

Efectos de la Tensión de Batería en  
Lámparas Fluorescentes para Uso en  
Instalaciones Fotovoltaicas

F. García Rosillo  
M. A. Egido Aguilera



Toda correspondencia en relación con este trabajo debe dirigirse al Servicio de Información y Documentación, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Ciudad Universitaria, 28040-MADRID, ESPAÑA.

Las solicitudes de ejemplares deben dirigirse a este mismo Servicio.

Los descriptores se han seleccionado del Thesaurus del DOE para describir las materias que contiene este informe con vistas a su recuperación. La catalogación se ha hecho utilizando el documento DOE/TIC-4602 (Rev. 1) Descriptive Cataloguing On-Line, y la clasificación de acuerdo con el documento DOE/TIC.4584-R7 Subject Categories and Scope publicados por el Office of Scientific and Technical Information del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

Se autoriza la reproducción de los resúmenes analíticos que aparecen en esta publicación.

Catálogo general de publicaciones oficiales  
<http://www.060.es>

**Depósito Legal:** M -14226-1995

**ISSN:** 1135 - 9420

**NIPO:** 471-08-048-0

Editorial CIEMAT

## CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

S14

S25

LIGHTING SYSTEMS; FLUORESCENT LAMPS; PHOTOVOLTAIC CELLS; BALLASTS;  
PHOTOVOLTAIC CONVERSION; ELECTRICAL PROPERTIES; TEMPERATURE  
CONTROL; ELECTRODES

## **Efectos de la Tensión de Batería en Lámparas Fluorescentes para Uso en Instalaciones Fotovoltaicas**

García Rosillo, F.; Egidio Aguilera, M. A.\*

44 pp. 28 fig. 23 ref.

### **Resumen:**

Es conocida la importancia de la iluminación con lámparas fluorescentes y balastos electrónicos en sistemas fotovoltaicos aislados. Las características positivas de las lámparas fluorescentes a veces no se ven desarrolladas en su totalidad, debido a la incorrecta elección del balasto. El fallo de una lámpara del sistema fotovoltaico puede tener gran importancia en la apreciación subjetiva del sistema fotovoltaico por parte de los usuarios.

El objetivo del presente trabajo es analizar el comportamiento de dos lámparas fluorescentes muy similares, alimentadas con balastos electrónicos diferentes, mostrando la gran influencia que tiene la topología electrónica del balasto en el funcionamiento en la lámpara fluorescente. En particular se pretende analizar el efecto de la variación de la tensión de entrada al balasto en las características eléctricas y luminosas de las muestras, así como comprender cuales son los parámetros eléctricos que pueden afectar al tiempo de vida de la lámpara fluorescente. También se analiza la temperatura de funcionamiento de los electrodos y se estima el tiempo requerido para su enfriamiento después de apagar la lámpara.

## **Effects of Battery Voltage in Fluorescent Lamps for Use in Photovoltaic Systems**

García Rosillo, F.; Egidio Aguilera, M. A.\*

44 pp. 28 fig. 23 ref.

### **Abstract:**

It is known the importance of lighting systems with fluorescent lamps and electronic ballast in isolated photo-voltaic systems. The positive characteristics of the fluorescent lamps sometimes are not developed in full, due to the incorrect choice of ballast. The failure of a lamp in the photovoltaic system can have great significance in the subjective perception of the user for the complete system.

The purpose of this study is to analyze the behavior of two very similar fluorescent lamps, fed with different electronic ballasts, showing the great influence of the electronic ballast topology in the operation of the fluorescent lamp. In particular, this work aims to analyze the effect of variations of the input voltage to the ballast in the electrical and luminous characteristics of the lamp, as well as to understand the influence of electrical parameters in the life time of the fluorescent lamp. It is also analyzed the operating temperature of the electrode and the time necessary for electrode cooling after switching off the lamp.

\*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica de Madrid



## INDICE

<b>1</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Iluminación con lámparas fluorescentes. El balasto.....</b>	<b>3</b>
2.1	<i>Aspectos básicos de la lámpara fluorescente.....</i>	3
2.2	<i>Física del funcionamiento de la descarga.....</i>	6
2.3	<i>El balasto.....</i>	11
2.4	<i>Arranque en caliente. Balastos con Pre calentamiento de cátodos.....</i>	14
2.5	<i>Arranque en frío. Balastos de encendido instantáneo.....</i>	15
<b>3</b>	<b>Descripción de las muestras y datos previos.....</b>	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>Influencia del estado de carga de la batería.....</b>	<b>19</b>
4.1	<i>Emisión luminosa.....</i>	20
4.2	<i>Curva I-V de la Lámpara.....</i>	22
4.3	<i>Potencia consumida.....</i>	23
4.4	<i>Factor de cresta de corriente y frecuencia de la onda de tensión.....</i>	26
<b>5</b>	<b>Tensión de entrada al balasto y tiempo de vida.....</b>	<b>27</b>
5.1	<i>Justificación de la relación entre la tensión de entrada y el tiempo de vida.....</i>	29
<b>6</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>32</b>
<b>7</b>	<b>Apéndice. Enfriamiento de los electrodos.....</b>	<b>34</b>
<b>8</b>	<b>Referencias.....</b>	<b>44</b>



# 1 Introducción

Es conocida la importancia de la iluminación con lámparas fluorescentes y balastos electrónicos en sistemas fotovoltaicos aislados<sup>1</sup>, situados principalmente en el medio rural. Entre todos los tipos de iluminación (incandescente, halógena, sodio, LEDs etc) la lámpara fluorescente con balasto electrónico muestra una amplia gama de flujos luminosos y propiedades de color que permiten cubrir cualquier aplicación.

Asimismo, la apropiada selección del balasto permite que el aparato de iluminación con lámpara fluorescente pueda ser alimentado por corriente continua en una instalación de energía solar fotovoltaica. En caso de que la instalación posea inversor, las lámparas fluorescentes pueden ser utilizadas en combinación con balastos de corriente alterna.

El rendimiento luminoso de una lámpara fluorescente se sitúa en valores superiores a 60 lm/W (balasto incluido). En la mayoría de los casos la degradación del flujo luminoso a lo largo del tiempo de vida de la lámpara no supone un grave inconveniente. El tiempo de vida de las lámparas fluorescentes es, en general, superior al de las lámparas de otras tecnologías.

El precio de adquisición de la lámpara fluorescente y su balasto es siempre superior al de la lámpara incandescente. En comparación con las lámparas halógenas puede ser igual o superior. Sin embargo, este incremento en el precio de adquisición es compensado por el ahorro energético debido al alto rendimiento luminoso y largo tiempo de vida de las lámparas fluorescentes. Así pues, la lámpara fluorescente se muestra como el mejor candidato para su aplicación en viviendas equipadas con sistemas fotovoltaicos. Las lámparas de vapor de Sodio tienen unas características óptimas para ser utilizadas en la iluminación vial o aplicaciones similares, encuadrables en lo que se suele denominar farolas fotovoltaicas. Asimismo, las lámparas de LEDs empiezan a jugar un importante papel en la iluminación convencional, extendiendo su rango de aplicación a medida que se va desarrollando esta tecnología.

Hay que señalar que estas características positivas de la lámpara fluorescente a veces no se ven desarrolladas en su totalidad, debido a la incorrecta elección del balasto y con menor frecuencia a la baja calidad de algunas lámparas. Esto es de gran importancia, puesto que el fallo de una carga del sistema fotovoltaico autónomo puede tener gran importancia en la apreciación subjetiva que perciben los usuarios del sistema completo. No es en absoluto infrecuente que las lámparas fluorescentes y sus balastos proporcionen un inadecuado servicio en una instalación fotovoltaica autónoma.

El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento de dos lámparas fluorescentes muy similares, alimentadas con balastos electrónicos diferentes, mostrando la gran influencia que tienen diferentes topologías de balasto en el funcionamiento de las lámparas fluorescentes. Los balastos electrónicos de alta frecuencia (en torno a 15 kHz), se conectan a baterías fotovoltaicas como fuente de alimentación. Las combinaciones lámpara-balasto analizadas son bien distintas (a pesar de que las lámparas son casi idénticas) en cuanto al resultado de su funcionamiento con

---

<sup>1</sup> En el presente trabajo nos referiremos a la lámpara fluorescente como el dispositivo en el cual se genera la luz a partir de procesos de descarga en gases, no incluyendo esta denominación el necesario equipo de acondicionamiento de potencia, que será denominado balasto. Por luminaria se entenderá el dispositivo que da soporte físico al balasto y la lámpara fluorescente y que eventualmente distribuye la luz generada por la lámpara (incluyendo algún dispositivo reflector, refractor o difusor de luz si lo hubiera). La denominación luminaria incluye el balasto, pero no así la lámpara. Finalmente utilizaremos la denominación aparato de iluminación para el conjunto formado por la lámpara y la luminaria.

sus respectivos balastos, especialmente en lo que concierne a su tiempo de vida: Mientras una de las muestras alcanza un alto tiempo de vida, superior al esperado, la otra solo alcanza un 18 % del tiempo de vida nominal. Se pretende analizar el efecto de la variación de la tensión de entrada al balasto en las características eléctricas y luminosas de las muestras, así como comprender cuales son los parámetros de la alimentación que los respectivos balastos suministran a las lámparas que pueden tener una influencia en el tiempo de vida de la lámpara fluorescente.

La estructura del presente trabajo se inicia con una introducción al funcionamiento de lámparas y balastos, en el Capítulo 1. El Capítulo 2 presenta la medida de algunos de los parámetros básicos que caracterizan a las dos muestras analizadas (flujo luminoso, potencias consumidas, tiempo de vida etc). A continuación, el capítulo 3 describe los resultados de variar la tensión de entrada del balasto, en lo que respecta a las características eléctricas y luminosas más importantes. En el capítulo 4 se propone un modelo simple que relaciona el tiempo de vida de las lámparas fluorescentes con la tensión de arco, medida en los extremos del tubo fluorescente, para a continuación relacionar el tiempo de vida con la tensión suministrada por la batería. El siguiente capítulo plantea una posible justificación teórica del modelo anterior. Las conclusiones del presente trabajo son expuestas en el capítulo 6, habiéndose añadido un apéndice con material adicional, consistente en la medida de la temperatura de funcionamiento de los electrodos y una estimación del tiempo de enfriamiento de estos.

## **2 Iluminación con lámparas fluorescentes. El balasto**

Las referencias fundamentales para elaborar el presente capítulo han sido 1,2,3 y especialmente 4.

### **2.1 Aspectos básicos de la lámpara Fluorescente**

La lámpara fluorescente es una fuente de luz del tipo de descarga de gases a baja presión. En ella la luz visible es generada principalmente por un polvo fluorescente activado por la energía ultravioleta generada en un arco eléctrico de mercurio. La lámpara consiste en una cavidad tubular recta o doblada, con tubos gemelos o helicoidal, con un electrodo encerrado en cada extremo de la cavidad. La cavidad contiene vapor de mercurio a baja presión (1.3 Pa), con una pequeña cantidad de gas inerte (200 Pa a 660 Pa) que participa en el encendido y que contiene el arco. La pared interior de la cavidad de vidrio esta recubierta con polvo fluorescente, comúnmente denominado fosforescente.

Cuando se aplica una tensión eléctrica apropiada entre los electrodos, se genera un arco eléctrico, producido por la corriente que fluye entre los electrodos y a través del vapor de Mercurio. Esta descarga genera alguna radiación visible (10 %), pero sobre todo radiación ultravioleta invisible (90 %) de longitudes de onda 254 nm y 185 nm. La radiación UV excita la sustancia fluorescente de la pared, que emite luz visible. El fosforescente usualmente utilizado es seleccionado y mezclado para que corresponda del modo más eficiente a la energía ultravioleta de longitud de onda 254 nm, que es la energía principal generada en una descarga de baja presión en mercurio. En el balance completo de la energía consumida por una lámpara fluorescente (sin incluir balasto), aproximadamente un 28 % se emplea en producir luz visible, mientras el resto de la potencia se pierde en forma de calor.

Como en la mayoría de las descargas en gases, la lámpara ha de funcionar en serie con un dispositivo limitador de corriente. Este dispositivo, comúnmente denominado balasto o reactancia, idealmente limita la corriente al valor para el cual la lámpara fue diseñada. También es responsable del proceso de encendido y operación a la tensión adecuada de la lámpara.

La lámpara fluorescente esta construida con cavidades tubulares de vidrio, cuyo diámetro varía entre 12 mm y 54 mm y su longitud entre 100 mm y 2440 mm. La cavidad es designada con una letra que indica la forma, seguida de un número que indica el diámetro máximo en octavos de pulgada. Así "T-17" indica una lámpara fluorescente tubular (T) de diámetro 17/8 pulgada, es decir 54 mm.



**Figura 1:** Algunos ejemplos de lámparas fluorescentes: Arriba tubular F8T5, abajo, de izquierda a derecha, compacta con balasto integrado, compacta de tubos gemelos sin balasto y compacta de cuatro tubos “quad” (la cavidad fluorescente es en realidad única).

La lámpara fluorescente se puede construir con otras formas, como circulares, helicoidales, en forma de U etc. También existen diámetros especiales así como tubos gemelos (en forma de U). La Figura 1 presenta ejemplos de las lámparas fluorescentes mas comunes.

Los electrodos se sitúan en los extremos del tubo, herméticamente encerrados en la cavidad. Están diseñados para funcionar como cátodos o electrodos fríos o calientes. El cátodo caliente se construye generalmente con un hilo de tungsteno, al cual a veces rodea otro hilo de tungsteno más fino. Esta espiral de tungsteno esta recubierta con un material que consiste en una mezcla de óxidos de elementos alcalino-térreos (usualmente Ba), diseñados para realizar emisión térmica de electrones desde los electrodos.

La diferencia de potencial entre el electrodo y una alta densidad de iones positivos que aparece frente al cátodo se denomina caída catódica. La alta densidad de iones positivos mencionada se denomina escudo catódico. Estos iones son atraídos al cátodo por la carga negativa de este último. Volveremos a analizar el escudo y la caída catódica mas adelante. La corriente de operación normal de una lámpara de cátodo caliente alcanza hasta 1.5 A, con una caída catódica relativamente baja, en torno a 10 V. Los electrodos de cátodo frío funcionan con corrientes del orden de unos cientos de miliamperios, con una alta caída catódica, en torno a 50 V. Como consecuencia de la baja caída catódica asociada a los cátodos calientes, estas lámparas son más eficientes y en consecuencia, actualmente la mayoría de las lámparas fluorescentes son diseñadas para operación en modo de cátodo caliente.

La estructura de los electrodos realiza tres funciones: suministrar electrones a la descarga, recoger iones en el semiciclo de cátodo y recibir electrones en la fase de ánodo. Un recubrimiento de cátodo que alcance la emisión termiónica rápidamente, suministrará electrones a la descarga de arco y minimizará la erosión de los cátodos durante el encendido: Durante el funcionamiento normal, cuando el electrodo es negativo (modo cátodo) respecto a la descarga que lo rodea, los electrones emitidos por efecto Shottky anómalo (adopción de la mínima función de trabajo en presencia de un campo eléctrico acelerador, el generado por la caída o escudo catódico) son acelerados a través del escudo catódico hasta la zona de emisión luminosa, debido a la diferencia de potencial a lo largo de la lámpara. Estos electrones colisionan con átomos de Mercurio y argón cediendo su energía para producir iones de Mercurio. Los iones que alcanzan el electrodo lo golpean con una energía igual a la energía cinética ganada al atravesar la región de caída catódica.

