INSERTION OF LED (LIGHT EMITTING DIODE) AERONAUTICAL GROUND LIGHTS IN AERODROMES

Bruno Ferreira Medeiros da Silva*
National Civil Aviation Agency
Avenida Presidente Vargas, 850 – Centro – CEP 20.071-001, Rio de Janeiro-RJ-Brasil
bruno.medeiros@anac.gov.br

ABSTRACT

This article presents information related to the insertion of Aeronautical Ground Lights (AGLs) that use LED – Ligth Emitting Diode – technology (LED AGLs), in aerodromes. In relation to conventional AGLs, LED AGLs feature peculiarities that provide lower energy consumption and lower maintenance costs. To maximize such benefits, it is necessary to attempt to necessary modifications in existing electric-electronic circuits. Furthermore, LED AGLs emit light beam with distinct photometric characteristics. These differences bring advantages to flight safety, but can also input conflicts with existing systems and operations, requiring, therefore, specific design, construction and operational solutions and important regulatory changes.

Keywords: LED, Diode, Light, Aeronautical, Aerodrome.

Artigo elaborado pelo autor como trabalho de fim de curso da Pós-Graduação *Lato Sensu* em Engenharia Elétrica da Universidade Candido Mendes, do Rio de Janeiro/RJ/Brasil.

RIO DE JANEIRO

Outubro/2015

[1] Pós-Graduado em Engenharia Elétrica, pela Universidade Candido Mendes, Rio de Janeiro/RJ (abr-set/2015). Engenheiro Civil, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ (jan/1999-jan/2005). Especialista em Regulação de Aviação Civil, na Agência Nacional de Aviação Civil - ANAC (ago/2008 – data atual). Representante brasileiro no Grupo de Trabalho de Auxílios Visuais de Aeródromos, da Organização de Aviação Civil Internacional – OACI (2011 – data atual). Engenheiro Civil da Petrobrás (set/2007-jun/2008), Eletrobrás (jun-set/2007) e Subsecretaria de Águas Municipais (Rio-Águas) da Prefeitura do Rio de Janeiro/RJ (jan/2005-mai/2007).

1. INTRODUÇÃO

As Luzes Aeronáuticas de Superfície (AGL – *Aeronautical Ground Lighting*) são luzes instaladas em aeródromos que auxiliam os pilotos de aeronaves a identificar a localização e configuração das pistas de pouso e decolagem, pistas de táxi e pátio de aeronaves, em um aeródromo. Juntamente com outros auxílios eventualmente necessários, elas são exigidas para operações noturnas e em certas condições de visibilidade, nas quais somente a sinalização horizontal (pintura) não é suficiente para a identificação visual, com segurança mínima aceitável, desses elementos do aeródromo.

Atualmente, os aeródromos ao redor do mundo apresentam principalmente as convencionais AGL incandescentes (incluindo-se as halógenas, que tem princípio de funcionamento parecido com o das puramente incandescentes), havendo registros precisos de que, desde o ano de 2002, tais AGL vêm sendo gradativamente substituídas pelas AGL LED (Diodo Emissor de Luz ou *Light Emitting Diode*).

> *LED fittings for taxiway centre lines have been in use at Heathrow, on a trial basis, since 2002.* (LEEMING, 2014, p.2).

Segundo dados apresentados por Mai, Tom (2015, p. 68-70, *apud* ADB Group), dos 20 aeroportos dos EUA mais movimentados em 2013, 25% têm luzes LED instaladas em suas pistas de pouso e decolagem e 50% têm AGL LED em suas pistas de táxi. A mesma fonte aponta que os 75 aeroportos mais movimentados dos Estados Unidos da América (EUA) em 2013 já apresentavam AGL LED em operação, e ainda que importantes aeroportos da Europa, Singapura e Dubai apresentavam grande porcentagem de AGL LED. O ADB Group (2015) menciona ainda a existência de AGL LED no aeroporto de Xi'an Xianyang, na China.

Dentre as principais razões para a substituição das AGL, apontadas nas referências bibliográficas ora consultadas, estão as seguintes:

1. Políticas internacionais e nacionais vêm sendo implantadas gradativamente no sentido de se utilizar técnicas e tecnologias produtivas e de consumo que poluam menos o meio ambiente, afetem negativamente as comunidades em menor intensidade e utilizem menos os recursos naturais;
2. As AGL LED consomem menos energia do que as AGL convencionais, exigindo sistema elétrico menos robusto, apresentando maior confiabilidade e custos menores de operação;
3. As AGL LED apresentam maior durabilidade do que as convencionais, o que se traduz em menores custos de manutenção;
4. As AGL LED fornecem feixe luminoso mais conspícuo, aumentando a segurança das operações aéreas.

No entanto, as vantagens apontadas advêm de diferenças intrínsecas entre as luzes LED e as convencionais, que repercutem também em importantes diferenças técnicas de instalação, operação e manutenção. Ao inserir as AGL LED em circuitos existentes, projetados para tecnologias convencionais, devem ser feitas adequações importantes, visando a maximização dos possíveis benefícios trazidos pela (relativamente) nova tecnologia.

> *Although most electrical power systems for airfield lighting systems were designed for the incumbent incandescent lighting technology, LED airfield lighting systems are not incompatible with this infrastructure. Replacing parts of the electrical infrastructure can yield greater energy efficiency and reliability in lieu of simply replacing the incandescent light fixtures with LEDs.* (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2012, p.1)

Focando na segurança das operações aéreas, as peculiaridades das AGL LED relacionadas com suas características fotométricas devem ser entendidas. Tais diferenças trazem algumas vantagens para a segurança, mas também conflitos com sistemas e operações existentes, o que exige soluções e importantes incorporações em normas ou publicações de avisos e alertas internacionais e nacionais.

Com o objetivo de conhecer com relativa profundidade e colaborar na divulgação das peculiaridades relacionadas com a instalação, operação e manutenção das AGL LED, foram estudadas referências bibliográficas relacionadas com o tema e extraídas informações, entendimentos e conclusões consideradas de grande valia.

Foram utilizadas como referências normas e documentos oficiais da Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC, da Organização de Aviação Civil Internacional – OACI, da Federal Aviation Administration – FAA, dos Estados Unidos da América – EUA, ou publicações ou artigos científicos: apresentados em Reuniões do Grupo de Trabalho de Auxílios Visuais (de Aeródromos) da OACI; desenvolvidos por meio de trabalhos patrocinados pela FAA/EUA; da International Airport Review Magazine; do ADB Group, fabricante líder mundial de AGL; etc.

2. DESENVOLVIMENTO

O primeiro passo para se entender as peculiaridades das AGL LED é entender o princípio básico de funcionamento das lâmpadas LED, que é fazer passar corrente elétrica por dois materiais (cristais) semicondutores translúcidos, que, juntos – junção pn, onde p é o anodo e n é o catodo – formam um diodo emissor de luz. A passagem dos elétrons através da junção faz com que sejam emitidos fótons. A cor emitida pela LED depende principalmente dos materiais empregados como semicondutores e é determinada pelo comprimento de onda dos fótons emitidos. Segundo, o Transportation Research Board, EUA (2012, p. 29), na composição das AGL LED atualmente no mercado há, por exemplo, os elementos químicos Alumínio, Gálio, Índio, Fósforo, Nitrogênio, Ítrio e Cério.

