiro João Lopes, responsável pelo Laboratório Industrial da Qualidade.
- [22] “Certificação de produtos”. Disponível em <http://www.certif.pt/cprodutos.asp>. Acesso em 03-05-2010.
- [23] “Marcação CE”. Disponível em <http://www.certif.pt/oquee.asp>. Acesso em 03-05-2010.
- [24] http://www.so.com.br/saibamais_marcacaoce.asp. Acesso em 04-05-2010.