

Capítulo 4

ESTABILIDAD DEL SISTEMA FORMADO POR BALASTO Y LÁMPARA

En el presente capítulo se realiza un breve análisis de la estabilidad del sistema balasto-lámpara. La estabilidad del sistema balasto-lámpara puede abordarse desde el punto de vista de la regulación automática clásica de sistemas. Sin embargo, existen numerosas referencias en la literatura técnica de iluminación electrónica que permiten obtener qué especificaciones debe cumplir un inversor electrónico para que haya estabilidad en el sistema balasto-lámpara. De este modo se pretende preparar el terreno para el estudio de los inversores que se realizará en el capítulo siguiente

Índice del Capítulo

4.1	INTRODUCCIÓN	4-3
4.2	CARACTERÍSTICA DE UNA LÁMPARA DE ALTA INTENSIDAD DE DESCARGA	4-4
4.2.1	CORRIENTE POR LA DESCARGA.....	4-4
4.2.2	IMPEDANCIA INCREMENTAL	4-5
4.3	CARACTERÍSTICA DE SALIDA DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO	4-9
4.4	CRITERIO DE ESTABILIDAD.....	4-10
4.5	REFERENCIAS	4-15

4.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los principales puntos del diseño en dispositivos electrónicos de potencia, es el relativo a la estabilidad del sistema fuente-carga. Cuando la carga alimentada presenta algún tipo de dinámica, es preciso que en la etapa de gobierno del equipo de alimentación, se tengan una serie de características de control, que hagan posible el funcionamiento estable del equipo.

En el caso de un sistema formado por balasto y lámpara de descarga, la dinámica de la propia lámpara es bastante compleja. Por tanto, el balasto debe diseñarse siempre para que el sistema final sea estable.

En este sentido, se debe realizar, en primer lugar, un análisis del comportamiento dinámico de las lámparas de descarga objetivo del diseño. A continuación, es preciso realizar este análisis también en el equipo de alimentación de la lámpara.

Mediante el empleo de criterios de estabilidad válidos, es posible estudiar cómo se va a comportar el sistema final. De este modo, es posible imponer, en el diseño del equipo de alimentación de lámparas, las características necesarias para que el sistema construido sea estable.

4.2 CARACTERÍSTICA DE UNA LÁMPARA DE ALTA INTENSIDAD DE DESCARGA

Las cargas de potencia en sistemas electrónicos vienen definidas por la característica tensión-corriente. En el caso de las lámparas de descarga, esta característica tensión-corriente tiene pendiente negativa a baja frecuencia (ver figura 4.1).

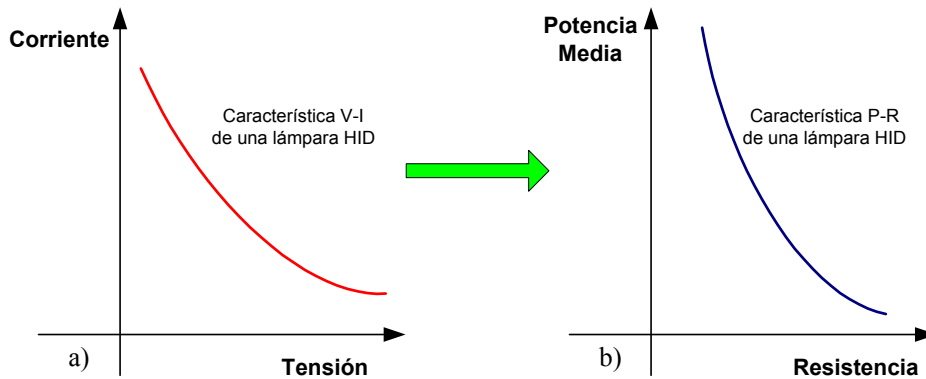


Figura 4.1.a) Característica V-I de Lámparas de Alta Intensidad de Descarga.
b) Característica P-R de Lámparas de Alta Intensidad de Descarga

Una representación alternativa de esta característica es la curva potencia media-resistencia (P-R). Esta representación es útil en iluminación electrónica debido a que el principal parámetro a controlar en la lámpara es, precisamente, la potencia de salida.

4.2.1 Corriente por la Descarga

La descarga puede considerarse como una corriente eléctrica en el seno de un gas ([5], [6], [7]). Esta corriente está producida por electrones libres e iones positivos. Cuando en una descarga estable aumenta la corriente, significa que ha aumentado el número de electrones libres producidos por ionización de átomos del gas.

Por otro lado, para un determinado nivel de campo eléctrico, se tiene un ritmo de recombinación de pares electrón-ion determinado. Si el ritmo de producción de electrones supera al ritmo de recombinación de pares electrón-ion, entonces el ritmo de producción de portadores de carga puede incrementarse más rápidamente que la corriente. El resultado neto de ello es que el campo eléctrico (y por tanto la tensión en bornes) disminuye mientras la corriente aumenta. Este comportamiento es el que lleva a una característica negativa tensión-corriente a baja frecuencia de las lámparas de descarga [2], [10].

Para obtener de manera cuantitativa un modelo de este comportamiento, es preciso recurrir al concepto de impedancia incremental.

4.2.2 Impedancia Incremental

El comportamiento complejo en frecuencia de una lámpara de descarga puede modelarse mediante el empleo de la impedancia incremental. Dependiendo de la frecuencia de alimentación, una lámpara de descarga presenta distintos comportamientos. A baja frecuencia (del orden de hertzios) se tiene una característica de resistencia negativa, mientras que a altas frecuencias (a partir de los 10-20 kHz), el comportamiento es prácticamente resistivo.