> *Light-emitting diodes (LEDs) are solid-state devices that generate light when a current is passed through the semiconductor chip (Bullough 2003). As electrons move across the junction formed at the chip, photons are emitted. The color of the emitted light, which is determined by the wavelength of the photons, depends primarily on the materials in the junction, and to a lesser extent on the temperature.* (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2012, p.29)

Já as lâmpadas incandescentes funcionam a partir do aquecimento de um filamento, geralmente composto pelo metal tungstênio, gerando a cor branca, e em luminárias com filtro de vidro colorido, as demais cores, de acordo com a cor do filtro. Essas lâmpadas transformam uma pequena parte da energia elétrica consumida em luz visível e a maior parte em calor. Nota-se ainda que, no caso, das lâmpadas com filtro colorido, uma grande parte das ondas eletromagnéticas brancas visíveis é filtrada, utilizando-se apenas uma parte das ondas na emissão da luz colorida. Portanto, as lâmpadas incandescentes apresentam baixo rendimento, o que, aliado às demais razões apontadas em introdução, já levou diversos países a determinarem a substituição gradual das lâmpadas incandescentes por lâmpadas mais eficientes. As lâmpadas LED são uma opção que vem aceleradamente substituindo as incandescentes, em diversas aplicações, assim como no caso das AGL, em aeródromos.

As diferenças entre os princípios básicos de funcionamento de ambas as tecnologias fazem com que o espectro de ondas eletromagnéticas emitido pelas AGL LED apresente valores de comprimentos de onda mais uniformes, ou seja, localizadas em região mais estreita do Espectro Eletromagnético (Figura 1), em relação às lâmpadas convencionais. Ainda, os espectros emitidos pelas AGL LED localizam-se essencialmente na região do Espectro

Eletromagnético que contém os comprimentos de ondas eletromagnéticas visíveis a olho nu pelo ser humano, ou seja, aproximadamente 400 a 700 nm (1 nanômetro = 1 x 10^{-9} metro). Assim, diferentemente das AGL convencionais, as LED praticamente não emitem ondas infravermelhas (comprimentos de onda maiores do que 700 nm), que são responsáveis pela grande emissão de calor e uma das causas principais pela pequena eficiência energética e luminosa das AGL convencionais.

> *Aviation signal lights that use LED sources differ from their counterparts using filtered or unfiltered incandescent lamps, to generate specific colors or unfiltered to produce white light, in several important ways. Colored LEDs produce narrowband spectral output with highly saturated color appearance... In using this more efficient light source (i.e., LEDs produce more light with less heat than incandescent lights), color regions can be refined to avoid confusion among colors at all intensities and to provide an improved visual cue to the user at reduced energy and maintenance costs.* (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2012, p.29)

Tais peculiaridades traduzem-se em menor potência elétrica (medida em Watts, W) e maior eficiência luminosa (medida em lumens/Watt, lm/W) das AGL LED em relação às AGL convencionais. As Tabelas 1 e 2 contêm dados comparando as especificações das AGL incandescentes, ou halógenas, com das AGL LED. Cabe observar que os dados das AGL LED são de 2015 (Tabela 1) e de 2011 (Tabela 2), e que, segundo o Transportation Research Board/EUA (2012, p. 29), a tecnologia e eficiência das AGL LED vêm sendo melhoradas ano a ano.

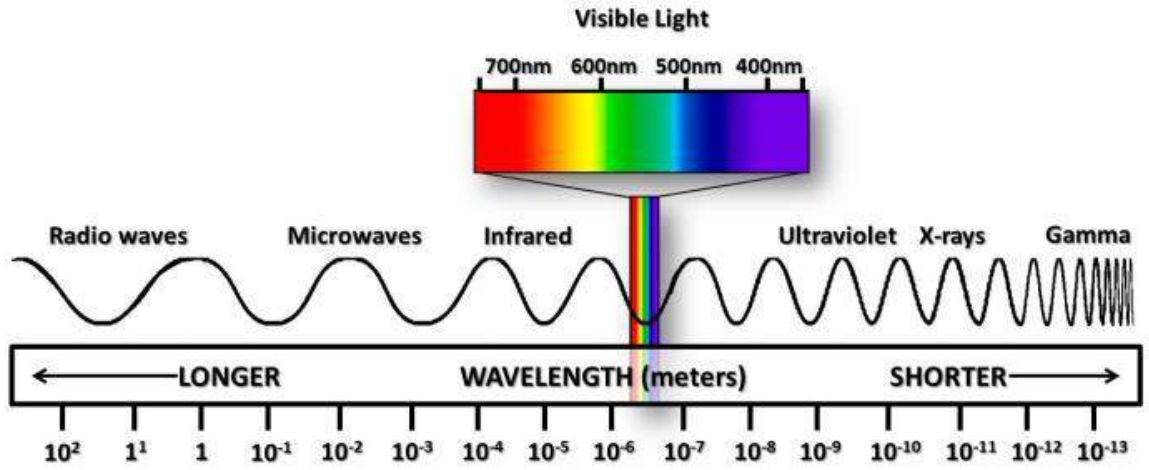


Figura 1 - Espectro Eletromagnético com Região Visível pelo Olho Humano Destacada.
Fonte: Florida Center for Environmental Studies/ Florida Atlantic University - http://www.ces.fau.edu/nasa/module-2/radiation-sun.php.

Tabela 1 – Potência Elétrica (W) de AGL halógenas e LED.

Tipo de AGL	Potência de AGL halógenas (W)	Potência de AGL LED (W)
Luz de Eixo de Pista de Táxi	40 – 100	20
Barra de Parada	40 – 105	10
Luz de Eixo de Pista de Pouso e Decolagem	96	30

Luz de Zona de Toque	48	15
Luz de Borda de Pista de Táxi (elevada)	30 – 45	11

Fonte: ADB Group (2015, p. 6).

Tabela 2 – Eficiência luminosa média (lm/W) de AGL incandescentes e LED.

Cor da AGL	Eficiência Luminosa de AGL incandescentes (dados de 2003; em lm/W)	Eficiência Luminosa de AGL LED (dados de 2011; em lm/W)
Branca	15	90
Verde	5	90
Amarela	8	55
Vermelha	5	55
Azul	<1	35

Fonte: Transportation Research Board/EUA (2012, p. 29).

Em termos de economia de energia elétrica, comparativamente com as AGL convencionais, as AGL LED são mais eficientes quanto mais se adequarem os circuitos elétricos que alimentam as luminárias LED. Apesar das AGL LED serem, em geral, compatíveis com os circuitos hoje em operação, que foram projetados para as AGL convencionais, a maior economia de energia elétrica depende de adequações também nos circuitos elétrico-eletrônicos de alimentação e controle das AGL.

A Tabela 3 exemplifica a redução de consumo percentual obtido com a troca de Luzes de Borda de Pista de Táxi incandescentes por LED. Na tabela, constam dados de redução de consumo quando são substituídas somente as luminárias e lâmpadas, quando é substituído também o transformador do circuito elétrico, e quando é substituído o circuito elétrico em sua totalidade. Frisa-se que, segundo o Doc 9157, Part 5 (1983, p. 5-25), da Organização de Aviação Civil Internacional (OACI) – publicado quando as AGL LED ainda não eram comercializadas, circuitos que alimentam Luzes de Borda de Pista de Táxi e Luzes de Borda de Pista de Pouso e Decolagem, ambas incandescentes, são usualmente projetados para corrente elétrica de 6,6 Amperes (A).