Durante el encendido y salvo que se haya procedido a un calentamiento previo de los electrodos, haciendo circular por ellos una corriente de caldeo (precalentamiento) la caída catódica es alta y usualmente mayor que durante el funcionamiento normal. Con altas caídas catódicas, los iones incidentes son capaces de arrancar material de la superficie del electrodo, resultando un severo fenómeno de sputtering, a causa de las altas energías cinéticas de los iones. Durante el funcionamiento normal, la propia corriente de arco calienta los electrodos, asistida con una corriente de calentamiento adicional en caso de haber sido diseñado así el balasto. En caso de predominar la emisión térmica de electrones, se dice que la lámpara funciona en modo de descarga de arco. Si por el contrario predomina la emisión de electrones por bombardeo iónico de los electrodos (emisión de electrones secundarios), se dice que la lámpara funciona en modo de descarga luminiscente, comúnmente denominada con su término inglés, glow discharge o simplemente glow.

Dentro de la cavidad de la lámpara fluorescente y junto al gas de mercurio, existe un gas inerte o combinaciones de gases inertes a baja presión que facilitan el encendido de la lámpara, contienen la descarga y además juegan un papel en la conservación de la cubierta emisora de electrones de los electrodos. El gas inerte comúnmente empleado en lámparas estándar es el argón, mientras en lámparas más eficientes (ahorradoras de energía) el argón está mezclado con kriptón, un gas más pesado que el argón y con el cual las pérdidas de energía de los electrones que colisionan con el gas inerte son menores. Otras lámparas utilizan una mezcla de neón y argón o neón, xenón y argón. Los gases nobles del interior del tubo fluorescente moderan la velocidad de difusión ambipolar (dinámica de iones y electrones desde la parte central del gas hacia las paredes del tubo) lo cual establece el balance requerido entre ionización de los átomos de mercurio para mantener la descarga y excitación para producir radiación UV. Asimismo amortigua el bombardeo iónico de los electrodos y su recubrimiento, reflejando y redistribuyendo hacia el electrodo el material sputterado, prolongando así la vida de la lámpara. Finalmente facilitan el encendido al reducir la tensión necesaria para iniciar la descarga.

El color producido por una lámpara fluorescente depende de la mezcla de sustancias fluorescentes utilizadas para recubrir la pared interior de la cavidad. Existen diferentes gamas de colores, cada una con características espectrales determinadas por la mezcla de sustancias fluorescentes.

Históricamente, las gamas de color más utilizadas han sido “blanco frío ” (4000 K), “blanco” (3500 K) y “blanco cálido” (3000 K). Las temperaturas señaladas corresponden a la denominada temperatura de color correlacionada, que es la temperatura del cuerpo negro emitiendo una radiación de un color mas similar al de la lámpara. Estas lámparas constan de un espectro combinado de una línea espectral visible producida directamente por la excitación del mercurio y desviación la trayectoria de electrones (10 %) y un espectro continuo producido por la excitación del fosforescente.

Una de las selecciones de fosforescentes que han alcanzado mayor aceptación es la de fosforescentes formados por tierras raras. Se han desarrollado fosforescentes de tierras raras de alta eficiencia y excelente reproducción cromática, con bandas estrechas de emisión que tienen sus máximos en 610 nm en el rojo, 545 nm en el verde y 450 nm en el azul. Mediante la utilización de mezclas de estos fosforescentes de colores primarios, denominados trifósforos, se pueden obtener lámparas con un elevado rendimiento de color, buen mantenimiento del flujo luminoso y alta eficacia.

Puesto que estos nuevos fosforescentes son más caros que los convencionales, se suele emplear un sistema de doble recubrimiento, con la mezcla trifósforo más cercana a la descarga de modo que la mayor parte de la luz visible es generada en la capa trifósforo. La luz ultravioleta restante es transformada en la capa convencional, mas cercana a la parte exterior del tubo. Así se consigue un efecto similar a un coste menor en materia prima. La mayoría de las lámparas tienen una temperatura de color correlacionada de 3000 K hasta 4100 K.

Existe una variedad de tipos de lámparas fluorescentes diseñadas para generar radiación en regiones especiales del espectro, con propósitos específicos, tales como crecimiento de plantas, comercio, terapias médicas etc.

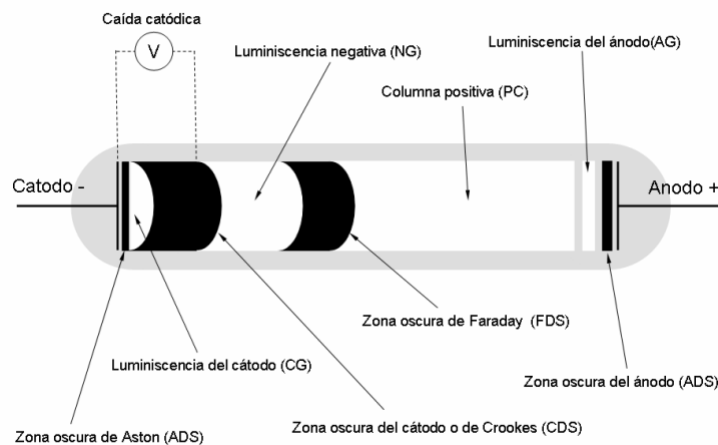
## ***2.2 Física del funcionamiento de la descarga***

Todas las lámparas de descarga convierten la energía en luz mediante la transformación de energía eléctrica en la energía cinética del movimiento de los electrones, que a su vez es convertida en radiación a resultas de algún tipo de proceso de colisión. El principal proceso es la excitación de átomos de Mercurio por colisión con electrones. Los electrones de los átomos son excitados hasta estados desde los cuales se vuelven a relajar hasta su nivel energético más bajo, mediante la emisión de radiación electromagnética.

La nube electrónica que rodea cada núcleo atómico esta ligada al átomo por la atracción de la carga positiva del núcleo y solo puede existir en un número discreto de

estados energéticos, caracterizados por un número entero denominado número cuántico. Cuando un electrón energético externo incide sobre la nube, puede comunicar su energía a uno o más de los electrones atómicos, elevándolos desde su estado fundamental de energía hasta un estado excitado más energético. Ese estado es inherentemente inestable a causa del alto nivel de energía del átomo. Después de un periodo de tiempo del orden de uno a 100 microsegundos, el electrón excitado libera su energía cayendo a un estado menor de energía, mediante la emisión de radiación electromagnética.

El proceso en lámparas de descarga sigue básicamente tres etapas: Aceleración electrónica, colisión y cesión de energía, emisión de radiación. Electrones libres son acelerados por una diferencia de potencial aplicada al dispositivo y mantenida por una fuente exterior de potencia. El movimiento de los electrones constituye la corriente eléctrica en la lámpara, cuya energía cinética se transforma en energía interna de la nube de electrones atómicos, en el momento en que los electrones libres colisionan con los átomos, perdiendo energía cinética en el proceso. La energía interna de los átomos es disipada como radiación cuando el átomo se relaja a su estado energético fundamental. Los electrones libres son entonces nuevamente acelerados por el potencial exterior y el proceso se repite. La radiación emitida por una descarga en un gas de determinado elemento químico consiste principalmente en un conjunto discreto de frecuencias caracterizada por la distribución de niveles energéticos permitidos del átomo.



**Figura 2:** Esquema de las zonas oscuras y luminiscentes en un tubo de descarga al que se le ha aplicado una tensión continua en modo de descarga luminiscente (glow). Se indica el nombre en castellano y las siglas en inglés. El ancho de las zonas es orientativo pero no a escala real

Un segundo tipo de proceso de colisión electrónica que produce radiación es la desviación de un electrón a causa del encuentro con otra partícula cargada tal como otro electrón, un ión o un núcleo atómico. Una desviación de una partícula en movimiento desde su trayectoria original constituye una aceleración, que como esta descrito en la teoría electromagnética, genera radiación. En contraste con la radiación atómica explicada mas arriba, la radiación emitida como resultado de una desviación de trayectoria muestra una amplia distribución de frecuencias, ya que el ángulo de desviación de los electrones no esta cuantizado y por tanto no lo esta la aceleración producida. El electrón puede perder cualquier fracción de su energía hasta un 100 %. Este espectro de emisión continua presenta la desventaja de ser relativamente ineficiente, en lo que respecta a la producción de luz visible. Una gran proporción de la luz emitida por este proceso cae fuera del rango de luz visible (400 nm a 700 nm).

Un entendimiento más preciso del funcionamiento de la descarga, se ve acrecentado por la descripción del funcionamiento de la lámpara de descarga en corriente continua. En el modo de descarga luminiscente -citado anteriormente- y que en adelante denominaremos simplemente como glow, tiene un importante papel la conducción eléctrica debida a iones. En un tubo con electrodos no calentados, la proporción de electrones generados térmicamente es baja, siendo más importante la emisión secundaria de electrones por incidencia de iones en el electrodo. Si se aplica una tensión de varios cientos de voltios al tubo de descarga, los electrones que surgen del cátodo son acelerados a través de la caída catódica hasta una región de campo eléctrico relativamente débil, denominada negative glow. En la Figura 2 se presenta un esquema de las zonas que se describen a continuación. Enfrente del cátodo (negativo) se observa una región oscura denominada zona oscura de Aston (Aston dark space, ADS), caracterizada por un fuerte campo eléctrico que aleja los electrones del cátodo. En ella los electrones son mas abundantes que los iones y su baja energía impide ionizar el gas, de modo que esta zona es oscura. La siguiente zona es luminiscente y se denomina luminiscencia del cátodo (cathode glow, CG) y en ella los electrones han adquirido suficiente energía para ionizar átomos del gas. A continuación un segmento oscuro más largo denominado zona oscura del cátodo o de Crookes (Crooke's dark space, CDS). Aquí hay una alta densidad de iones, que constituyen el denominado escudo catódico y un fuerte campo eléctrico, que empuja a los iones hacia el cátodo y a los electrones hacia el ánodo. Esta zona es la de la caída catódica, que se puede aproximar como la caída de tensión entre el borde de la CDS y el cátodo. En la zona de luminiscencia negativa (negative glow, NG) se da una sobreproducción de iones debido a la energía adquirida por los electrones en la zona anterior, que se ve compensada por la aparición de una región oscura de baja ionización denominada zona oscura de Faraday (Faraday dark space, FDS) a la cual los electrones llegan habiendo agotado su energía en la NG. A continuación de esta zona, se encuentra un espacio de campo eléctrico constante, denominada columna positiva (positive column, PC) y que prolonga las características de la NG, con zonas luminiscentes que constituyen propiamente la PC y que se alternan con zonas oscuras hasta alcanzar el ánodo. A

continuación aparece una zona mas brillante que la PC, denominada luminiscencia de ánodo (anode glow, AG) y finalmente la zona oscura del ánodo (anode dark space, ADS), análoga a la CDS y con alta densidad de electrones.

La explicación a esta serie intercalada de zonas claras y oscuras es como sigue: Los electrones libres generados por el proceso de encendido, por rayos cósmicos o por el gradiente de tensión cercano al cátodo (la caída catódica) son acelerados por esta caída catódica e ionizan átomos del gas. Estos iones positivos, al ser masivos no se mueven con rapidez ni se alejan del cátodo y forman una zona de carga positiva y por tanto un gradiente de alto voltaje cerca del cátodo, denominada escudo catódico, localizado en la CDS. Precisamente esta zona de acumulación de iones es la que provoca la caída catódica. Además esta zona de gradiente de tensión “empuja” parte de los iones que la forman, atraídos por el cátodo negativo a la superficie del cátodo, produciendo el sputtering de materiales del cátodo.

Cuando un átomo neutro o positivo cercano al cátodo es bombardeado por electrones con suficiente energía, algunos de sus electrones orbitales absorben esa energía y son elevados a niveles de energía mayores. Cuando esos electrones se relajan a su nivel energético de partida, emiten radiación, generando la luminosidad de la región de CG. En el extremo de la CG mas alejado del cátodo, los electrones que viajan en dirección al ánodo han ido cediendo su energía y amortiguándose hasta que no pueden excitar átomos a niveles superiores de energía. Debido al campo externo aplicado, estos electrones son acelerados de nuevo a través de la CDS, ganando energía hasta que en el borde de la NG son capaces de excitar otra vez a los electrones de los átomos. A través de esta zona, los átomos excitados emiten radiación al retornar a su estado energético de partida. El proceso de oscuridad se repite en la FDS, donde los electrones son de nuevo acelerados. Al comienzo de la PC, aparece de nuevo una zona con radiación y a partir de allí, en la columna positiva, se alternan zonas claras y oscuras. Las zonas oscuras corresponden a regiones de ganancia de velocidad, las zonas claras corresponden a los lugares donde los electrones ganaron suficiente energía para estimular a los átomos en la emisión de radiación. Finalmente, en la zona cercana al ánodo, se produce un fenómeno similar al del escudo catódico de iones, pero en este caso debido a un escudo electrónico. Su longitud es mucho menor debido a la menor masa de los electrones. La mayor parte de la tensión aplicada entre los electrodos cae en la PC que ocupa entre el 80 % y el 90 % de la distancia que separa los electrodos.

La lámpara fluorescente funciona de un modo correcto en el modo de arco, que se diferencia del modo de glow en que la emisión de electrones es predominantemente de carácter térmico. A pesar de esta diferencia, el esquema descrito para las zonas de funcionamiento de un tubo de descarga es esencialmente idéntico en el modo de glow y en el modo de arco. En el modo de arco y en condiciones normales de funcionamiento, la lámpara fluorescente es conectada a un balasto que suministra a la lámpara corriente alterna, de modo que cada electrodo funciona alternativamente como ánodo y cátodo. El patrón descrito de zonas oscuras y claras oscila de derecha a izquierda y apenas es visible a través del recubrimiento fluorescente de la pared del tubo. Además se

producen otros fenómenos importantes, como la práctica desaparición del escudo anódico (debido a la imposibilidad de disipar el escudo catódico en cada cambio de ciclo a causa de la gran masa de los iones) a frecuencias de decenas de kHz, que incide en un aumento de la eficiencia de la lámpara.

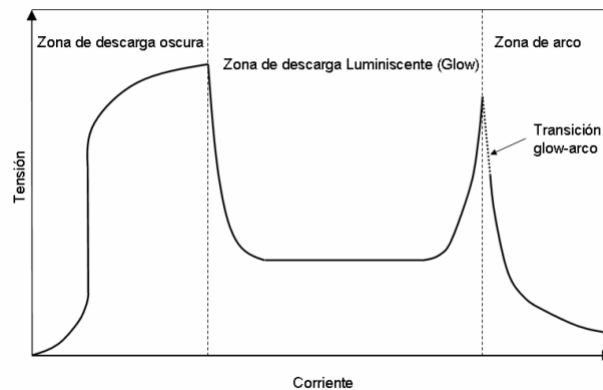
En lámparas fluorescentes funcionando en modo de arco la columna positiva juega un papel fundamental, pues constituye la mayor fuente de radiación UV de la lámpara fluorescente: Los electrones ganan energía en su campo eléctrico axial, siendo esta energía disipada por colisión con iones y átomos del gas, estableciéndose una distribución de energía estacionaria.