A fim de aumentar a eficiência do sistema elétrico-eletrônico e redução de consumo de energia, ao se implantar AGL LED, o ADB Group (2015, p. 6) cita que devem ser substituídos os seguintes componentes do circuito de alimentação e controle das luzes por componentes menores: Regulador de Corrente Constante (*Constant-Current Regulator* - CCR); transformadores isoladores; dispositivos de proteção do circuito; gerador, quando houver; transformadores aumentadores e abaixadores de voltagem (que podem ser eliminados em alguns casos), quando houver; entre outros. Já o Transportation Research Board/EUA (2012, p. 5, *apud* Vaughan, 2011), menciona que, visando também maior eficiência e redução de consumo, podem ser adotados circuitos em paralelo de menor voltagem. No Doc 9157, Part 5 (1983, p. 5-23), da OACI, consta que a maioria das luzes de aeródromos (convencionais) são energizadas por circuitos em série.

Tabela 3 – Percentual de consumo de energia (%) de Luzes de Borda de Pista de Táxi LED, em relação às incandescentes, de acordo com as intervenções no sistema elétrico original, projetado para luzes incandescentes.

Intervenções no sistema elétrico original	Percentual de consumo de energia (%) das AGL LED, em relação às AGL incandescentes
Apenas troca de AGL incandescentes por AGL LED	30 – 50
Troca das AGL e troca do transformador por um menor	20 – 40
Circuito original de 6,6 A completamente substituído por 2,8 A	2 – 13

Fonte: Transportation Research Board/EUA (2012, p. 14), *apud* Rainey (2007).

Em relação à compatibilidade das AGL LED com circuitos elétricos existentes, ainda segundo o Transportation Research Board, EUA (2012, p. 11-12), em aeroportos dos EUA que trocaram as AGL convencionais por LED, dependendo da configuração e componentes dos circuitos elétrico ou de controle existentes, foram necessárias as seguintes alterações: modificações em placa de circuito, a fim de compatibilização com CCR tipo tiristor; troca de transformadores isoladores por menores; instalação de reguladores retificadores controlados de silicone (SCR); instalação de reguladores tipo ferro-ressonante; ajuste em alguns reguladores para correção de tremulação (*flicker*). A mesma entidade americana cita que: Luzes de Proteção de Pista de Pouso e Decolagem LED podem ser utilizadas com CCR tiristor ou ferro-ressonante (*apud* Hough and Gilbreath, 2010); sistemas com AGL LED podem ser projetados para ser compatíveis com reguladores SCR e reguladores ferro-ressonante com fator de crista alto.

Mai, Tom (2015, p. 129) informa que, para se compatibilizar as AGL LED com circuitos em série de 6,6 A existentes, são adicionados complexidade e custo nas luminárias LED, em razão da adição de componentes eletrônicos que simulam a curva não linear de ajuste da intensidade luminosa das luzes incandescentes. Ainda, as luminárias LED devem converter a corrente alternada alimentada para corrente contínua de menor amplitude. Assim, os componentes eletrônicos embutidos em cada luminária LED podem influenciar na qualidade dos sinais fornecidos pelo circuito elétrico, podendo introduzir, por exemplo, níveis altos de distorção harmônica.

Apesar de, para se compatibilizar as AGL LED com os sistemas elétricos existentes, haver necessidade de substituição ou instalação de componentes elétricos ou eletrônicos extras nesses circuitos, assim como nas próprias luminárias (estes pelo próprio fabricante) – razões que oneram o investimento inicial em AGL LED, algumas das referências consultadas apontam que é esperado que o retorno financeiro ocorra em alguns anos. E a maior redução esperada nos custos com a instalação das AGL LED é obtida com a maior durabilidade das AGL LED, em relação às AGL convencionais, o que repercute em menores custos com manutenção. Tal vantagem da nova tecnologia, atrelada às outras já citadas, confere às AGL LED maior confiabilidade.

(Leeming, Peter, 2014) O Aeroporto de Heathrow, Grande Londres, Reino Unido, aeroporto de duas pistas de pouso e decolagem mais movimentado do mundo, vem substituindo as AGL halógenas das pistas de táxi por LED desde 2005, já tendo substituído 7.500 luminárias, do total de 14.300. O mesmo aeroporto substituiu as AGL halógenas de ambas as pistas de pouso e decolagem (que operam aproximações de precisão CAT III) por LED – abrangendo Luzes de Eixo, de Zona de Toque, de Borda, de Cabeceira e de Fim de Pista – de abril a

setembro de 2013 e de 2014. Reporta-se que, neste aeroporto, as equipes de engenharia estão economizando em torno de 7.000 h/ano com atividades de manutenção das AGL e 118.000 Libras/ano em consumo de energia elétrica por estas luzes.

O ADB Group (2015, p. 6) considera que as lâmpadas incandescentes apresentam vida útil média de 4.000 a 6.000 horas, enquanto as LED apresentam, nas mesmas condições operacionais, mais do que 200.000 horas. Mas Narendran e Freyssinier (2014), com base em estudo financiado pela FAA/EUA a fim de se medir a vida útil das AGL LED, apontam que falhas podem ocorrer antes da vida útil informada por fabricantes. Deve-se considerar que as falhas compreendem a falhas "catastróficas", ou seja, quando a AGL não mais emite luz, mas também não-conformidades com os requisitos fotométricos, que devem ser atendidos pelas luzes. Estes requisitos são estabelecidos pelo RBAC nº 154 (2012), da ANAC, assim como o Anexo 14 (2013), da OACI, e normas da FAA/EUA, e compreendem intensidade luminosa (medida em Candelas, cd) e cor (medida em coordenadas x,y, do Gráfico de Cromaticidade CIE - Commission Internationale de l´Eclairage, 1931).

Assim, observa-se que, para se alcançar de fato as vantagens oferecidas pelas AGL LED deve-se considerar as adequações que serão necessárias em circuitos elétrico-eletrônico específicos existentes. Nesse sentido, cita-se que o Engineering Brief (EB) 67D (2012), da FAA/EUA, estabelece requisitos adicionais que devem ser atendidos pelas AGL LED para que sejam certificadas e estejam aptas a serem implantadas nos aeródromos dos EUA. Esta norma está em constante modificação, sendo alimentada por estudos financiados pela entidade. Entre outros requisitos, há na norma: critérios para teste em altas temperaturas, teste de vida acelerada das luminárias e outros testes; previsão de que as luminárias devem ser projetadas para operar e serem compatíveis com todos os sistemas de equipamento de iluminação de aeródromos existentes contidos na Adivisory Circular (AC) 150/5345-53 - *Airport Lighting Equipment Certification Program*; exigência de garantia de 4 anos para as AGL LED, inclusive dos componentes eletrônicos das AGL; requisitos para fator de potência das luminárias e emissões eletromagnéticas; previsão de que as luminárias com Modulação de Largura de Pulso (*Pulse Width Modulation* - PWM) não podem causar o efeito de tremulação (*flicker*) em humano em movimento (piloto em aeronave).

Peculiaridades relacionadas com características fotométricas das AGL LED

Com foco na segurança das operações aéreas, é importante destacar as peculiaridades apresentadas pelas AGL LED em relação ao espectro luminoso emitido para os pilotos. Conforme citado, as AGL devem atender requisitos fotométricos de cor e intensidade luminosa.

Em relação à cor das luzes de aeródromos, estabelece-se, tanto no RBAC 154 (2012), da ANAC, como no Anexo 14 (2013), da OACI (observa-se que o RBAC 154 é essencialmente baseado no Anexo 14), que a cor definida para um tipo de AGL depende da finalidade ou localização da mesma no aeródromo. A Tabela 4 aponta exemplos de tipos de AGL e a correspondente cor.

Tabela 4 – Cores das Luzes Aeronáuticas de Superfície.

Tipos de AGL	Cores do Tipo de AGL
Luzes de borda de pista de pouso e decolagem	Brancas
Luzes de borda de pista de pouso e decolagem, próximo ao fim da pista	Brancas ou Amarelas

Luzes de fim de pista	Vermelhas
Luzes de cabeceira	Verdes
Sistemas de luzes de aproximação	Brancas/Vermelhas
Sistemas visuais indicadores de rampa de aproximação	Brancas/Vermelhas
Luzes de eixo de pista de pouso e decolagem	Brancas/Vermelhas
Luzes de zona de toque	Brancas
Luzes de borda de pista de táxi	Azuis
Luzes de eixo de pista de táxi	Verdes/Amarelas
Barras de parada	Vermelhas
Luzes de proteção de pista de pouso e decolagem	Amarelas
Luzes de posições intermediárias de espera	Amarelas
Iluminação de pátios de aeronaves	Branca

FONTE: Regulamento Brasileiro de Aviação Civil (RBAC) nº 154 (2012, p. 79 a 119).

Devido à existência de infinitas variações de cor – branco amarelado, azul claro, azul esverdeado, etc., e visando a diferenciação das cores pelos pilotos, é estabelecido, pelo RBAC 154 (2012) que a cor fornecida por determinado tipo de AGL deve se enquadrar na região de Gráfico ou Diagrama de Cromaticidade (Figura 2) definida para aquela cor.

Cada região do gráfico é delimitada por equações. Por exemplo, a região da cor vermelha é delimitada por duas equações ($y = 0{,}980 – x$; $y = 0{,}335$), enquanto a região da cor branca é delimitada por seis equações ($x = 0{,}500$; $x = 0{,}285$; $y = 0{,}440$; $y = 0{,}150 + 0{,}640x$; $y = 0{,}050 + 0{,}750x$; $y = 0{,}382$). Destaca-se que o Gráfico de Cromaticidade e suas respectivas equações, adotadas no RBAC 154 e no Anexo 14, estão de acordo com as especificações da Comissão Internacional de Iluminação (CIE) 2.2, de 1975, e se baseiam em sistema de coordenadas (x, y) e observador padrão adotado na Oitava Reunião da CIE, em 1931. A Figura 3 apresenta Gráfico x,y CIE, 1931, com as cores ilustradas.

Ocorre que o Padrão CIE 2.2, de 1975, foi elaborado para cores de luzes incandescentes. Com o surgimento de fontes luminosas que utilizam tecnologias mais econômicas e propiciam melhor visualização de cor, como o LED, a CIE promulgou outro padrão, o CIE S004, de 2001.

As AGL LED coloridas apresentam gama menor e mais uniforme de comprimentos de onda em relação às AGL convencionais, sendo mais saturadas. As coordenadas x, y das cores (exceto o branco) das AGL LED localizam-se em regiões mais próximas ao Spectrum Locus do Gráfico CIE, 1931. O Spectrum Locus é a curva limite do gráfico, apresenta os valores dos comprimentos de onda visíveis pelo olho humano e representa as coordenadas das cores com comprimento de onda único (comprimentos com valores de 380 a 700 na curva limite das Figuras 2 e 3), denominadas cores idealmente puras ou monocromáticas ideais. As fontes luminosas normais são resultado de uma mistura de cores e emitem uma mistura de vários comprimentos de onda adjacentes. Como as AGL LED apresentam pouca mistura, são ditas mais saturadas, sendo a saturação um parâmetro da cor relacionado com o seu grau de pureza. Quanto mais saturada é a cor, menor é a porcentagem da cor cinza ou branca na sua composição.

As AGL incandescentes filtram a cor branca, com a utilização de filtros coloridos, para emitir luz colorida. No entanto, parte da luz branca passa pelo filtro, obtendo-se cores menos saturadas.

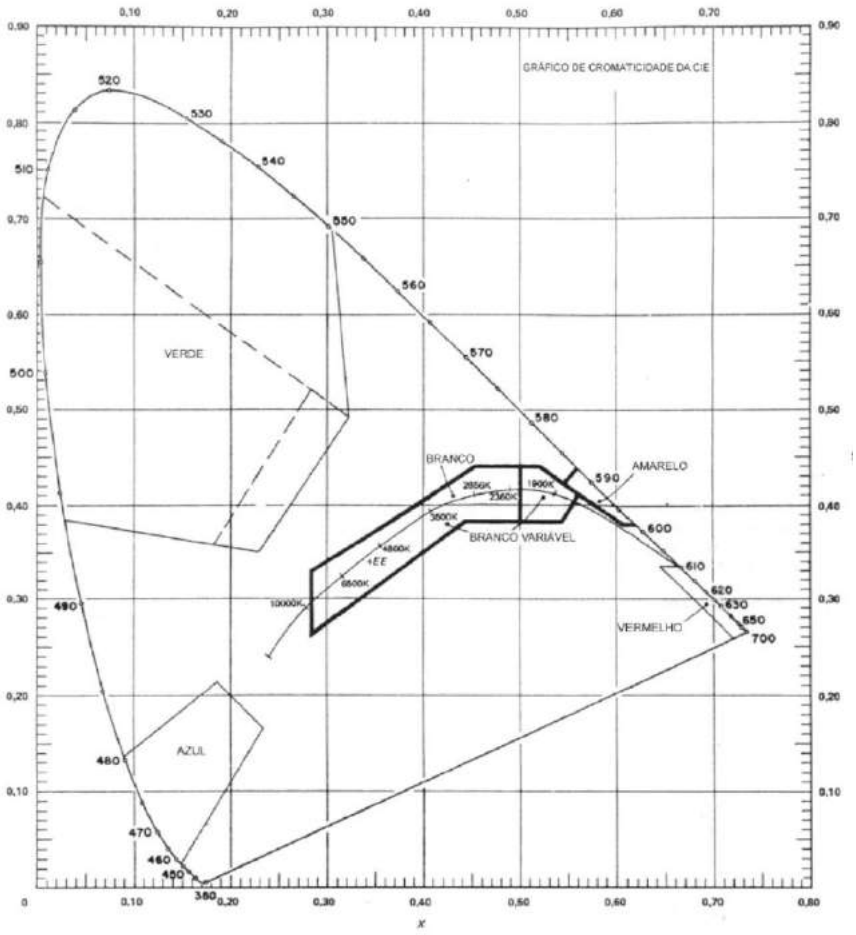


Figura 2 - Gráfico de Cromaticidade da CIE e Regiões das Cores para Luzes Aeronáuticas de Superfície.
FONTE: Regulamento Brasileiro de Aviação Civil (RBAC) nº 154, Emenda nº 01 2012, p. 156.