En lo que se refiere a las condiciones físicas del gas generado en el interior de la cavidad fluorescente, cabe mencionar que interesa tener una alta densidad de electrones libres para así generar la mayor excitación posible en los átomos del gas. Estos electrones libres se repelen entre sí, de manera que la estabilidad del sistema se produce debido a que se encuentran mezclados, en el seno del gas, con un número casi igual de átomos que han perdido uno de sus electrones, debido precisamente a la colisión con un electrón libre. Esta mezcla de electrones e iones positivos se denomina plasma, caracterizándose por mostrar una concentración local de electrones e iones prácticamente idéntica. Un exceso de carga positiva (o negativa) será inmediatamente compensado por la repulsión de los iones (electrones) circundantes.

Otra importante propiedad del plasma se relaciona con su confinamiento en una superficie cerrada. El plasma contiene una gran reserva de cargas móviles de ambos tipos, que obedecen la ley de continuidad: En el entorno de las paredes de vidrio aislante, no puede existir flujo de cargas, la corriente de iones y electrones ha de ser idéntica y por tanto cancelarse. Los electrones, al ser más ligeros que los iones y debido a la agitación térmica, se mueven a mayor velocidad de manera que se produce una mayor corriente neta de electrones que intercepta las paredes de la cavidad. La pared adquiere una carga negativa, que repele electrones adicionales más allá de una estrecha región cercana a la pared denominada escudo, con carga positiva. La carga negativa de la pared atrae los iones presentes en el escudo, compensando la corriente electrónica hacia la pared y alcanzándose el equilibrio. Las líneas de campo eléctrico generadas en la pared del tubo penetran solo hasta el escudo, pero no en el cuerpo del plasma. Aunque el escudo es relativamente estrecho en comparación a la longitud del tubo, el cuerpo del plasma está prácticamente aislado de las paredes de vidrio. Así pues el plasma es un medio conductor a causa de la presencia en el gas de un número aproximadamente igual de electrones y de iones. El mantenimiento de esta conductividad requiere la producción de pares electrón-ion. El proceso de recombinación más común es la difusión ambipolar de electrones e iones hacia las paredes del tubo y la recombinación cerca de estas paredes más que en el volumen del gas. De este modo, la tasa de recombinación y la tasa de producción de radiación son dependientes del diámetro del tubo y de la presión del gas. La energía del plasma procede principalmente de la aceleración de los electrones por el campo eléctrico presente dentro del plasma. Debido a que su masa es mucho mayor que la de los

electrones, los iones son acelerados a velocidades notablemente menores, de modo que su aportación de energía al proceso es relativamente poco importante. Sin embargo los electrones son acelerados y sufren colisiones elásticas con los átomos del gas, experimentando desviaciones con pequeñas pérdidas de energía, colisionan entre ellos, intercambiando energía entre electrones y finalmente sufren colisiones inelásticas con los átomos del gas que son ionizados o los excita a estados de alta energía desde los cuales radian energía. Prácticamente se mueve el mismo número de  $e^-$  en todas las direcciones, si bien aparece una corriente de la nube electrónica a lo largo de las líneas de campo. Esta velocidad de la corriente es solo una parte porcentual de la velocidad aleatoria de los electrones.

Una de las funciones del gas noble dentro del tubo es la de moderar la velocidad de difusión de los  $e^-$  e iones hacia las paredes del tubo, ajustando la temperatura electrónica a los valores deseados. Este nivel óptimo se puede definir como lo suficientemente alto para que las pérdidas por excitación y radiación superen ampliamente las pérdidas por colisión elástica pero lo suficientemente baja para que se dé la excitación deseada de los átomos de Mercurio (principalmente  $6p^3P_1$ , 4.89 eV sobre el estado fundamental  $6s^1S_0$ ) pero no la excitación de niveles superiores.



**Figura 3:** Curva intensidad-voltaje de un tubo de descarga de baja presión en corriente continua, observándose tanto la zona de glow como la zona de arco. Se observa la característica V-I inversa de la descarga de arco.

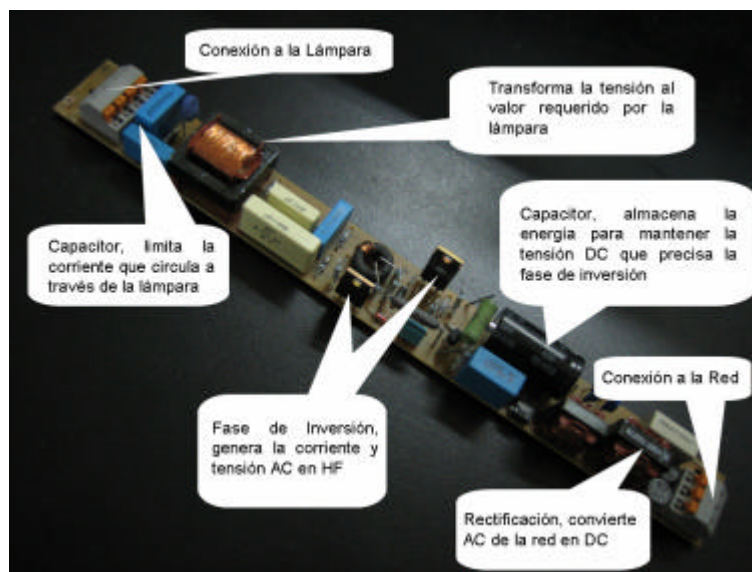
### 2.3 El balasto

La función principal del balasto es ajustar las condiciones de alimentación del sistema generador de energía, (ya sea este generador la red eléctrica u otro sistema, por ejemplo baterías de acumulación solares), a los parámetros de entrada de la lámpara, para alcanzar

un funcionamiento normal de ésta. El funcionamiento normal se consigue estabilizando la intensidad de la corriente que fluye entre los electrodos de la lámpara. Esta intensidad puede aumentar indefinidamente (debido a la relación inversa de tensión y corriente), hasta destruir la lámpara. Para evitar esto se utilizan los balastos como circuitos estabilizadores.

La Figura 3, muestra el aspecto típico de la curva intensidad-voltaje de un tubo de descarga de baja presión en corriente continua, observándose la zona de descarga oscura en la cual fluye corriente por el tubo sin generar luz, así como las zonas de descarga luminiscente o glow y la zona de arco, descritas anteriormente. Se observa la característica V-I inversa de la descarga de arco, así como la zona de transición entre el funcionamiento en modo glow y en modo arco.

La función de limitación de corriente puede ser ilustrada con los balastos más simples, que se utilizan con alimentación procedente de la red alterna. Consisten en una bobina de autoinducción o en un transformador en serie con la lámpara fluorescente. Este transformador limita la corriente que entra en la lámpara al valor correcto. Incorpora, además, un condensador corrector del factor de potencia y un cebador que se ocupa del encendido.

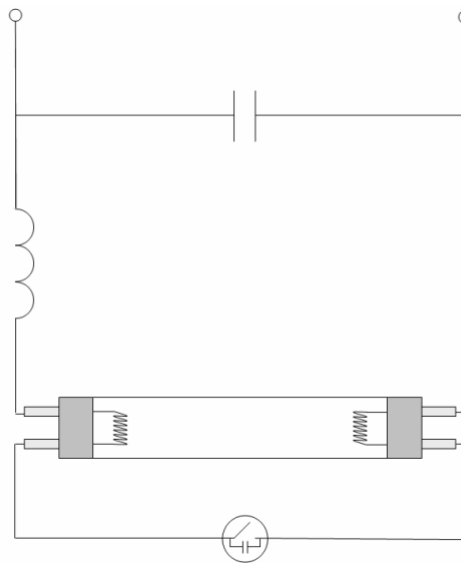


**Figura 4:** Balasto de corriente alterna con indicación de las funciones de algunos de sus componentes.

Otra de las funciones encomendadas a los balastos es la del encendido de la lámpara. El encendido se explica por la necesidad de hacer operar el gas del tubo fluorescente en la zona de descarga de arco. El encendido de una lámpara fluorescente es un proceso que influye directamente en su tiempo de vida. Asimismo, el modo de operación de la lámpara puede realizarse en bajas frecuencias (50 Hz) o en altas frecuencias (típicamente decenas de kHz).

Cada modalidad de encendido y la frecuencia de operación vendrá dada por la topología electrónica del balasto conectado a la lámpara. Se debe utilizar un cierto conjunto lámpara-balasto apropiado o en caso contrario es posible que la vida útil de la lámpara disminuya. La diferencia fundamental de una lámpara fluorescente empleada para un tipo u otro de operación está en el diseño más o menos robusto de los cátodos. Sin embargo, en la actualidad, los electrodos de la mayoría de las lámparas fluorescentes muestran un diseño bastante uniforme, en el sentido de que en sus condiciones normales de operación alcanzarán una temperatura similar. A veces se pueden utilizar distintos tipos de encendido para una misma lámpara, según las instrucciones del fabricante. No se debe utilizar una lámpara con un balasto diferente al recomendado por el fabricante, a riesgo de ver mermadas las características nominales de la lámpara y en particular ver reducido el tiempo de vida.

Los balastos destinados a ser conectados en corriente continua, tienen la característica de proporcionar a la lámpara corriente a alta frecuencia. Valores típicos de esta frecuencia de alimentación se sitúan en torno a los 17 kHz. Los efectos beneficiosos de la alta frecuencia de alimentación se acentúan para valores entre los 25 kHz y los 30 kHz, es decir por encima de los valores usualmente encontrados en los balastos típicos.



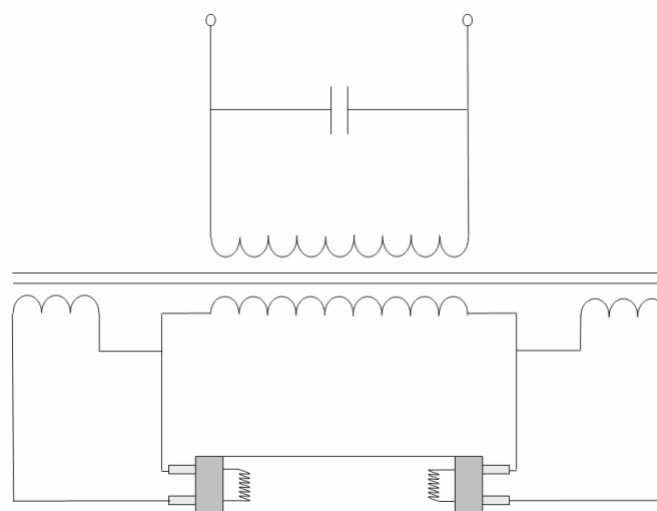
**Figura 5:** Balasto con encendido mediante cebador. En la parte inferior de la figura se representa el cebador convencional.

En una situación ideal, con una lámpara y balasto correctamente asociados, las ventajas de utilizar lámparas y balasto de alta frecuencia serían un incremento del rendimiento luminoso, la reducción del calor generado por el aparato de iluminación y el incremento del tiempo de vida del aparato de iluminación. Sin embargo, en muchas ocasiones, los balastos de alta frecuencia no cumplen con las expectativas a causa de su pobre o inadecuado diseño.

La Figura 4, adaptada de la referencia 5, muestra un balasto electrónico alimentado por corriente alterna, indicando algunos de los componentes principales y su función. En el caso de un balasto alimentado por corriente continua, la fase de rectificación de corriente alterna a corriente continua no esta presente. En la figura no se distinguen los componentes dedicados al encendido, que eventualmente pueden incluir un calentamiento de los electrodos que puede ser desconectado o no después del encendido. El transformador de tensión ha de constar en este caso de al menos tres devanados, dos para calentamiento de electrodos y otro para transformar la tensión al valor requerido por la lámpara, tal como se refleja en la figura. También es posible encender la lámpara electrónicamente con un fuerte pulso de tensión, como veremos mas adelante.

#### **2.4 Arranque en caliente. Balastos con Precalentamiento de cátodos**

En este tipo de encendido, el balasto hace pasar una corriente a través de cada uno de los electrodos, que de este modo son calentados por efecto Joule. Así, se produce una excitación térmica de los electrones que permite un encendido relativamente suave, al facilitar el desprendimiento de electrones desde los electrodos.

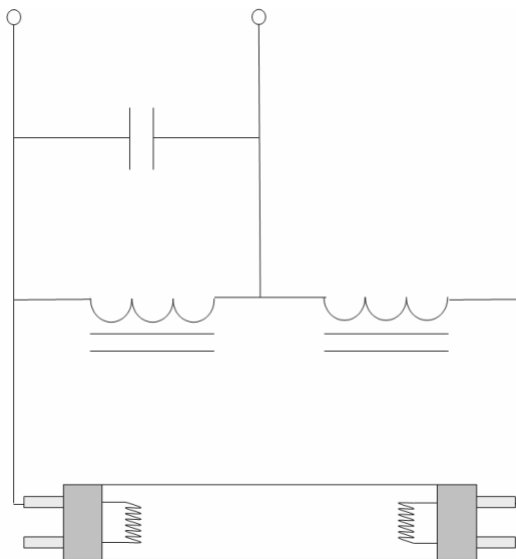


**Figura 6:** Balasto con encendido Rapid Start

Típicamente, los cebadores convencionales (balastos Switch Start) u otros tipos de cebadores han realizado esta función de precalentamiento poniendo en serie los electrodos a través del cebador y haciendo circular una corriente de precalentamiento para después aplicar un pulso de encendido y desconectar los electrodos entre si (Figura 5). Estos balastos están asociados con una reactancia que limita la corriente que fluye por la lámpara. También es posible realizar este tipo de encendido mediante balastos electrónicos. Una variante ampliamente utilizada del encendido por precalentamiento es

el encendido denominado encendido rápido o Rapid Start (RS, Figura 6). En este tipo de encendido, realizado por un balasto electrónico o convencional, unos devanados de baja tensión precalientan los electrodos independientemente uno de otro, antes del encendido. Después del encendido, el calentamiento de los electrodos puede continuar o no. Las figuras 5 y 6 muestran dos dispositivos típicos de arranque en caliente con cebador convencional y Rapid Start respectivamente<sup>6,7</sup>. Los circuitos representados pueden funcionar como balastos por si mismo, conectados a la red eléctrica convencional o constituir la parte mas próxima a la lámpara de un balasto electrónico, como el de la Figura 4.

Con la implantación de los balastos electrónicos, la variedad de métodos de encendido con precalentamiento es casi infinita, dependiendo de la tecnología que incorpore el balasto. Tal variedad puede llevar a encontrar, según el balasto utilizado, diferentes corrientes de precalentamiento, durante tiempos variables, con corriente fluyendo no solo por los cátodos sino entre los cátodos y a través del gas antes del encendido (glow current) etc. Algunas de estas situaciones son indeseables y corresponden a diseños incorrectos del balasto que en el caso de los balastos electrónicos de corriente continua, lleva a comercializar balastos que disminuyen ostensiblemente las ventajas de utilizar lámparas fluorescentes.