> *Direct-emitting colored LEDs produce a relatively narrowband spectral output, resulting in highly saturated color appearance... This is in contrast to incandescent sources, which use filters to remove all but the desired wavelengths from a nominally white light source, generally resulting in a relatively desaturated color.* (BULLOUGH *ET AL*, 2012, p. 66)

Já para cor branca, as AGL LED também apresentam diferença significativa de cor em relação às convencionais. As coordenadas das AGL LED brancas localizam-se em região no Gráfico CIE que contém cores que, em termos de probabilidade, são mais reconhecidas pelas pessoas como branca. Característica importante das cores dessa região do Gráfico CIE é apresentar temperatura de cor correlacionada – medida em Kelvin (K) – mais alta. A Figura 3 apresenta o Planckian Locus, que contém as linhas de temperatura de cor correlacionada constante. Segundo Bullough *et al*, *apud* Honjyo and Nonaka (2012, p.9), a percepção do branco puro tende a ocorrer com cores com temperatura de cor correlacionada entre 5.000 K e 10.000 K. Tais temperaturas vêm sendo obtidas pelas AGL LED, que combinam LED azuis com fósforo em sua composição (Bullough *et al*, 2012, p. 66).

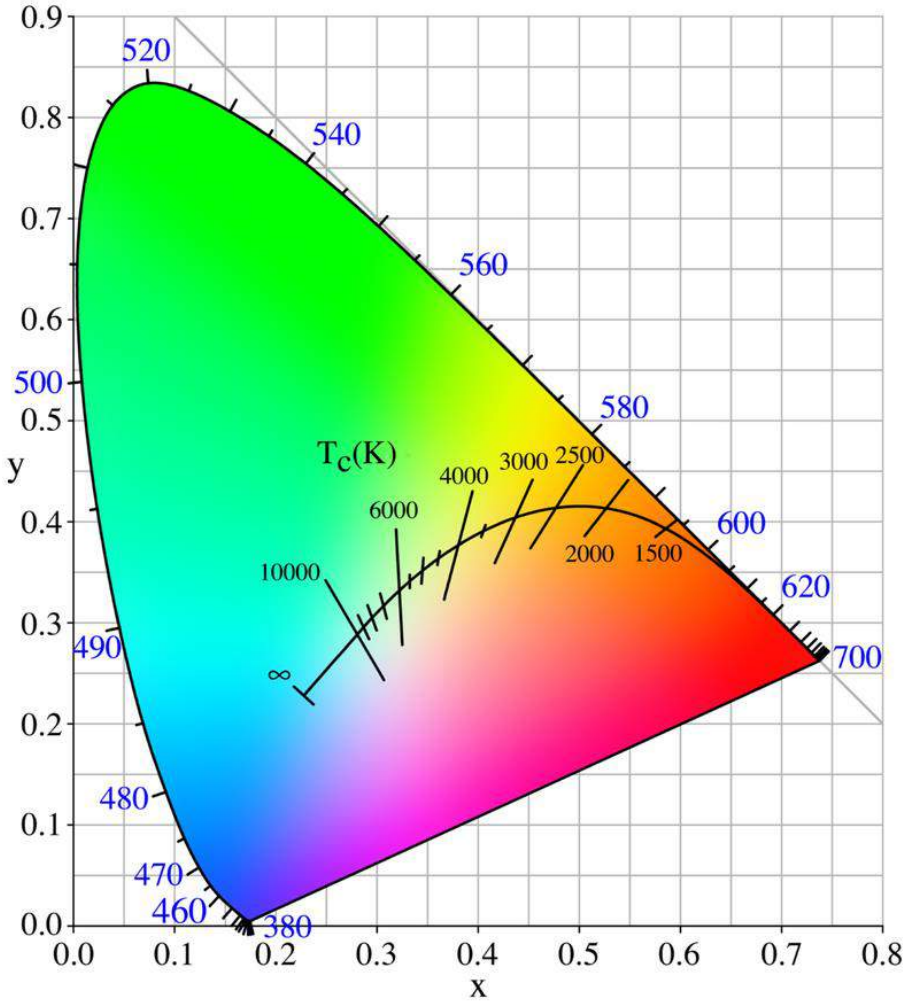


Figura 3 - Gráfico x,y CIE, 1931, com as cores ilustradas, e com o Planckian Locus - linhas de temperatura de cor correlacionada constante (em Kelvin – K).
FONTE: Wikipédia - https://en.wikipedia.org/wiki/Color_temperature#/media/File:PlanckianLocus.png.

O princípio de funcionamento das AGL LED faz com que essas luzes apresentem outra diferença em relação às incandescentes: conforme se altera o nível de brilho ou intensidade luminosa (normalmente, há 3 ou 5 níveis de brilho em AGL), elas não apresentam alteração de cor perceptível. Por exemplo, em níveis mais baixos de intensidade luminosa, as AGL convencionais brancas emitem cor amarelada. Por esta razão, o Gráfico de cromaticidade da CIE em vigor no Anexo 14 prevê, para alguns tipos de AGL, a cor branca variável, amarelada em intensidades luminosas menores.

As mencionadas características das AGL LED proporcionaram, assim, a fabricação de AGL com maior precisão em relação a cores emitidas – maior conspicuidade – e com cores que se mantêm praticamente constantes quando da variação de intensidade luminosa. Exemplificando-se, a FAA/EUA determinava que todas as AGL a serem certificadas nos EUA devem estar de acordo com Gráfico de cromaticidade estabelecido na Society of Automotive Engineers (SAE) Publication SAE-AS25050, de 1998, utilizada pela Advisory Circular 150/5345-46D, de 2009 (Figura 4). Com a crescente implantação das AGL LED nos aeroportos dos EUA, a FAA publicou Gráfico de cromaticidade específico para tais AGL (Figura 5), que

pode ser visto no Engineering Brief 67D, de 2012, e deve ser observado para AGL LED serem certificadas nesse país.

Na OACI, grupo liderado por representante dos EUA, elaborou nos últimos cinco anos proposta para adotar o novo padrão de cores da CIE, S004, 2001, com pequenas alterações, para as AGL LED. Tal proposta está em processo de aceitação pelos países-membros da OACI, para posteriormente ser incorporada ao Anexo 14. A proposta define regiões em Gráfico de Cromaticidade específicas para cores fornecidas por AGL LED. No novo Gráfico, é previsto: maior distanciamento entre a região definida para a cor branca e as regiões definidas para as cores amarela e verde; a regiões das cores verde e branca apresentam menores áreas. Tais diferenças podem ser evidenciadas também se comparando as Figuras 4 e 5, extraídas da regulação da FAA/EUA em vigor, e proporcionam, na prática, melhor diferenciação entre as cores, conferindo mais segurança às operações aéreas.