**Figura 7:** Balasto con encendido Instand start.

## **2.5 Arranque en frío. Balastos de encendido instantáneo**

Este tipo de encendido solo ha de aplicarse a lámparas especiales, con los cátodos preparados para un régimen de encendido duro, caracterizado por no darse un precalentamiento de los cátodos, sino un fuerte pulso de tensión que inicia la descarga en el gas. Se utilizaba con lámparas que generalmente presentan una banda conductora a

lo largo de la lámpara, como ayuda al encendido. El fenómeno físico aprovechado aquí es la reducción de la resistencia de la cubierta de vidrio del tubo fluorescente: Experimentalmente se ha comprobado que esa reducción de resistencia disminuye la tensión de encendido de la lámpara <sup>2,8</sup>. Los modelos de lámpara con banda conductora han desaparecido, si bien ocasionalmente se aprovecha el efecto descrito, conectando uno de los electrodos de la lámpara a la luminaria, en caso de estar esta última fabricada de material conductor. Incluso se encuentran modelos en los cuales un cable conductor conectado a uno de los electrodos recorre el cuerpo de la lámpara.

La Figura 7 muestra un balasto con este tipo de encendido, usualmente conocido como Instant start (IS)<sup>6,7</sup>. El esquema puede representar un balasto completo o una parte de un balasto electrónico. En general, estos sistemas lámpara/balasto están pensados para situaciones con un número limitado de encendidos diario, pudiendo citarse como cifra orientativa tres encendidos como valor máximo diario.

Al igual que ha ocurrido para las tecnologías de precalentamiento, también se han desarrollado balastos electrónicos con un sistema de encendido IS. En un gran número de ocasiones, se encuentra que se aplican balastos con encendido IS a lámparas convencionales, que no admiten un encendido IS. Este modo de proceder reducirá, en general, el tiempo de vida de la lámpara. Sin embargo, ilustrando la complejidad del problema, hemos tenido la oportunidad de analizar balastos electrónicos para instalaciones fotovoltaicas con encendido tipo IS que permitían alcanzar a las lámparas tiempos de vida mayores que muchos balastos RS.

### 3 Descripción de las muestras y datos previos

En este apartado vamos a describir las principales características físicas de las muestras y algunas de las medidas realizadas a las 100 horas de funcionamiento. Esta información fue obtenida de un modo previo al presente trabajo y nos permite situar en su contexto los análisis exclusivamente realizados para este trabajo, que son descritos en el resto de los capítulos.

**Tabla 1:** Valores objetivo, nominales y medidos de algunos parámetros de las muestras analizadas. Los datos suministrados son las medias para cuatro muestras de cada modelo, excepto para el tiempo de vida y mantenimiento del flujo luminoso, que se calculó con la media de tres muestras por modelo

	<b>Modelo 1</b>	<b>Modelo 2</b>
<i>Flujo luminoso nominal mínimo lámpara (sin reflector)</i>	350 lm	280 lm*
<i>Flujo luminoso medido de la lámpara (sin reflector)</i>	382.5 lm	186.2 lm
<i>Flujo luminoso medido de la luminaria (con reflector)</i>	346.3 lm	204.6 lm**
<i>Eficacia objetivo de la lámpara</i>	48.6 lm/W	38.9 lm/W
<i>Eficacia medida de la lámpara</i>	51.4 lm/W	34.6 lm/W
<i>Potencia nominal de la lámpara</i>	8 W	8 W
<i>Potencia objetivo de la lámpara</i>	7.2 W	7.2 W
<i>Potencia consumida por la lámpara</i>	7.6 W	5.48 W
<i>Potencia consumida por el balasto</i>	9.78 W	7.05 W
<i>Eficiencia del balasto</i>	0.78	0.78
<i>Mantenimiento del flujo luminoso (ref.100 h/ 2000 h)</i>	83 %	65 %
<i>Factor de cresta de la corriente de arco</i>	1.6	2.8
<i>Frecuencia suministrada por el balasto</i>	21 kHz	26 kHz
<i>Tiempo de vida nominal de la lámpara</i>	7500 h	7500 h
<i>Tiempo de vida medido de la lámpara</i>	10058 h	1335 h

\*La diferencia en flujo luminoso nominal respecto a la otra lámpara (por lo demás idéntica) se debe al diferente color

\*\*Se observa un mayor flujo luminoso con reflector. Este fenómeno no es del todo infrecuente y se puede deber a diferencias en el funcionamiento con la temperatura inducida por la proximidad del balasto y a efectos provocados por la proximidad a la lámpara de los componentes de la luminaria, incrementando la generación de radiación en el gas (como en las lámparas fluorescentes de inducción, por favorecimiento de la difusión ambipolar etc)

Las muestras utilizadas son dos lámparas tubulares con un consumo nominal de 8 W y un diámetro de 5 octavos de pulgada. Su denominación técnica es F8T5<sup>9</sup>. Es importante aclarar que la potencia nominal de la lámpara se define como la que figura marcado en la lámpara o declarado por el fabricante, en nuestro caso 8 W, mientras que la potencia objetivo es la que la norma<sup>10</sup> exige medir realmente en la lámpara con un

balasto de referencia y que en nuestras muestras es de 7.2 W, tal como figura en la tabla 1. En lo que sigue, el valor que nos importa es el de la potencia objetivo de la lámpara<sup>2</sup>.

La única diferencia destacable entre los dos modelos de lámpara analizados es su color, que se traduce en un menor flujo luminoso nominal de la lámpara del modelo 2 (de color denominado blanco luz natural). Los balastos utilizados para el modelo 1 y el modelo 2 son diferentes, aunque ambos son electrónicos y su encendido se puede calificar de rapid start. Tres muestras idénticas por modelo fueron sometidas a un ensayo de durabilidad de 15000 horas (con 2 horas 45 minutos encendido y 15 minutos apagado), del cual se obtuvo el tiempo de vida asignado a las lámparas de los modelos 1 y 2.

Las medidas eléctricas y luminosas se realizaron a las 100 horas de funcionamiento para las muestras que posteriormente fueron sometidas a ensayo de durabilidad, mas una muestra de referencia que se ha utilizado para el resto de las medidas. Así pues, los datos de la Tabla 1 son las medias encontradas para cuatro muestras a las 100 horas de funcionamiento.

La Tabla 1 muestra los resultados de las medidas realizadas. Asimismo mostramos los valores nominales mínimos para el flujo luminoso de la lámpara, la potencia objetivo de la lámpara, el tiempo de vida nominal de la lámpara y la eficacia objetivo de la lámpara. Se observa que el modelo 1 tiene, en general mejores características que el modelo 2, a excepción de la eficiencia del balasto, idéntica en ambas muestras. Es de destacar la notable diferencia en tiempos de vida, mantenimiento del flujo luminoso y factor de cresta de corriente.

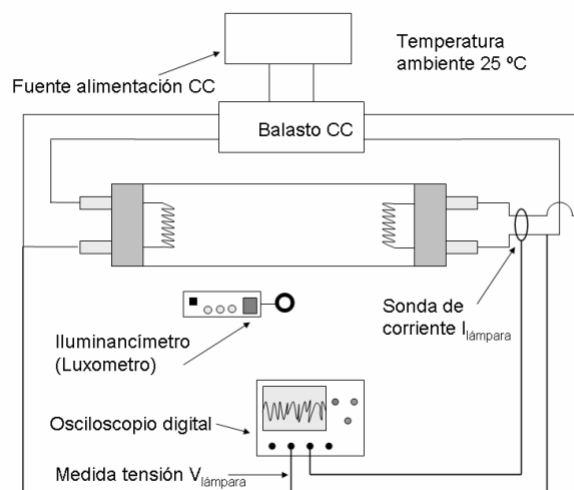
Hemos tomado estos dos modelos, con lámparas prácticamente idénticas pero balastos diferentes, precisamente para mostrar el efecto de los balastos, que originan estas grandes diferencias en lo que se refiere a las características de tiempo de vida de las lámparas y comparar ambos modelos en los análisis que siguen a continuación.

---

<sup>2</sup> En muchas lámparas tubulares la potencia nominal y la potencia objetivo tienen el mismo valor, aunque es notable el número de lámparas en las cuales la potencia nominal es mayor o menor que la potencia objetivo. Ignoramos cual es la razón histórica de distinguir entre potencia nominal y potencia objetivo, pero creemos que se debe al deseo de simplificar la denominación de las lámparas y facilitar su denominación comercial.

## 4 Influencia del estado de carga de la batería

No existe apenas información disponible sobre el posible efecto de la tensión suministrada por un lado al balasto y por otro a la lámpara fluorescente. En este trabajo vamos a evaluar estos posibles efectos, midiendo la variación de parámetros eléctricos y luminosos de las dos muestras analizadas a diferentes valores de la tensión de entrada al balasto. Para realizar las medidas, con las muestras a 25° C de temperatura ambiente, variamos los valores de la tensión de entrada al balasto entre 10 V y 16 V. Los valores obtenidos a 12 V nos servirán como referencia para observar que ocurre con los parámetros medidos al variar la tensión a la entrada del balasto. Realizamos el ensayo eléctrico con un osciloscopio digital (DSO) LeCroy LC334AL y sus capacidades de medida incorporadas (valores eficaces, frecuencias etc de las ondas adquiridas). La tensión y corriente de entrada al balasto las medimos con sendos polímetros de mano. Las medidas luminosas la realizamos con un iluminancímetro equipado con sensor corregido a la sensibilidad del ojo humano, caracterizado por una curva de sensibilidad que asemeja un gaussiana centrada en 550 nm y con colas de valor prácticamente nulo para longitudes de onda menores de 400 nm y mayores de 700 nm.



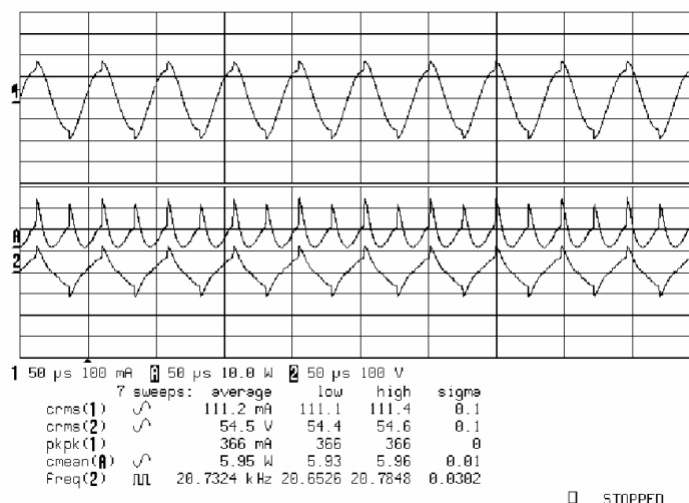
**Figura 8:** Medida de características eléctricas y luminosas de las lámparas fluorescentes y balastos a temperatura ambiente de 25 °C.

El sensor luminoso se sitúa frente al punto medio de la lámpara, apantallado por una superficie tubular de manera que solamente se mida la luz directa. El esquema de medida se ilustra en la Figura 8, habiendo omitido por simplicidad los polímetros con los cuales hemos medido la tensión y corriente consumida por el balasto.

Después de estabilizar las muestras, haciéndolas funcionar a 12 V -es decir la tensión nominal del balasto- durante al menos 1 hora, tomamos como referencia la iluminancia medida por el iluminancímetro a esa tensión. La medida de la corriente de alimentación a la lámpara se realiza con una pinza amperimétrica, por cuyo sensor se hacen pasar los dos cables que alimentan de uno de los electrodos de la lámpara fluorescente. A la hora de realizar la medida de la tensión de la lámpara, hay que tener en cuenta que en otros trabajos hemos utilizado la media de los cuatro valores que se

pueden medir entre los dos pines que pertenecen a cada electrodo<sup>14</sup>. Para simplificar la medida, en el presente trabajo hemos tomado el punto de medida que suministra el valor más cercano a la media de los cuatro valores a 12 V de alimentación a la entrada del balasto. Por esta razón, cuando realizamos la medida de la potencia consumida por la lámpara, realmente hay que tener en cuenta que no se incluye la potencia consumida por los electrodos, que usualmente se sitúa en torno al 5 % de la potencia total consumida por la lámpara. Hablaremos por tanto de potencia consumida por la columna de plasma ( $P_{\text{columna}}$ ), que incluye las potencias disipadas según se describe en la Figura 2 y que no incluye la potencia consumida por los electrodos. Otras medidas efectuadas son la frecuencia de la onda de tensión y el valor del factor de cresta de la corriente de la lámpara (CCF).

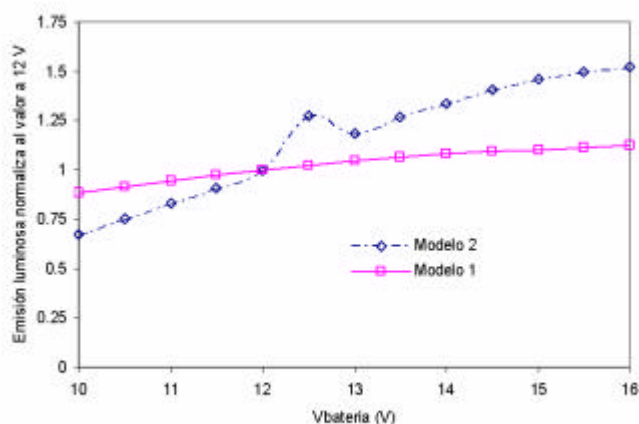
La Figura 9 muestra la pantalla del osciloscopio después de efectuar una medida, mostrando la curva de corriente y tensión de la lámpara y la potencia de la columna de plasma.



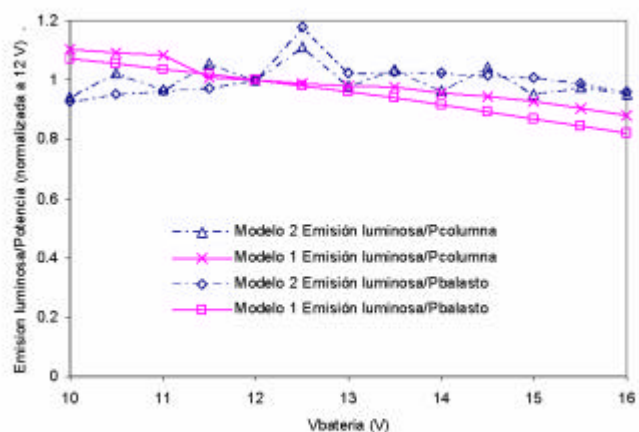
**Figura 9:** Pantalla del osciloscopio después de efectuar una medida, mostrando la curva de corriente, tensión y la potencia de la columna de plasma.

#### 4.1 Emisión luminosa

La Figura 10 muestra la emisión luminosa de ambas lámparas frente a la tensión suministrada al balasto, normalizada al valor medido a 12 V. Se observa que el modelo 1 mantiene un valor relativamente constante en todo el rango de medida, mientras el modelo 2 experimenta cambios más notables en la cantidad de luz emitida. Se observa en esta última lámpara un valor por encima de la tendencia, cerca de 12.5 V de tensión de entrada. Mas tarde veremos que este valor tiene que ver con un suministro de potencia a la lámpara algo anómalo y fluctuante.



**Figura 10:** Emisión luminosa frente a la tensión suministrada al balasto, normalizada al valor medido a 12 V.

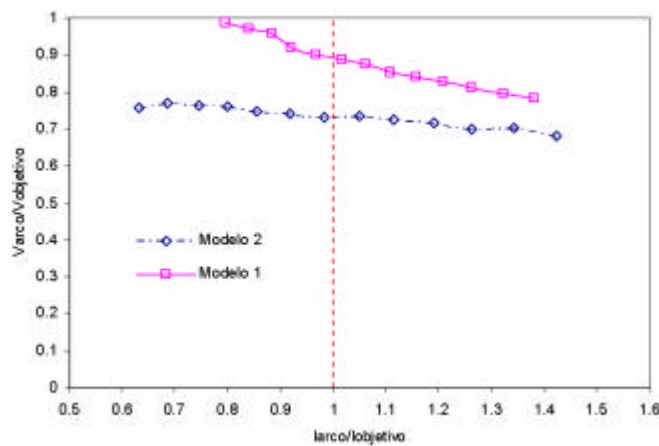


**Figura 11:** Emisión luminosa dividida entre la potencia de la columna de plasma frente a la tensión suministrada al balasto normalizada al valor medido a 12 V. Emisión luminosa dividida entre la potencia consumida por el balasto frente a la tensión suministrada al balasto normalizada al valor medido a 12 V.

Observamos que en el rango medido, la emisión luminosa del modelo 2 puede variar en un factor de 2. Esta situación no es deseable, siendo preferible una variación más moderada, como la observada en el modelo 1. La razón es que la calidad de un sistema de iluminación no está solamente en la cantidad de luz o el color, sino en la manera de iluminar la estancia, lo cual incluye tanto la uniformidad espacial como un nivel de iluminación aproximadamente constante o que pueda ser regulado por el usuario mediante el “dimming” o la distancia a la fuente de luz. El usuario del Modelo 2 puede sentirse disgustado al utilizar un sistema de iluminación que para tensiones de batería bajas suministrará un cierto valor del flujo luminoso y para tensiones de batería

altas suministrará un valor del flujo luminoso dos veces mayor, es decir el flujo luminoso de esta lámpara dista mucho de ser uniforme en función del ciclado de la batería. Baste recordar la notable uniformidad de la red eléctrica convencional y consecuentemente de la luz emitida por las lámparas en viviendas conectadas a la red eléctrica.

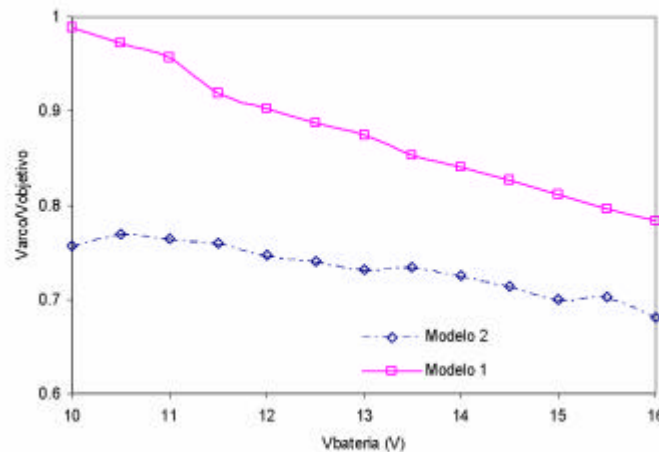
En lo que se refiere a la eficiencia luminosa, la Figura 11 muestra la emisión luminosa dividida entre la potencia de la columna de plasma frente a la tensión suministrada al balasto (normalizada al valor medido a 12 V), así como la emisión luminosa dividida entre la potencia consumida por el balasto frente a la tensión suministrada al balasto (normalizada al valor medido a 12 V). Se observa que la eficiencia luminosa es relativamente constante en todo el rango de medidas para ambas muestras, con los valores medidos oscilando en un rango de un 20 % del valor a 12 V para ambos modelos.



**Figura 12:** Curvas IV de las muestras 1 y 2, normalizadas a los valores objetivo de la tensión (56 V) y de la corriente de arco (0.145 A). La línea vertical punteada coincide con la corriente objetivo, mientras la tensión objetivo coincide con el borde superior horizontal de la figura.

## 4.2 Curva I-V de la Lámpara

Es sabido que la lámpara fluorescente se comporta como un dispositivo de resistencia negativa en el modo de funcionamiento normal o modo de arco, en el cual predomina la emisión térmica de electrones generados en los electrodos. Además, una misma lámpara mostrará una resistencia y en consecuencia una curva V-I que depende de varios parámetros, entre los que destacan la potencia consumida por la lámpara y la frecuencia de la onda de tensión, ambas determinadas por el balasto<sup>11</sup>. Hay que tener en cuenta que la primera recomendación efectuada por los fabricantes es la de operar las lámparas en las condiciones de operación nominales, para las cuales el diseño de la lámpara es óptimo. Mas adelante veremos como hacer funcionar la lámpara lejos de sus condiciones nominales de operación puede tener consecuencias en su tiempo de vida.



**Figura 13:** Tensión de arco de las lámparas frente a tensión de alimentación de los balastos.

La Figura 12 muestra las curvas I-V de los modelos 1 y 2, normalizadas a los valores objetivo de la tensión (56 V) y de la corriente de arco (0.145 A). Estas curvas fueron trazadas haciendo variar la tensión de alimentación entre 10 V y 16 V. Se observa que el modelo 1 trabaja siempre a una tensión de arco que como mucho se aleja un 20 % de su valor objetivo, mientras que el valor de la tensión medida del modelo 2 en el mejor de los casos apenas alcanza un 80 % del valor objetivo. Las corrientes de arco medidas cubren en ambas muestras un intervalo similar, entre un 60 % y un 150 % del valor objetivo de la corriente de arco.

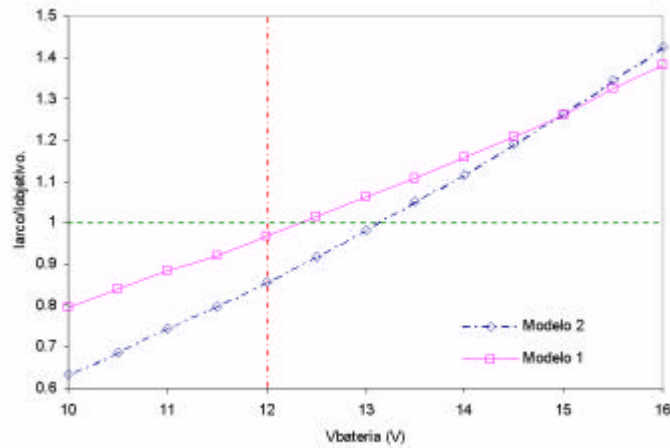
Como se puede observar en la Figura 13, a una tensión de la batería de 12 V, el modelo 1 suministra a la lámpara una tensión de arco un 10 % menor que su valor objetivo, mientras que a la misma tensión de la batería, el modelo 2 tiene una tensión de arco un 25 % menor que el valor objetivo. En lo que se refiere a la corriente de arco, la Figura 14 muestra que las diferencias entre los valores esperados a 12 V de alimentación del balasto son algo menores, un 20 % para el modelo 2 y un 5 % para el modelo 1. Sin embargo es de destacar que el modelo 2 suministra en casi todo el rango de la tensión del balasto una corriente de arco notablemente menor que la corriente objetivo. Esto puede suponer un deficiente calentamiento de los electrodos.

Observamos por tanto que las lámparas muestran unas curvas I-V que dependen fuertemente del balasto utilizado y que además originan, en combinación con la variación de la tensión de alimentación del balasto, un alejamiento más o menos pronunciado de las condiciones de operación nominal de la lámpara. En el apartado 5 del presente trabajo analizaremos las posibles consecuencias de este comportamiento.

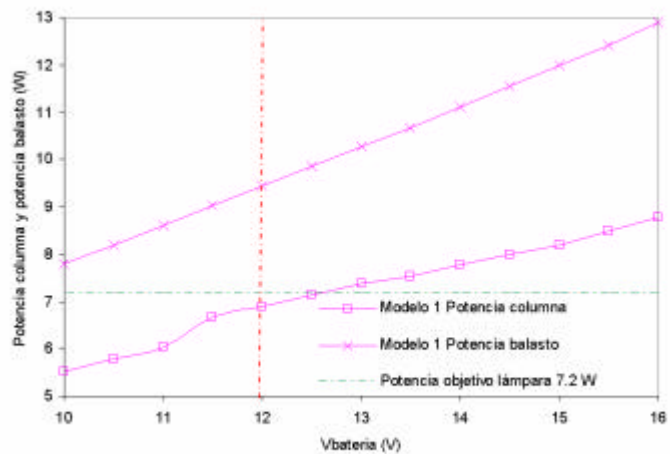
### 4.3 Potencia consumida

Las figuras 15 y 16 muestran las potencias consumidas por los balastos y por las lámparas (potencia de la columna) para los modelos 1 y 2 respectivamente, a diferentes valores de la tensión de entrada al balasto. La línea horizontal representa la potencia objetivo de las lámparas analizadas (7.2 W) y que para una óptima operación de la lámpara debería ser aproximadamente igual a la potencia de la columna. Vemos que

mientras para el modelo 1 este valor se alcanza muy cerca de los 12 V de tensión nominal, el modelo 2 solo alcanza la potencia objetivo a partir de 15 V. Una consecuencia de esto la vimos en la tabla 1 donde el flujo luminoso emitido por la lámpara del modelo 2 esta muy por debajo del valor esperado.



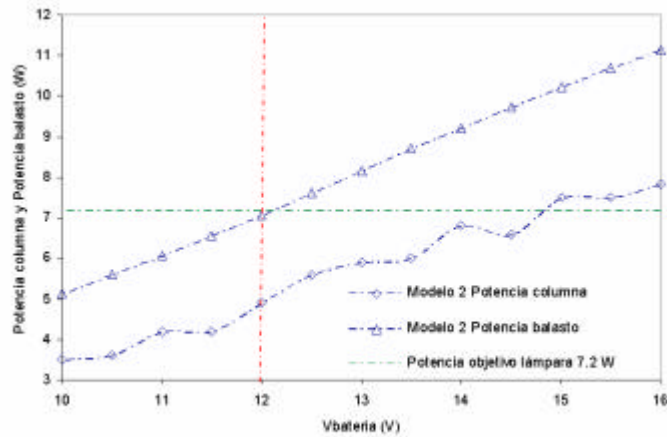
**Figura 14:** Corriente de arco de las lámparas frente a tensión de alimentación de los balastos.



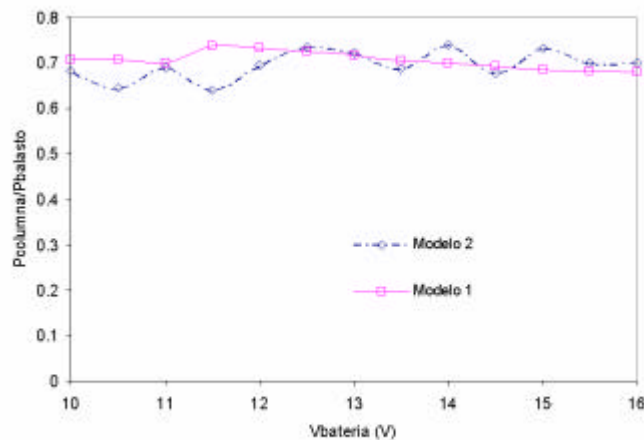
**Figura 15:** Potencia consumida por el balasto y potencia consumida por la lámpara en el modelo 1 a diferentes valores de la tensión de entrada. La potencia objetivo de la lámpara corresponde a la línea horizontal.

Observamos asimismo que la potencia suministrada a la lámpara por el balasto del modelo 2, si bien tiende a crecer con la tensión suministrada al balasto, fluctúa considerablemente. No hemos podido dar una explicación de este fenómeno, que se

produce al repetir la medida y que ocurre también al hacer funcionar una lámpara distinta (aunque del mismo tipo) con el balasto del modelo 2.



**Figura 16:** Potencia consumida por el balasto y potencia consumida por la lámpara en el modelo 2 a diferentes valores de la tensión de entrada. La potencia objetivo de la lámpara corresponde a la línea horizontal.



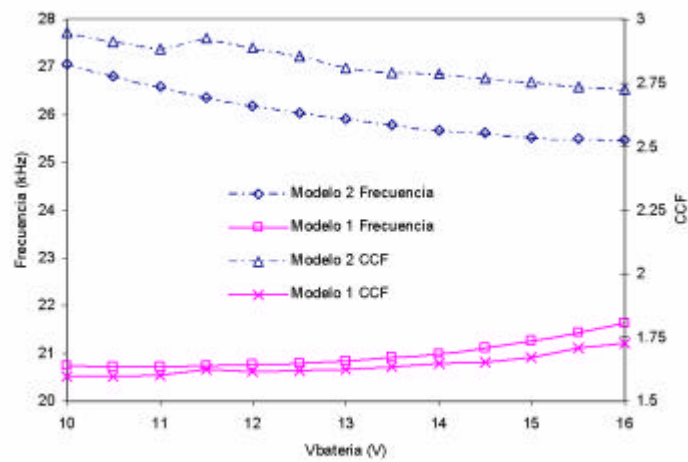
**Figura 17:** Eficiencias de los balastos en función de la tensión de entrada al balasto.

La Figura 17 muestra las eficiencias de los balastos de ambas muestras, evaluadas como la potencia consumida por la lámpara, dividida entre la potencia consumida por el balasto. Se observa que la eficiencia de los balastos se sitúa en torno a 0.7, sin variaciones sustanciales en el rango de valores en el que se ha variado la tensión de entrada al balasto. El modelo 2 registra aquí también fluctuaciones en la eficiencia, de modo análogo a como ocurría con la potencia de la columna.

#### 4.4 Factor de cresta de corriente y frecuencia de la onda de tensión

Finalmente presentamos el efecto de variar la tensión de entrada al balasto en el factor de cresta de la corriente de arco (CCF) y en la frecuencia de la onda de tensión con la cual se alimenta a la lámpara. Como es sabido se recomienda que el valor del CCF sea menor que 1.7 para no reducir el tiempo de vida de la lámpara fluorescente<sup>12,13</sup>. Asimismo se considera que frecuencias de operación mayores aumentan la eficiencia de la lámpara y su tiempo de vida<sup>13</sup>.

En la Figura 18, se observa que tanto la frecuencia como el CCF tienen tendencias opuestas en ambas muestras, en un caso creciendo con la tensión de entrada y en otro caso disminuyendo con la tensión de entrada. Sin embargo en el modelo 2, el CCF nunca baja de 2.5, mientras que en el modelo 1 solo se mide un CCF mayor que 1.7 a partir de 15.5 V a la entrada del balasto.



**Figura 18:** Factor de cresta de la corriente de arco (CCF) y frecuencia de la onda de tensión con la cual se alimenta a la lámpara frente a la tensión de entrada al balasto.

## 5 Tensión de entrada al balasto y tiempo de vida

Una de las preguntas mas importantes que se pueden formular en relación a los efectos de la variación de la tensión a la entrada del balasto, es si se produce algún efecto en el tiempo de vida de la lámpara fluorescente. En un trabajo previo, hemos podido realizar alguna aproximación en lo que se refiere al tiempo de vida de la lámpara fluorescente<sup>14</sup> como función de parámetros fácilmente medibles. Observamos que había una cierta relación entre lo que se aparta de su valor objetivo la tensión eficaz medida en bornes de la lámpara y el tiempo de vida. En particular señalábamos que cuando esta diferencia supera un 9 % en valor absoluto, el tiempo de vida de la lámpara se reduce notablemente.