Além da cromaticidade x,y, o outro parâmetro fotométrico definido pelo Anexo 14, assim como pelo RBAC 154, que deve ser atendido pelas AGL é a intensidade luminosa, medida em Candelas (cd). Este parâmetro varia com a distância na qual devem ser vistas as AGL – por exemplo, AGL de pistas de pouso e decolagem devem ser vistas a uma maior distância do que AGL de pistas de táxi no aeródromo – e com as condições de visibilidade em que o aeródromo será utilizado – dependem principalmente da presença ou não de névoa, fumaça, chuva, neve.

Neste parâmetro, é considerado que os pilotos não podem ser ofuscados por brilho excessivo das AGL. Ocorre que, conforme as AGL LED vêm sendo implantadas e operadas, pilotos têm relatado que estão observando maior brilho das luzes emitidas pelas AGL LED em relação às AGL convencionais.

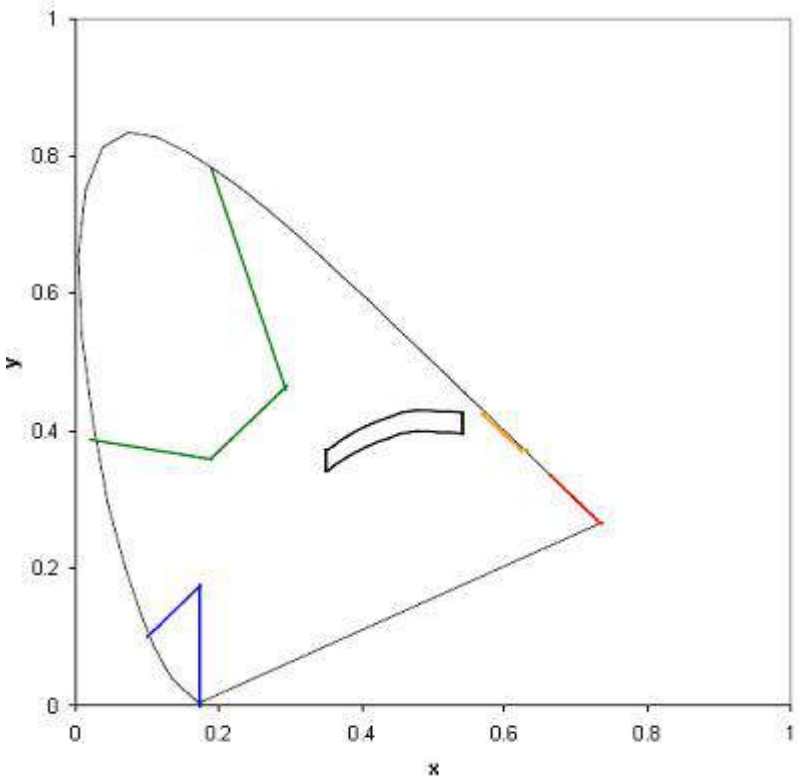


Figura 4 - Gráfico de cromaticidade estabelecido para AGL na Society of Automotive Engineers (SAE) Publication SAE-AS25050, de 1998, utilizada pela Advisory Circular 150/5345-46D, de 2009, da FAA/EUA.
FONTE: Bullough *et al*, 2012, p. 5 e 52.

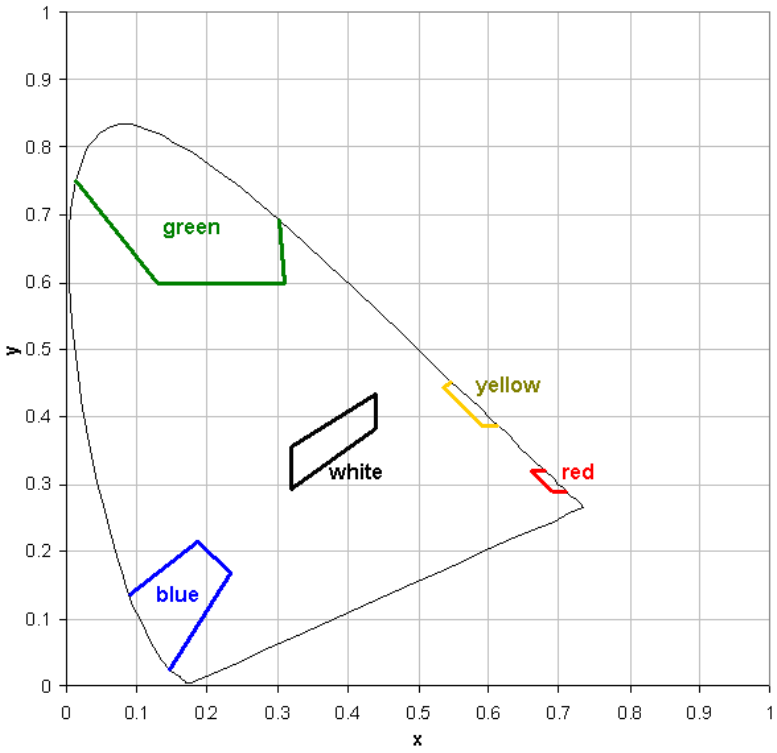


Figura 5 - Gráfico de Cromaticidade obtido com as equações (limites) definidas para AGL LED na Engineering Brief 67D, de 2012, da FAA/EUA.
FONTE: Engineering Brief 67D, 2012, p. 6-8, e Bullough *et al*, 2012, p. 77.

Bullough *et al*, (2015, p. 1-3) apontam que é verídica a percepção dos pilotos e que as diferenças detectadas na cor das AGL LED em relação às AGL convencionais também são responsáveis pela diferença de brilho entre ambas as tecnologias, mesmo que emitam a mesma intensidade luminosa, em Candelas. Ou seja, a maior saturação das cores emitidas, no caso das AGL coloridas, e a maior Temperatura de Cor Correlacionada, no caso das AGL brancas, das AGL LED em relação às convencionais são responsáveis pela percepção do maior brilho das LED. A Figura 6 ilustra, no Gráfico de Cromaticidade adotado pela FAA, para cores verde, azul e branca, a magnitude de diferenças encontradas na cromaticidade x,y de fontes luminosas LED em relação às incandescentes, que repercute no maior brilho das LED.

A fim de definir numericamente a diferença de brilho entre ambas as tecnologias de AGL, foi adotado por Bullough *et al* (2015), fator denominado B/L – Brilho/intensidade luminosa ou Brilho/Luminância. A partir da coleta e tratamento estatístico de dados de brilho para diferentes fontes luminosas LED e incandescentes, comparadas sob as mesmas luminâncias e condições de luminosidade ambiente e sob simulação de névoa, foram calculados e recomendados valores médios preliminares para o fator B/L, conforme Tabela 5. O estudo conclui ainda que, em condições de névoa, ocorre "desaturação" da luz emitida pela AGL LED. Portanto, para tais condições, a redução da intensidade luminosa das AGL LED a partir do fator B/L poderia acarretar na percepção de menor brilho das AGL LED em relação às incandescentes.

Tabela 5 – Cores das Luzes Aeronáuticas de Superfície.

Cor da AGL	Fator B/L
Branca	1,6
Verde	1,4
Azul	1,4

FONTE: Bullough *et al* (2015, p. 23).