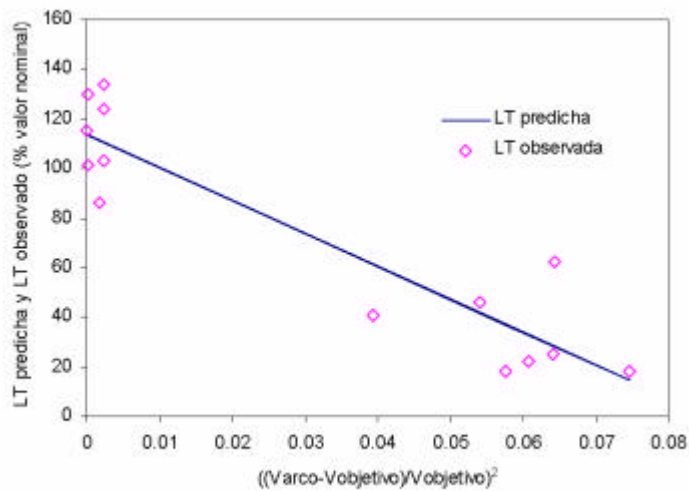
Este resultado se obtuvo con una muestra de 14 modelos de lámparas fluorescentes con sus correspondientes balastos, sometidos a un ensayo de degradación de 15000 horas con ciclos de 2 horas 45 minutos encendido y 15 minutos apagado. Tres muestras de cada modelo fueron sometidas al ensayo de durabilidad. Hemos realizado una correlación de segundo orden entre la tensión de arco normalizada a su valor objetivo, frente al porcentaje del tiempo de vida respecto al valor nominal, que denominaremos LT obteniendo, con un  $R^2=0.85$  la siguiente expresión:

$$LT = -1329.7 \left( \frac{V_{\text{arco}} - V_{\text{objetivo}}}{V_{\text{objetivo}}} \right)^2 + 113.52 \quad [1]$$

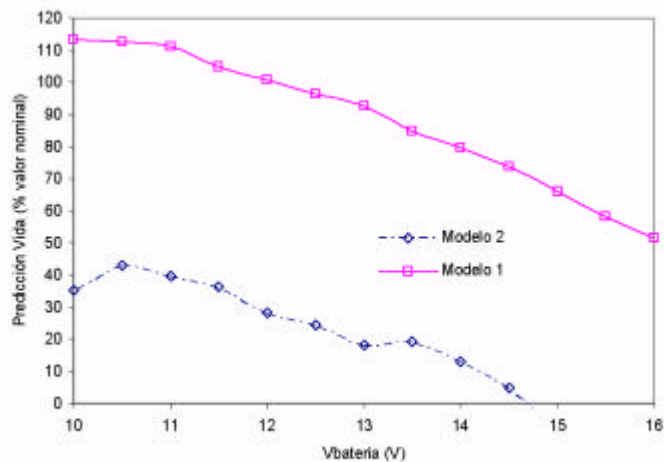
La Figura 19 representa la predicción del tiempo de vida según la ecuación 1 frente a  $(V_{\text{arco}} - V_{\text{objetivo}}/V_{\text{objetivo}})^2$ , donde  $V_{\text{arco}}$  es la tensión de arco medida entre los bornes de la lámpara y  $V_{\text{objetivo}}$  es la tensión objetivo según la norma correspondiente. También se presenta el tiempo de vida observado. La ecuación 1 muestra que en nuestro modelo, el tiempo de vida tiene un valor máximo para cada lámpara cuando la tensión de arco coincide con su valor objetivo. De las catorce muestras lámpara-balasto utilizadas en ese estudio, nueve mostraban un valor medido de la tensión de arco menor que la tensión objetivo, tres un valor medido de la tensión de arco mayor que la tensión objetivo, pero muy próximo (con una diferencia de hasta un 5 %) y solo un valor de la tensión de arco medida notablemente mayor que la tensión objetivo. Sería por tanto deseable, en el futuro, poder analizar muestras con  $V_{\text{arco}} > V_{\text{objetivo}}$ .

Nos interesa conocer el efecto de hacer funcionar la lámpara a tensiones de alimentación del balasto diferentes de su valor nominal, 12 V. Utilizando la dependencia de la tensión de arco de la lámpara con la tensión suministrada al balasto, según aparece en la Figura 13 y la relación obtenida en la ecuación 1, obtenemos la Figura 20. En ella se observa que el Modelo 1 alcanzaría con nuestro modelo de tiempo de vida y alimentada a 12 V un tiempo de vida mayor que el esperado (que es lo realmente observado, según la tabla 1). Si la lámpara operase continuamente con el balasto alimentado a 16 V, el tiempo de vida se reduciría hasta alcanzar solamente el 50 % de lo esperado, mientras que a valores bajos de la tensión de alimentación del balasto, el tiempo de vida predicho estaría algo por encima del valor esperado. Esto se debe a que, como vemos en la Figura 13, para el modelo 1, cuando el balasto es alimentado a 10 V, la tensión de arco medida es prácticamente igual a la tensión  $V_{\text{objetivo}}$ , al aumentar la tensión del balasto hasta 12 V, la tensión de arco de la lámpara se reduce a  $0.9V_{\text{objetivo}}$  y al aumentar aún mas la tensión suministrada al balasto, la tensión de arco de la lámpara se reduce, alejándose aún más de  $V_{\text{objetivo}}$ . Por otro lado la tensión de arco de la

lámpara no se aleja demasiado de  $V_{\text{objetivo}}$  hasta aproximadamente 14 V de alimentación al balasto, que es cuando la Figura 20 muestra que la predicción del tiempo de vida cae por debajo del 80 % del valor esperado.



**Figura 19:** Tiempo de vida (LT) predicho y tiempo de vida observado frente a  $(V_{\text{arco}} - V_{\text{objetivo}} / V_{\text{objetivo}})^2$ .

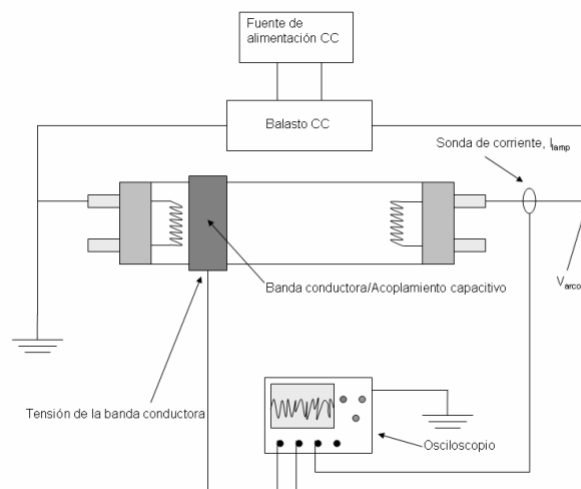


**Figura 20:** Predicción del tiempo de vida a diferentes tensiones de alimentación del balasto.

En el caso del modelo 2, el tiempo de vida estimado también decrece con la tensión de alimentación del balasto, con la particularidad de que puesto que la tensión de arco que el balasto suministra a la lámpara está siempre muy alejado del valor objetivo, la predicción da unos tiempos de vida muy bajos a cualquier tensión de alimentación del balasto. La tabla 1 muestra que el tiempo de vida alcanzado por el modelo 2 en el ensayo de vida realizado a 12 V dio valores muy por debajo de lo esperado. Para tensiones de alimentación del balasto mayores que 14.5 V vemos que la predicción de tiempo de vida para el modelo 2 cae por debajo de cero. El sentido físico

de la predicción de la ecuación 1 es que la lámpara tendría, a tensiones de alimentación del balasto por encima de 14.5 V tiempos de vida despreciables, del orden de pocas horas o minutos. Por el contrario, para el modelo 2 una reducción de la tensión de alimentación de la batería tiene un efecto positivo en el tiempo de vida de la lámpara, que sin embargo y como se puede observar en la figura 20, siempre estaría por debajo de un 45 % del valor esperado.

Una estimación más precisa del efecto de las variaciones de la tensión de la batería en el tiempo de vida de una lámpara fluorescente, requeriría la definición de un perfil de carga/descarga del que pudiéramos derivar un modelo de tensión de la batería frente al tiempo. Con este modelo podríamos evaluar la ecuación 1 y obtener una estimación más realista que la recogida en la Figura 20. Sin descartar la realización de este trabajo en el futuro, creemos que el análisis expuesto suministra información suficiente sobre las limitaciones a imponer a un balasto y a un regulador de carga que opere en una instalación fotovoltaica autónoma.



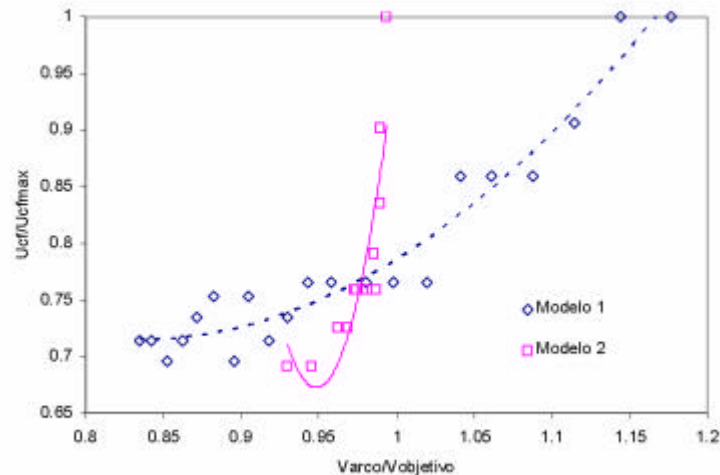
**Figura 21:** Esquema de la medida de la tensión de la banda conductora, que experimenta acoplamiento capacitivo con el plasma, situada frente al electrodo de una lámpara fluorescente

### 5.1 Justificación de la relación entre la tensión de entrada y el tiempo de vida

El fenómeno físico más importante que determina el tiempo de vida de una lámpara de descarga de baja presión durante su funcionamiento continuo (excluyendo por tanto el efecto del encendido) es la caída catódica<sup>4,15,16,17</sup>. Este fenómeno consiste en la formación de un escudo de iones frente al cátodo. Eventualmente los iones del escudo catódico se precipitan en el electrodo, produciendo daños en la sustancia emisora de electrones que recubre el cátodo. El daño efectuado al electrodo es proporcional a la diferencia de potencial establecida entre el electrodo y el escudo catódico. Esta tensión se denomina caída catódica ( $U_{cf}$ ) y es de difícil medida. El método de medida más preciso y fiable es la introducción de una sonda de Langmuir en la pared del tubo fluorescente. Tal método adolece sin embargo de precisar lámparas especialmente diseñadas para este propósito, lo cual imposibilita su utilización en lámparas convencionales. Sin embargo existe un método que relaciona la variación de esta caída

catódica con la tensión máxima medida en una banda conductora que rodea el tubo fluorescente en la región cercana al electrodo. Los valores máximos de la caída catódica representarían los periodos de mayor degradación del electrodo por sputtering y serían revelados por la tensión máxima de la banda conductora.

Utilizando el circuito de la Figura 21, nos propusimos observar la relación entre la tensión a la que es sometida la lámpara y la caída catódica. La Figura 22 presenta el resultado de esta medida para los modelos 1 y 2.



**Figura 22:** Tensión máxima respecto a tierra de la banda capacitiva situada frente al electrodo de la lámpara, normalizada al valor máximo medido frente a  $V_{arco}/V_{objetivo}$  para los modelos 1 y 2

Se observa que la tensión de pico de la banda capacitiva tiene sus valores más bajos cerca de la tensión objetivo de la lámpara, mientras crece a medida que la tensión de la lámpara se aleja de su valor objetivo. Así pues y a la espera de posteriores investigaciones, que permitan afianzar este resultado y justificarlo desde la teoría de las lámparas de descarga de baja presión, podemos afirmar que esta es la razón física que subyace a la correlación encontrada entre el tiempo de vida y la tensión suministrada a la lámpara, tal como se describió en el apartado anterior: La caída catódica es una función parabólica de la tensión de la lámpara, mostrando un mínimo aproximadamente en la tensión objetivo de la lámpara. La ventaja de utilizar la medida de la tensión de la lámpara es su facilidad para realizarla en cualquier institución con un mínimo equipamiento y la buena correlación encontrada con el tiempo de vida. Queda aún por entender las razones por las cuales el modelo 2 tiene una pendiente mucho mayor que el modelo 1, si bien podemos avanzar que puesto que la corriente de arco que circula por la lámpara modelo 2 es casi siempre notablemente menor que el valor objetivo, tal como se observa en la Figura 14, es posible que el electrodo no emita la suficiente cantidad de electrones térmicos para mantener la descarga y por tanto sea necesario -cuando aumenta la tensión de arco y por tanto se reduce la corriente de arco- un incremento más rápido de la caída catódica, para generar electrones secundarios por sputtering del electrodo y así mantener la descarga.

Es importante recalcar que el análisis realizado excluye la influencia de los encendidos en el tiempo de vida: la correlación expresada por la ecuación 1 se refiere solamente a un fenómeno que ocurre durante el funcionamiento normal. Queda como tarea de futuro la medida y análisis del encendido a tensiones diferentes de la nominal del balasto y su comparación con lo que ocurre al encender a esa tensión nominal, así como proponer un modelo del estilo del de la ecuación 1, que permita predecir el tiempo de vida de la lámpara al ser encendida a diferentes tensiones de entrada al balasto.

## 6 Conclusiones

En el presente trabajo se han analizado dos lámparas fluorescentes tubulares del tipo F8T5 equipadas con dos balastos electrónicos diferentes, utilizadas en instalaciones fotovoltaicas autónomas en conexión a baterías de 12 V de tensión nominal. Las características generales del modelo 1 y en particular su tiempo de vida son claramente superiores a las del modelo 2. Asimismo, es de destacar la gran diferencia en mantenimiento del flujo luminoso y factor de cresta de corriente.

Se ha evaluado la influencia de la tensión de entrada al balasto en diferentes características de las muestras analizadas, haciendo variar esta tensión entre 10 V y 16 V, encontrándose:

- En el rango medido, la emisión luminosa del modelo 2 puede variar en un factor de 2, mientras el modelo 1 presenta una variación más moderada.
- La eficiencia luminosa es relativamente constante en todo el rango de medidas para ambas muestras, oscilando los valores medidos en un rango de un 10 % del valor a 12 V para el modelo 1 y de hasta un 20 % para el modelo 2.
- El modelo 1 trabaja a cualquiera de las tensiones suministradas al balasto a una tensión de arco que como mucho se aleja un 20 % de su valor objetivo, mientras que el valor de la tensión de arco del modelo 2 apenas alcanza un 80 % del valor objetivo. Las corrientes de arco medidas cubren en ambas muestras un intervalo similar, entre un 60 % y un 150 % del valor objetivo de la corriente de arco.
- A la tensión nominal de la batería, el modelo 1 suministra a la lámpara una tensión de arco un 10 % menor que su valor objetivo, mientras que a la misma tensión, el modelo 2 muestra una tensión de arco un 25 % menor de lo esperado. La corriente de arco a 12 V es un 5 % menor que su valor objetivo en el modelo 1, mientras en el modelo 2 la diferencia alcanza un 20 %.
- Las lámparas muestran unas curvas I-V que dependen fuertemente del balasto utilizado y que además originan, en combinación con la variación de la tensión de alimentación del balasto, un notable alejamiento de las condiciones de operación objetivo de la lámpara.
- La lámpara del modelo 1 consume una potencia muy cercana a su valor objetivo a 12 V de tensión a la entrada del balasto, mientras el modelo 2 solo alcanza la potencia objetivo a partir de 15 V. En consecuencia, el flujo luminoso emitido por la lámpara del modelo 2 a 12 V esta muy por debajo del valor esperado.
- La eficiencia de los balastos se sitúa en torno a 0.7, sin variaciones sustanciales en el rango de valores en el que se ha variado la tensión de entrada al balasto.
- Tanto la frecuencia como el CCF muestran tendencias opuestas en ambos modelos, en un caso creciendo y en otro caso decreciendo con la tensión de entrada al balasto. Sin embargo en el modelo 2, el CCF nunca baja de 2.5, mientras para el modelo 1 solo se mide un CCF mayor que 1.7 a partir de 15.5 V de tensión a la entrada del balasto.

En relación a la influencia de la tensión de entrada al balasto en el tiempo de vida de las lámparas:

- Se ha propuesto un modelo simple que correlaciona el tiempo de vida de las lámparas fluorescentes y la tensión de arco suministrada a la lámpara, que combinada con la

curva experimental que relaciona tensión de arco y tensión a la entrada del balasto permite estimar el efecto de variaciones de tensión a la entrada del balasto en el tiempo de vida de la lámpara.

- Explicamos la relación entre el tiempo de vida de las lámparas y la tensión de arco al comprobar que la caída catódica se comporta aproximadamente como una parábola cuyo valor mínimo se sitúa cerca de la tensión objetivo de la lámpara.

## 7 Apéndice. Enfriamiento de los electrodos

Esta parte del trabajo se ha incluido como apéndice por tratarse de un tema conectado a los análisis de tiempo de vida, pero algo diferente de lo analizado en el resto de los capítulos, así como por considerar que el trabajo principal había alcanzado una extensión excesiva. Sin embargo, al haberse realizado el presente análisis en el contexto del trabajo anterior, nos resistíamos a no incluirlo.

La evaluación del tiempo de vida de una lámpara fluorescente y su balasto es uno de los objetivos más importantes, pero a la vez más costosos de realizar en Ingeniería de Iluminación. A falta de modelos de tiempo de vida, tal como el que proponemos en la ecuación 1, los ensayos de tiempo de vida con encendidos y apagados de las muestras son actualmente el único instrumento generalmente admitido para evaluar el tiempo de vida. Sin embargo las diferentes propuestas de ensayos de tiempo de vida de lámparas fluorescentes han de cumplir al menos dos condiciones: Que permitan aproximarse al perfil de uso de las lámparas y que evalúen los efectos del funcionamiento continuo y del encendido de las lámparas. Los ensayos acelerados de tiempo de vida pretenden reducir los largos tiempo de ensayo usualmente empleados. Sin embargo surge la necesidad de clarificar cuanto tiempo ha de estar apagada una lámpara fluorescente, para que en el siguiente encendido el electrodo sufra el mismo daño que durante el uso real, es decir cuanto tiempo tardan los electrodos en enfriarse. El objetivo del presente Apéndice es acotar el tiempo que precisan las dos muestras analizadas para que sus electrodos se enfríen después de ser apagada la lámpara, así como determinar la temperatura de los electrodos en el límite de su funcionamiento normal.

Usualmente, una lámpara fluorescente termina su vida útil cuando la sustancia emisiva de sus electrodos se evapora o sufre sputtering hasta un nivel en el cual no es capaz de suministrar suficientes electrones a la descarga. La pérdida de material emisor del electrodo ocurre durante los periodos de funcionamiento normal de la lámpara y durante el encendido. La velocidad a la cual se produce la pérdida de material emisor de electrones es diferente en ambas etapas. La pérdida total porcentual  $L$  de material emisor de electrones vendrá dado por  $L=N_s a+N_{hrs}\beta$  donde  $N_s$  y  $N_{hrs}$  representan el número de encendidos y el número de horas de operación respectivamente y  $a$  y  $\beta$  representan las pérdidas de material emisor por encendido y las pérdidas de material emisor por hora de operación respectivamente<sup>18</sup>. Cuando  $L$  alcanza 100 %, la lámpara alcanza el fin de su vida útil. Antes de esto, la lámpara puede tener dificultades para alcanzar el modo de arco (es decir para ser encendida) o puede haber visto drásticamente reducida su capacidad para generar luz. También puede haberse producido una ruptura del hilo de tungsteno, que impida fluir la corriente a través del electrodo.

Los procedimientos de ensayo clásicos utilizados para evaluar el tiempo de vida de las lámparas y balastos fluorescentes se basan en hacer funcionar la lámpara durante un número de horas determinada con una rutina de encendido y apagado de 2 h 45 m

encendido y 15 m apagado, con ligeras variaciones (en EEUU el periodo de apagado es 20 m). La idea de este ensayo es reproducir razonablemente el perfil de uso más corriente de estos sistemas de iluminación. También existen ensayos adaptados a un uso determinado de los sistemas de iluminación, intentando reproducir del modo más aproximado posible las condiciones reales de funcionamiento.

La ventaja de los ciclos convencionales es que permiten describir de un modo aproximado la mayoría de los usos de la iluminación fluorescente. Asimismo, dado que constan tanto de un periodo de funcionamiento normal relativamente largo (2 h 45 m) como de un periodo de apagado largo (15 m a 20 m, el tiempo que los electrodos precisarían para enfriarse hasta la temperatura ambiente), permiten realizar un encendido con el cátodo a temperatura ambiente y por tanto un encendido que no oculte posibles fenómenos de degradación. En consecuencia, este ensayo permite evaluar aunque no separar, el efecto en el tiempo de vida tanto del encendido como del funcionamiento normal.

El inconveniente de este tipo de ensayo es su alta duración. Una lámpara con un tiempo de vida nominal de 10000 h requeriría más de trece meses de ensayo, suponiendo que no se realizaran medidas adicionales, como por ejemplo medidas del flujo luminoso a determinados intervalos de tiempo.

Los ensayos acelerados han sido un interés constante en la evolución de la Ingeniería de Iluminación. Se han realizado ensayos con valores extremos de los tiempos de funcionamiento normal y de los tiempos de encendido y apagado. Para ensayos sin ciclos de encendido y apagado, es decir con la lámpara encendida constantemente, se ha comprobado que los tiempos de vida pueden llegar a cuadruplicar el valor obtenido en el ensayo de duración con ciclos convencionales (un encendido cada tres horas aproximadamente)<sup>19</sup>.

Los ciclos acelerados se basan en reducir tanto el tiempo de funcionamiento estable como el tiempo de apagado de la lámpara. Algunos autores han intentado, sin conseguirlo, establecer una relación entre los tiempos de vida alcanzados utilizando el ensayo convencional y los ensayos acelerados<sup>20,21</sup>. No existe información pública ni artículos técnicos que justifiquen el correcto uso de los ensayos acelerados, ni basados en perfiles de uso por parte del consumidor ni en comparaciones con los ensayos convencionales. Tampoco existe un estudio extensivo sobre perfil de uso de las lámparas fluorescentes en aplicaciones fotovoltaicas. En iluminación pública, las lámparas funcionan continuamente durante la noche. En aplicaciones rurales, ha sido descrito como las lámparas funcionan frecuentemente de un modo continuo durante la noche, por razones de trabajo, actividades culturales o enfermedad. Esto supone que en la mayoría de las aplicaciones, la lámpara sufre el proceso de encendido solo una vez o unas pocas veces al día, con los electrodos a la temperatura ambiente, de manera que los ciclos acelerados descritos no se aproximan al uso real de las luces empleadas en iluminación fotovoltaica.

Solo existen dos análisis extensos y públicos donde se comparan diferentes ensayos de encendido y funcionamiento<sup>20,21</sup> y que concluyen advirtiendo de la

posibilidad de llegar a resultados erróneos al utilizar ensayos acelerados. El grupo de investigación que realizó los mencionados análisis, perteneciente al Ligting Research Center, evolucionó a lo largo de años de trabajo desde una recomendación de 1 minuto apagado, pasando posteriormente a proponer al menos 5 minutos de apagado y finalmente a recomendar de 5 m a 20 m de apagado, retornando por tanto a propuestas muy parecidas a los tiempos de apagado de los ciclos convencionales. La razón de esta evolución es que a pesar del interés mostrado por la industria y los laboratorios de ensayo en realizar ciclos rápidos y baratos, la investigación práctica de este grupo mostró la divergencia de resultados entre los ensayos acelerados y convencionales. Una de las razones para esta divergencia de resultados entre ensayos con ciclos de apagado en torno a 15 m y ciclos de apagado menores a 5 m es que en los últimos los electrodos no llegarían a enfriarse antes de proceder al siguiente encendido, que por tanto no es realizado en condiciones reales (electrodo frío) y el electrodo no será adecuadamente degradado en un nuevo encendido. Así, este tipo de ensayo no reflejaría bien la degradación de la lámpara durante el encendido en condiciones reales.

Sin embargo, J.F Waymouth en su clásico libro<sup>4</sup> del año 1971, “Electric Discharge Lamps”, afirma “An oscilloscope was used to measure heater current as the arc was suddenly extinguished; ionization current would decay in a few milliseconds, but cathode temperature required half a second to reach a new equilibrium”. Es decir según Waymouth, el electrodo se aproxima al equilibrio térmico con el ambiente en medio segundo. Es importante señalar que en su trabajo, el Ligting Research Center, reproduciendo el ensayo propuesto por Waymouth, inicia la toma de datos posterior al encendido 1 segundo después de apagar la lámpara.

Nos proponemos realizar una medida análoga a la descrita por Waymouth y por el Ligting Research Center, pero empezando a tomar datos en un momento muy próximo al apagado de la lámpara, de manera que podamos determinar que es lo que ocurre con la temperatura del electrodo en ese primer segundo desde que se desconecta el balasto.

La medida de la temperatura de los electrodos resulta notablemente difícil, salvo en el caso de que se disponga de lámparas especiales a las que se les haya privado de su cubierta fluorescente interna. Sin embargo se conoce una relación entre la resistencia del electrodo de tungsteno cubierto de óxido de Bario como sustancia emisora de electrones y su temperatura. La razón entre la resistencia en frío y la resistencia en caliente del electrodo Rh/Rc se relaciona con la temperatura del electrodo mediante la ecuación, (elaborada a partir de datos suministrados por OSRAM<sup>22</sup> y Philips<sup>23</sup>) según la ecuación siguiente:

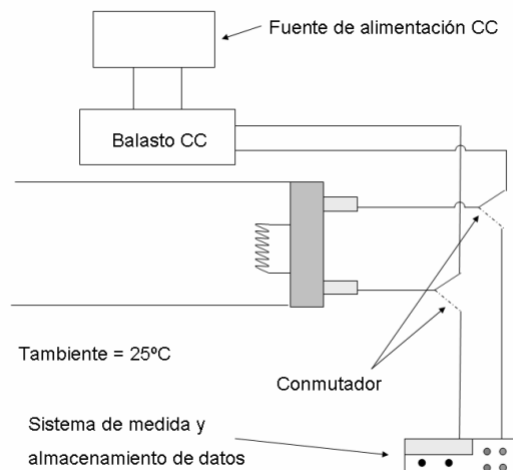
$$T_h = T_c \left( \frac{R_h}{R_c} \right)^{0.814} \quad [2]$$

donde Rc es la resistencia del electrodo a una temperatura Tc (es decir a temperatura ambiente, típicamente 298.15 K). Si se espera el tiempo suficiente, la temperatura del electrodo será igual a la temperatura ambiente Tc. La resistencia Rh

corresponde a la del electrodo en caliente y  $T_h$  la correspondiente temperatura. Así pues, si somos capaces de medir la resistencia del electrodo durante el periodo de estabilización que sigue a su apagado, podremos ver como evoluciona su temperatura.

Para esta medida, hemos empleado un conmutador manual que permite mantener alimentada la lámpara con su balasto y alternativamente permite cambiar de un modo casi instantáneo las conexiones de los electrodos a un sistema de medida y almacenamiento de datos, que nos permite medir la resistencia de los electrodos. Hemos podido comprobar que el cambio de conexiones mediante el conmutador manual dura menos que el intervalo mínimo de medida de nuestro sistema de toma de datos, 47 ms. Para ello conectamos el sistema de conmutación y medida a dos resistencias distintas, una en posición “lámpara encendida” y otra en posición “lámpara apagada”. Pudimos comprobar así que no hay tiempos mayores de 47 ms entre medida y medida, pues al accionar el conmutador, se mide una resistencia u otra, pero no un circuito abierto del sistema de medidas de resistencia. Es decir que el periodo de conmutación es menor que el intervalo con el que el sistema de medida adquiere los datos.

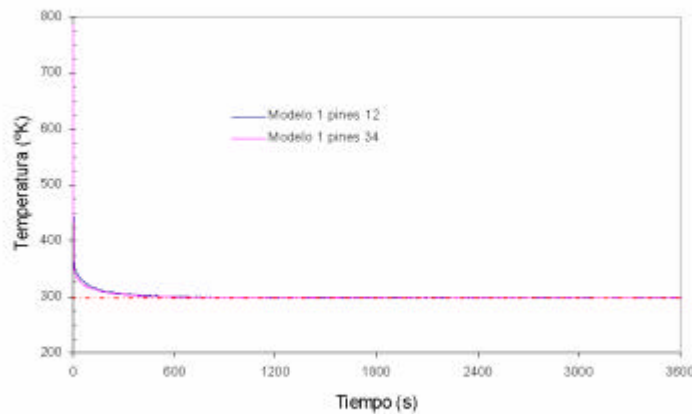
El aparato de medida ha sido un sistema de adquisición de datos Agilent 34970A, en modo de medida de cuatro puntas y que mide la resistencia mediante una corriente de prueba de 1 mA, lo suficientemente baja como para que no se de una variación apreciable de la temperatura del electrodo (a efectos de comparación baste considerar que la corriente nominal de las lámparas ensayadas es de 145 mA).



**Figura 23:** Sistema de medida de resistencia de los electrodos

Así pues, para cada electrodo realizamos dos medidas: Una primera medida después de mantener la lámpara y el balasto encendidos durante al menos 1 hora y con el intervalo de medida del sistema de almacenamiento de datos a su frecuencia mas alta, que como mencionamos anteriormente es de 47 ms entre cada medida. Con la lámpara

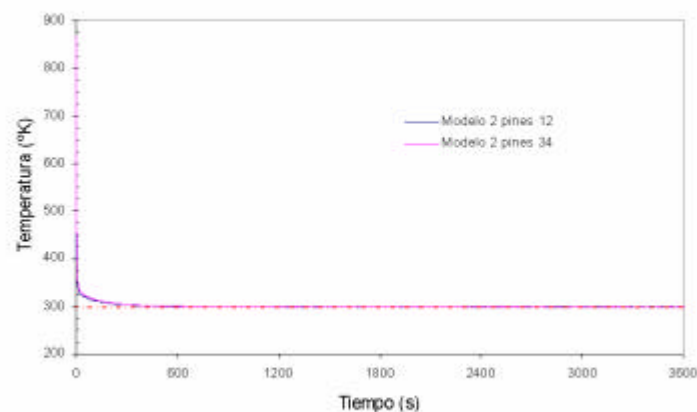
aun encendida, iniciamos la adquisición de datos, habiendo programado el sistema para medir valores de resistencia. En este momento el sistema de medidas aun no está conectado a los electrodos. A continuación, accionando el conmutador, la lámpara y el balasto son desconectadas y la lámpara se apagaba. Casi simultáneamente (en menos de 47 ms), los electrodos se conectan, vía conmutador, al sistema de medidas de resistencia y registramos los datos durante una decena de segundos aproximadamente. A continuación, volvimos a conectar lámpara y balasto y a encender la lámpara durante al menos una hora y utilizando el mismo procedimiento descrito, pero con un intervalo de medida de 1 s, registramos la variación de la resistencia de los electrodos de la lámpara durante aproximadamente una hora. La Figura 23 representa un esquema del sistema de medidas. Por simplicidad se ha representado la medida de un solo electrodo, si bien se realizó utilizando el método de cuatro puntas y en los dos electrodos de cada lámpara simultáneamente.