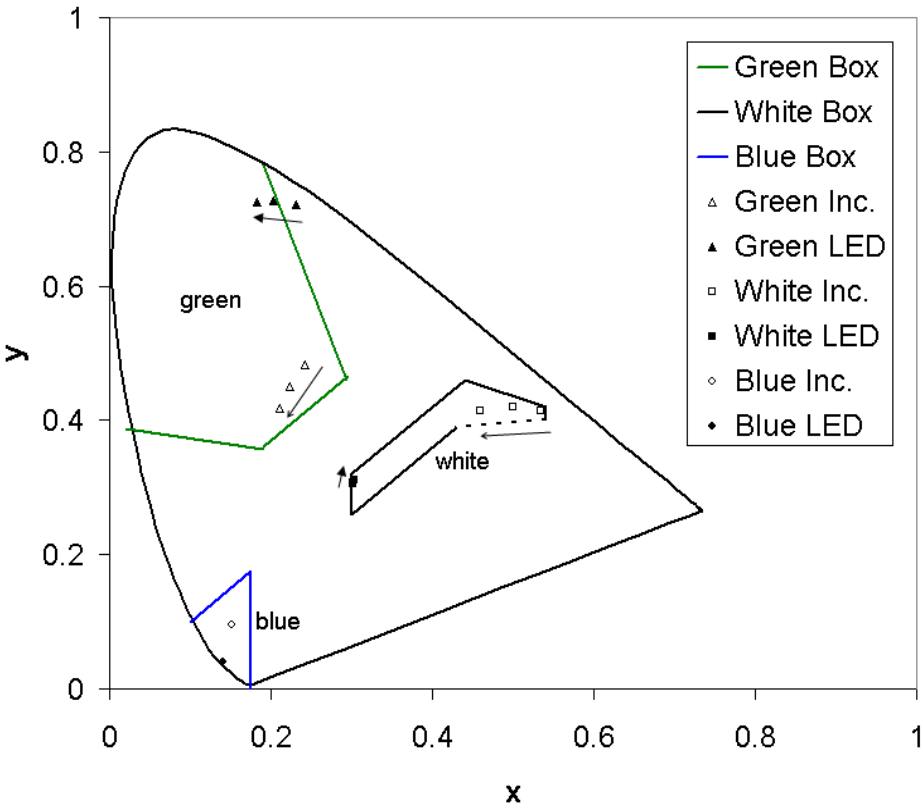


Figura 6 - Gráfico de Cromaticidade da FAA/EUA (de AGL incandescentes), com localização de cores de fontes luminosas LED e incandescentes.
FONTE: Bullough *et al* (2015, p. 3).

O fator B/L ainda não foi incorporado nas normas da FAA/EUA. Porém, ao longo dos anos, requisitos relacionados com características fotométricas das AGL LED vêm sendo incorporados na regulação da FAA/EUA (Engineering Brief 67D, 2012; Advisory Circular 150/5340-30H, 2014), podendo ser citados os seguintes:

1. Regiões de cromaticidade, no Gráfico de Cromaticidade CIE, específicas para as cores das AGL LED, como já explicitado.

2. Curva intensidade de corrente elétrica (em Amperes) x intensidade luminosa (em Candelas) parabólica, simulando a curva parabólica emitida pelas AGL convencionais. O requisito visa corrigir diferenças entre as intensidades luminosas emitidas por ambas as tecnologias. Enquanto as AGL LED emitem curvas lineares, as convencionais emitem curvas parabólicas. A correção implica na adição de dispositivos eletrônicos nas AGL LED pelos fabricantes.

3. Obrigatoriedade de Regulador de Corrente Constante com 5 níveis de brilho para circuitos elétricos de alta intensidade de luzes de eixo de pista de táxi e luzes de posição intermediária de espera, não sendo mais permitidos apenas 3 níveis. Enquanto os CCR de 3 níveis possibilitam o acionamento de correntes elétricas de 4,8 Amperes (A), 5,5A e 6,6A, os de 5 níveis possibilitam o acionamento de correntes de 2,8A, 3,4A, 4,1A, 5,2A e 6,6A.

4. Não é permitido instalar AGL LED ao trocar uma AGL convencional com defeito, nem intercalar ou misturar AGL LED em quaisquer tipos de AGL de pista de pouso e decolagem ou pistas de táxi.

Aspecto muito importante também surgido com as peculiares características fotométricas das AGL LED é o fato de seu espectro não ser identificado por alguns equipamentos embarcados em aeronaves, como o Enhanced Vision System (EVS) – Sistema de visão melhorada – e o Night Vision Goggles (NVG) – Óculos de visão noturna. Alguns desses equipamentos auxiliam os pilotos fornecendo imagens obtidas por meio da identificação de ondas infravermelhas (responsáveis por emissão de calor) do Espectro Eletromagnético, naturalmente emitidas pelas AGL incandescentes, mas não emitidas pelas AGL LED. Assim, conforme o Anexo 14 (2013, p. 10-4), é recomendado que os operadores de aeródromos publiquem informação aos aeronavegantes quando suas AGL forem substituídas por LED. Porém, pela mesma razão, a FAA/EUA, no Airport Improvement Program Handbook (Order 5100.38D, 2014, p. D-1, J-2 e K-3), informa que não financia projetos para instalação de AGL LED em Luzes de borda de pista de pouso e decolagem de alta intensidade, Luzes de aproximação e Luzes de obstáculo.

Também devido a não emissão de ondas infravermelhas, as AGL LED não derretem neve ou gelo. Por este motivo, há aeródromos, localizados em locais onde ocorre deposição de gelo ou neve, que instalam AGL LED com "kit ártico" acoplado, com dispositivos aquecedores. Tal kit é previsto na regulação dos EUA, porém, consta na AC 150/5345-53D Appendix 3 Addendum, 2015, que apresenta as AGL certificadas pela FAA, que elementos infravermelhos presentes não são testados nem certificados quanto a serem compatíveis com qualquer equipamento de visão noturna.

Em relação aos cuidados que devem ser tomados devido às peculiaridades das características fotométricas das AGL LED, a ANAC tem publicado em seu website o Alerta aos Operadores de Aeródromo nº 001/2014. O Alerta recomenda que: devem ser escolhidos fornecedores com produtos instalados e autorizados a funcionar em aeroportos da América do Norte, Europa ou Japão; aeroportos com autorização do Comando da Aeronáutica para operações específicas, abaixo dos mínimos meteorológicos usuais, por aeronaves com equipamentos embarcados com os EVS, devem entrar em contato com o órgão antes da implantação de AGL LED; não se misture ou não se intercale as AGL LED com as convencionais; a implantação das AGL LED deve ser publicada nas informações aeronáuticas, de forma a alertar os aeronavegantes com EVS embarcado.

3. CONCLUSÃO

Conforme exposto, as AGL LED apresentam características que a tornam vantajosa, sob os pontos de vista ambiental, econômico e de segurança, em relação às AGL convencionais. Tais vantagens vêm contribuindo para que as AGL LED venham gradualmente substituindo as AGL convencionais, nos aeródromos brasileiros e pelo mundo.

Buscando adquirir, organizar e repassar conhecimento científico relacionado com o tema, com base nas referências bibliográficas, primeiramente, expuseram-se as diferenças entre os princípios de funcionamento de ambas as tecnologias. A partir daí, explicaram-se a maior eficiência energética e econômica possível com a utilização das AGL LED. Foi apontando ainda

que, para a maximização do alcance das vantagens oferecidas pela tecnologia LED, é necessária a compatibilização dos circuitos elétrico-eletrônicos existentes, tendo sido citados alguns dispositivos que podem ter que ser substituídos ou inseridos.