**Figura 24:** Enfriamiento de los electrodos del modelo 1

Finalmente, convertimos los datos de resistencias a temperatura mediante la formula  $T_h = T_c (R_h / R_c)^{0.814}$  donde  $R_c$  se tomo como la media de las resistencias adquiridas durante el ultimo minuto de adquisición de datos y unimos las series de datos adquiridas para cada electrodo: la gráfica detallada de los primeros diez segundos y la gráfica a largo plazo, adquirida midiendo durante 1 h.

Puesto que entre la desconexión de la lámpara y el balasto y la primera toma de datos pueden transcurrir hasta 47 ms, aproximamos el valor de la temperatura inicial del electrodo interpolando el primer dato de resistencia adquirido (en la serie de datos de 10 segundos), a 23.5 ms antes del primer dato adquirido. Este valor es más cercano al real. Las figuras 24 y 25 muestran los resultados para los modelos 1 y 2 respectivamente. En las figuras aparecen los datos para cada uno de los electrodos de cada muestra. Se observa la rápida reducción de la temperatura de los electrodos.



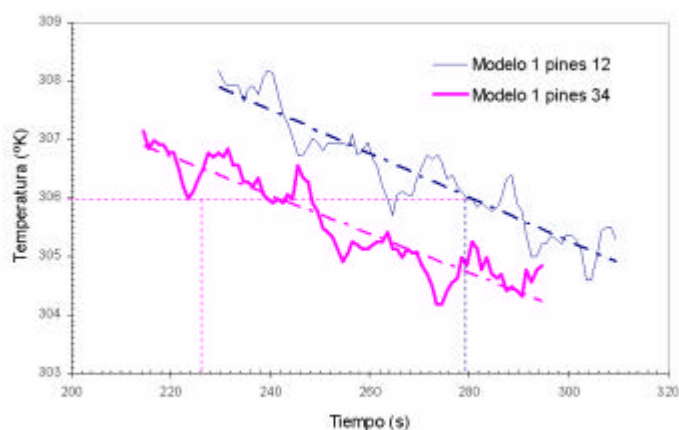
**Figura 25:** Enfriamiento de los electrodos del modelo 2

La línea horizontal de las figuras 24 y 25 corresponde a la temperatura de enfriamiento completo de los electrodos, 298.15 °K, es decir la temperatura ambiente a la cual se realizaron las medidas. Para evaluar en que momento el electrodo se ha enfriado, estimamos el error que tenemos al medir la temperatura. Calculamos el promedio de las temperaturas estabilizada de los últimos cinco minutos adquiridos y tomamos 2 veces su desviación típica como primera contribución a la incertidumbre en la medida, lo cual garantiza que un 95 % de los valores medidos estarán dentro del intervalo. Este cálculo daría cuenta de posibles errores estocásticos. Además añadimos el error de medida de nuestro aparato (tanto el error de la lectura como el debido al rango). La tabla 2 nos muestra nuestra incertidumbre para la medida estabilizada, así como la suma de la temperatura estabilizada y el valor positivo del error. Cuando las temperaturas de las figuras 24 y 25 superen estos valores, podemos considerar que los electrodos no han alcanzado la temperatura ambiente y por tanto aún están calientes.

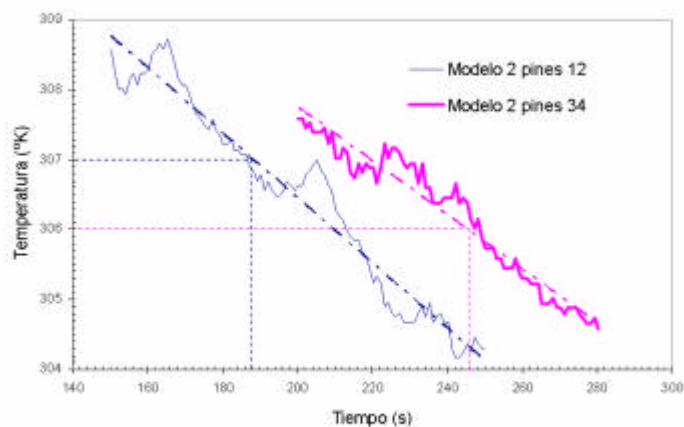
**Tabla 2:** Incertidumbre en la medida estabilizada y valor máximo del margen de temperaturas

Electrodo	Modelo 1		Modelo 2	
	Incertidumbre	Valor máximo	Incertidumbre	Valor máximo
12	± 7.45 °K	306 °K	± 7.70 °K	307 °K
34	± 7.64 °K	306 °K	± 7.65 °K	306 °K

Así pues, nuestro error de medida para la temperatura es menor de un tres por ciento y supondremos que solamente cuando la temperatura de las figuras 24 y 25 se situó por encima de 307 °K para el electrodo 12 del modelo 2 y de 306 °K para el resto, podremos afirmar que los electrodos aún están calientes. Las figuras 26 y 27 representan el análisis descrito para cada electrodo.



**Figura 26:** Temperatura de los electrodos del modelo 1 frente al tiempo de enfriamiento en torno a 306 °K.



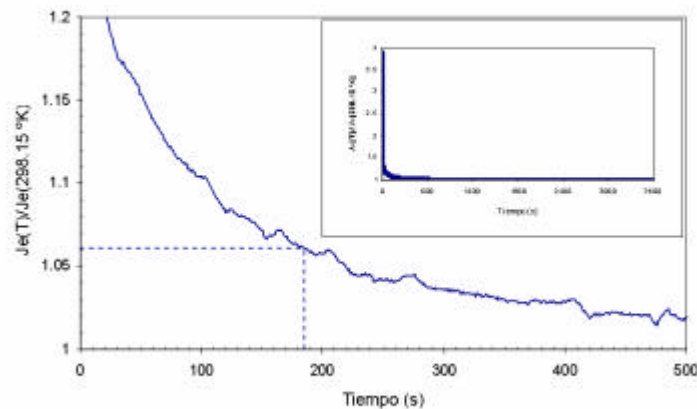
**Figura 27:** Temperatura de los electrodos del modelo 2 frente al tiempo de enfriamiento en torno a 306 °K (pin 34) y 307 °K (pin 12)

Podemos concluir de estas figuras que los electrodos no se han enfriado aún para tiempos que oscilan en una horquilla de 188 s y 280 s, es decir aproximadamente 3

minutos y 4.7 minutos. A la hora de diseñar ensayos acelerados de tiempo de vida para este tipo concreto de lámparas, con los balastos específicos que se han utilizado, el utilizar tiempos de apagado menores de 4.7 minutos, podría suponer realizar un encendido en caliente y por tanto una ocultación del daño realizado a los electrodos durante el encendido. Si bien existe un entendimiento cualitativo del efecto de encender en caliente, no conocemos una teoría que nos pueda permitir cuantificar este efecto. Sin embargo podemos estimar la relación entre la emisión térmica de electrones a una determinada temperatura frente a la emisión térmica a temperatura ambiente mediante la ecuación de Richardson<sup>3</sup>:

$$j_{em} \propto T^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) \quad [3]$$

Donde  $j_{em}$  es la emisión térmica de electrones,  $T$  es la temperatura del electrodo y  $\phi$  es la función de trabajo de la superficie. El valor de  $\phi$  es 1.56 V para el oxido de Bario que recubre el electrodo de W. La carga del electrón es designada por  $e$  y  $k$  es la constante de Boltzmann. Para evaluar el efecto de la temperatura del electrodo en el número de electrones térmicos, realizamos la división  $j_{em}(T)/j_{em}(298.15 \text{ °K})$  que se presenta en la Figura 28 para uno de los electrodos. En esta gráfica vemos que tres minutos después de apagar la lámpara habría un 6 % más de electrones térmicos que en el caso de dejar enfriar completamente la lámpara. A los 20 segundos de apagar habría un 20 % más de electrones térmicos que a 298.15 °K y a los 5 segundos de apagado, habría aproximadamente un 50 % mas de electrones térmicos que a 298.15 °K.



**Figura 28:** Razón entre el número de electrones generados térmicamente a temperatura  $T$  frente a electrones generados térmicamente a temperatura ambiente 298.15 °K para el modelo 1. Se expresa en función del tiempo de enfriamiento. Las líneas discontinuas representan 3 minutos desde el apagado. El cuadro pequeño presenta la misma información durante la hora siguiente al apagado.

Los electrodos experimentan por tanto una rápida reducción de su temperatura, y además no parece que tres minutos después de apagar la lámpara pueda darse una emisión térmica de electrones mucho mayor que con el electrodo en frío. Sin embargo, aunque nuestro resultado apoya el uso de ensayos acelerados con tiempos de apagado de al menos 4.6 minutos en las lámparas analizadas, hay que ser prudentes a la hora de afirmar categóricamente su idoneidad, pues se han descrito fenómenos de reposición del Bario evaporado y esputereado<sup>4</sup> desde los electrodos que aconsejan un análisis mas profundo del problema: Si estos fenómenos de reposición precisan un tiempo largo, del orden de minutos, es posible que no sea equivalente realizar un ensayo de encendido en el cual se apaga la lámpara durante 15 minutos que un ensayo en el cual se apaga la lámpara menos de 3 minutos. La única manera que conocemos de analizar este problema es utilizando lámparas a las que se las haya privado de su cubierta fluorescente interna y con las que se usen técnicas de fluorescencia inducida mediante láser (LIF). En este momento tal análisis se encuentra fuera de nuestras posibilidades y del alcance del presente trabajo.

Hay que considerar también que si estas lámparas funcionaran con balastos que calentaran los electrodos a temperaturas mayores, los electrodos tardarían más tiempo en enfriarse. Asimismo hay que considerar que si el encendido de una lámpara se produce con el electrodo a una temperatura sobre su valor ambiente, se alcanzará antes el modo de arco. Si el tipo de encendido considerado incluyera, debido al diseño del balasto, corriente de glow, la reducción del tiempo de encendido supondría un ahorro de sputtering al electrodo. Así pues, habría también que comprobar, en cada caso concreto si el encendido considerado se ve acompañado de corriente de glow y en que magnitud.

Tampoco esta claro a que nivel de emisión térmica de electrones desde el electrodo varía significativamente el daño que este sufre. O dicho de otra manera, ignoramos que valor de la relación  $j_{em}(T)/j_{em}(298.15 \text{ °K})$  ha de constituir el umbral que nos permita establecer un punto del eje de tiempos de la figura 28 como tiempo mínimo de apagado.

**Tabla 2:** Temperatura estimada para los electrodos en funcionamiento normal

Electrodo	Modelo 1	Modelo 2
12	760.25 °K	589.03 °K
34	786.59 °K	867.34 °K

Finalmente, la tabla 2 muestra los valores estimados de la temperatura de los electrodos en el momento del apagado. Como puede verse se sitúan en el intervalo de

600 °K a 900 °K. Estos valores corresponden, en el límite, a la temperatura de los electrodos en funcionamiento normal. Eventualmente se podrían utilizar estos datos para diseñar modelos de predicción del tiempo de vida de las lámparas fluorescentes.

Como conclusión de este apéndice, en relación al tiempo de enfriamiento que precisan los electrodos después de ser apagada la lámpara fluorescente, encontramos para las dos muestras analizadas, que los electrodos no se han enfriado aún para tiempos que oscilan en una horquilla de 188 s y 280 s, es decir aproximadamente 3 minutos y 4.7 minutos. Hay que tener en cuenta que este resultado se aplica solamente a las lámparas medidas con los balastos utilizados y que se desconoce a que nivel de calentamiento del electrodo las condiciones de encendido varían significativamente respecto del encendido con los electrodos a temperatura ambiente.

## 8 Referencias

- 1 Loeb L B 1939 Fundamental Process of Electrical Discharge in Gases J.Wiley & Sons New York
- 2 Cayless M A and Mariden A M 1983 Lamps and Lighting Edward Arnold London
- 3 Lister GG, Lawler JE, Lapatovich WP and Godyak 2004 The physics of discharge lamps Reviews of Modern Physics Volume 76
- 4 Waymouth J F 1971 Electric Discharge Lamps Cambridge MA:MIT press
- 5 Ballast Tecnology Self-Training Program. CD. 1999 The Lighting Collaborative, Inc.
- 6 Pressman A I 1998 Switching Power Supply Design McGraw-Hill NY
- 7 Castejón A, Santamaría G 1993 Tecnología Electrónica McGraw-Hill Madrid
- 8 Roche W J and Milke HW Fluorescent lamp starting aids-How and why they work. J of the IES October 1974 29-36
- 9 IESNA Lighting Handbook. Reference and Applications.8 th ed.IESNA:
- 10 UNE-EN 60081/A3
- 11 Yan W, Tam E and Hui SY 2007 A semi-Theoretical Fluorescent Lamp Model for time-Domain transient and Steady-State Simulations IEEE Transactions on Power Electrtronics 22 No 6 2106-15
- 12 Szuba, S 1991 Phase-resolved thermal modeling of a fluorescent lamp electrode as function of current waveshape and frequency IEEE Transactions on Industry Applications 27 No 3 459-70
- 13 Nacional Lighting Product Information Program Specifier Report 2000 Electronic Ballast
14. García Rosillo F 2004 Lifetime evaluation of DC-supplied electronic ballasts with fluorescent lamps for photovoltaic applications Renewable Energy 29 961-74
- 15 Hammer E E 1995 Cathode fall voltage relationship with fluorescent lamps. J of the IES Winter 1995 116-22
- 16 Hadrath S, Garner R C, Lieder G H and Ehlbeck J 2007 Time resolved measurement of cathode fall in high frequency fluorescent lamps. J. Phys. D: Appl. Phys. 40 6975-81
- 17 Misono K J 1992 The cathode fall voltage of low current fluorescent lamps Light & Vis. Env. 16 No 2 53-60
- 18 Narendran T, Yin T, O'Rourke C, Bierman A and Maliyagoda N 2001 A lamp life Predictor for Frequently Switched Instant-Start Fluorescent Systems J of the IES Summer 2001 189-98
- 19 Thayer R 1954 Determinants of fluorescent lamp life J of the IES November 1954 527-35
- 20 Davis R, Yunfen J and Chen W 1996 Rapid cycle testing for fluorescent lamps- What do the results mean? IESNA Annual Conference Paper #30
- 21 O'Rourke C and Figueiro MG 2001 Long-term performance of screwbase compact FL. J of the IES Summer 2001 30-39
- 22 Mortimer GW 1998 Real measurement of dynamic filament resistance J of the IES. Winter 1998 22-8
- 23 Dorleijn JWF and Goud LH 2002 Standardisation of the static resistances of fluorescent lamp cathodes and new data for preheating Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society) 1, pp. 665-672