Focando-se na segurança das operações aéreas, foram explicadas as peculiaridades das AGL LED relacionadas com suas características fotométricas e as consequentes vantagens para a segurança e conflitos com sistemas e operações existentes. Por fim, foram apontadas as soluções que vêm sendo buscadas para alguns dos conflitos até então constatados e as consequentes incorporações em normas ou publicações de avisos e alertas internacionais e nacionais.

4. REFERÊNCIAS

ADB GROUP. LED AGL Whitepaper, 2015. *Leading the way to more cost effective, efficient and environment-friendly airfields*. Disponível em: http://www.adb-air.com/media/36411/LED-AGL-Whitepaper-ADB-Group-20150216.pdf.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL – ANAC. Alerta aos Operadores de Aeródromo nº 001, 2014. *Instalação de lâmpadas LED em balizamento de pistas de pouso e decolagem*. Disponível em: http://www2.anac.gov.br/infraestrutura/alerta.asp.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL – ANAC. Regulamento Brasileiro de Aviação Civil (RBAC) nº 154, Emenda nº 01. *Projeto de Aeródromos*. Resolução ANAC nº 238, 2012. Disponível em: http://www2.anac.gov.br/biblioteca/rbac/RBAC154EMD01.pdf.

ALF, EDUARD. Visual Aids Working Group/10-Discussion Paper/01, 2013. Tenth Meeting of the Visual Aids Working Group/Aerodrome Panel/OACI. *Colour specification for LED lighting.*

AIR NAVIGATION COMMISSION/OACI. State Letter AN 4/1.1.54-14/97, 2014. *Proposals for the amendment of Annex 14, Volumes I and II and Annex 15.*

BONANNI, ROBERT. Aerodrome Panel/3 - Working Paper/4, 2014. Aerodromes Panel (AP)/OACI third meeting. *Flashing Characteristics and Colour Specification for Led Lighting.*

BULLOUGH, J.D., SKINNER, NICHOLAS P., BIERMAN, ANDREW, MILBURN, NELDA J., TARANTA, RACHEL T., NARENDRAN, N., GALLAGHER, DONALD W. Technical Note DOT/FAA/TC-TN12/61, 2012. *Nonincandescent Source Aviation Signal Light Colors.* Disponível em: http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/tctn12-61.pdf.

BULLOUGH, JOHN D.; TAN, JIANCHUAN; NARENDRAN, N.; FREYSSINIER, JEAN PAUL. FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, Galloway, New Jersey, EUA, 2014. *Understanding Flicker in Airfield Lighting Applications.* Disponível em: http://www.airtech.tc.faa.gov/ATT2014/Papers/S10107%20-%20Bullough%20et%20al.pdf.

BULLOUGH, J.D.; YUAN, Z.; REA, M.S.; GALLAGHER, DONALD W. Technical Note DOT/FAA/TC-TN15/32, 2015 - *Brightness/Luminous Intensity Values for Blue, White, and Green Aviation Signal Lights Using Light-Emitting Diodes*. Disponível em: http://www.airporttech.tc.faa.gov/Download/Airport-Safety-Papers-Publications-Detail/dt/Detail/ItemID/559/BrightnessLuminous-Intensity-Values-for-Blue,-White,-and-Green-Aviation-Signal-Lights-Using-Light-E.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION - FAA. Advisory Circular 150/5345-46D, 2009. *Specification for Runway and Taxiway Light Fixtures.* Disponível em: https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/150_5345_46d.pdf.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION - FAA. Advisory Circular 150/5345-53D Appendix 3 Addendum, 2015. *This listing contains a complete update of the certified equipment and manufacturers lists, addendum to appendix 3 and appendix 4, of advisory circular 150/5345-53d, airport lighting equipment certification program, dated 09/26/12. Equipment not listed here, but listed in prior Addendums to the advisory circular have been deleted.* Disponível em: https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/150_5345_53d_addendum.pdf.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION - FAA. Engineering Brief nº 67D, 2012. *Light Sources other than Incandescent and Xenon for Airport and Obstruction Lighting Fixtures.* Disponível em: http://www.faa.gov/airports/engineering/engineering_briefs/.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION - FAA. Information for Operators 11004, 2011. *Enhanced Flight Vision System (EFVS), Enhanced Vision Systems (EVS), and Night Vision Goggles (NVG) compatibility with Light-Emitting Diodes (LEDs) at airports and on obstacles*. Disponível em:

https://www.faa.gov/other_visit/aviation_industry/airline_operators/airline_safety/info/all_infos/.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION - FAA. Order 5100.38D, 2014. *Airport Improvement Program Handbook.* Disponível em: www.faa.gov/airports/aip/aip_handbook/.

FLORIDA CENTER FOR ENVIRONMENTAL STUDIES (CES), FLORIDA ATLANTIC UNIVERSITY. *Energy: The Driver of Climate, Electromagnetic Radiation.* Disponível em: http://www.ces.fau.edu/nasa/module-2/radiation-sun.php.

FREYSSINIER, JEAN PAUL. International Airport Review Magazine, Construction & Design Supplement, Volume 18, Issue 2, 2014. *The Long-Term Performance of LEDs.* Disponível em: http://www.internationalairportreview.com

LEEMING, PETER. International Airport Review Magazine, Airfield Lighting Supplement, Volume 18, Issue 6, 2014. *Heathrow Airport: Lighting the way*. Disponível em: http://www.internationalairportreview.com.

LOGAN, ALVIN. Visual Aids Working Group/9 - Discussion Paper/04, 2012. Ninth Meeting of the Visual Aids Working Group/Aerodrome Panel/OACI. *Proposed Chromaticity Boundaries for Light-Emitting Diode Signal Lights.*

MAI, TOM – ICAO Regional Workshop, Banguecoque, Tailândia, 2015. *FAA Visual Aids - Signage & Lighting.* Disponível em:
(http://www.icao.int/APAC/Meetings/2015%20VisualAids/Bangkok%20brief_Tom%20Mai.pdf.

ORGANIZAÇÃO DE AVIAÇÃO CIVIL INTERNACIONAL – OACI. Anexo 14 à Convenção de Aviação Civil Internacional, Volume 1, Sexta Edição, 2013. *Aerodrome Design and Operations*.

ORGANIZAÇÃO DE AVIAÇÃO CIVIL INTERNACIONAL – OACI. Doc 9157, Part 5, 1983. *Aerodrome Design Manual, Eletrical Systems.*

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, OF THE NATIONAL ACADEMIES. Airport Cooperative Research Program – Synthesis 35, 2012. *Issues With Use of Airfield LED Light Fixtures*. Disponível em: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/acrp/acrp_syn_035.pdf.

UNIVERSIDADE CÂNDIDO MENDES. Material Didático – Eletrônica, 2015. Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

WIKIPÉDIA, A ENCICLOPÉDIA LIVRE – Artigos disponíveis em: https://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1931_color_space;
https://en.wikipedia.org/wiki/Color_temperature;
https://en.wikipedia.org/wiki/Planckian_locus;
https://pt.wikipedia.org/wiki/Saturação;
https://pt.wikipedia.org/wiki/Temperatura_de_cor.