Si una de estas lámparas se alimenta en alta frecuencia hasta alcanzar el permanente y se introducen perturbaciones en la tensión de alimentación, se pueden obtener las variaciones de corriente asociadas (ver figura 4.2). Estas perturbaciones de tensión tendrán un valor y una frecuencia asociada determinadas.

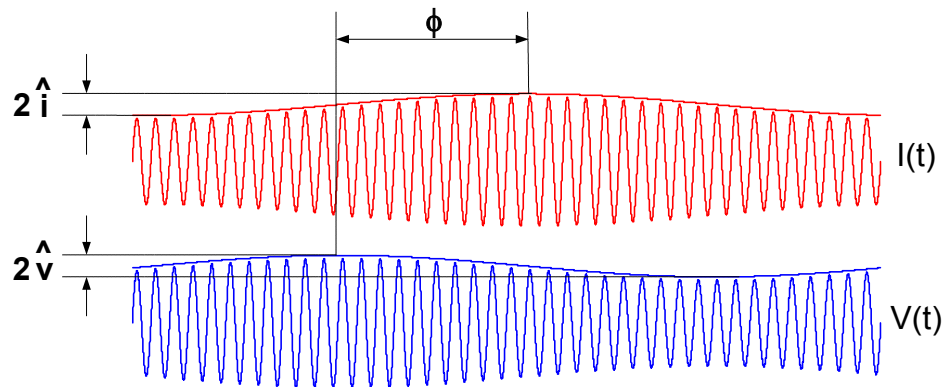


Figura 4.2. Perturbación de corriente \hat{i} , observada en una lámpara de alta intensidad de descarga, al introducir una perturbación de tensión, \hat{u}

Puede obtenerse el valor de la impedancia incremental de la lámpara en función de la frecuencia, $Z_L(s)$ como:

$$Z_L(\omega j) = \frac{\hat{v}}{\hat{i}} \quad \text{ec. (4.1)}$$

La impedancia incremental puede representarse en el plano complejo, tal y como se muestra en la figura 4.3.

Esta impedancia incremental se interpreta como variación de la característica tensión-corriente instantánea dependiendo de la frecuencia de la perturbación, como puede observarse en la figura 4.4.

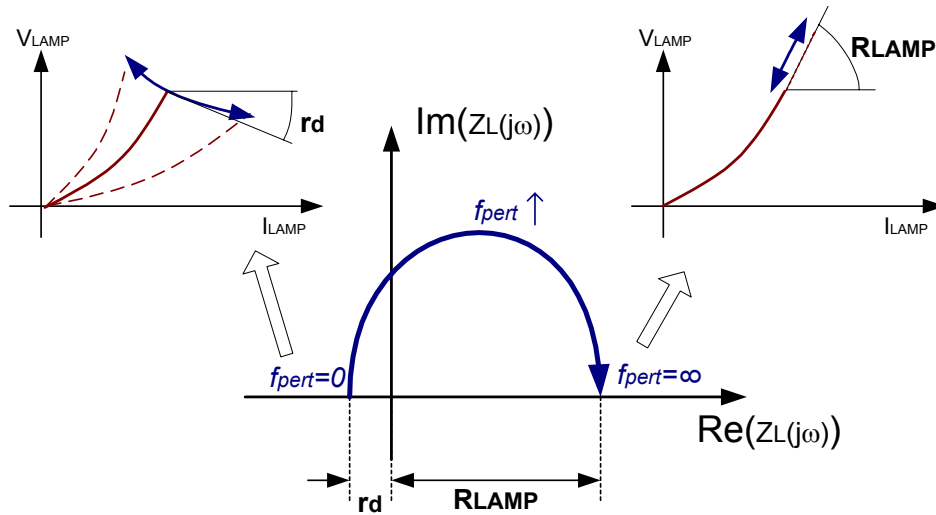


Figura 4.3. Impedancia incremental en el plano complejo en función de la frecuencia de la perturbación y su significado en la característica tensión corriente de una lámpara de alta intensidad descarga.

Este comportamiento puede describirse mediante un modelo de pequeña señal que contenga un polo y un cero. Uno de estos modelos de pequeña señal adecuado para describir el comportamiento de lámparas de descarga es el modelo de Deng & Cuk [4]. Este modelo propone, para la impedancia incremental de la lámpara, la siguiente expresión:

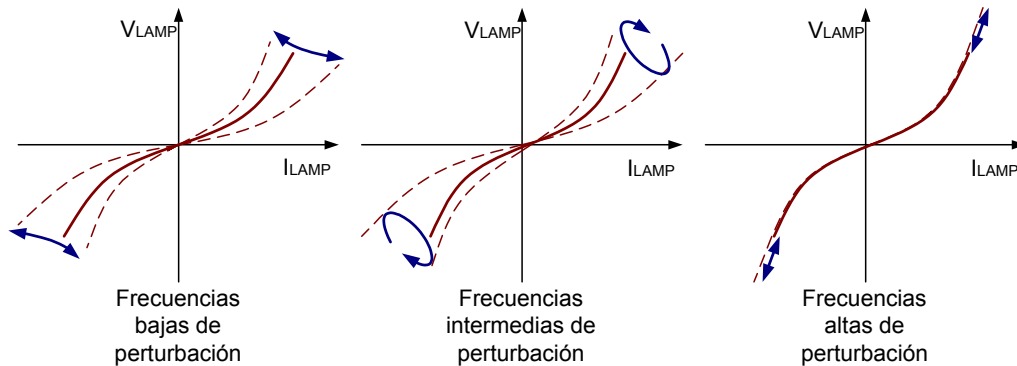


Figura 4.4 Variaciones en la característica tensión corriente en función de la frecuencia de la perturbación

$$Z_L(s) = k_{DC} \cdot \frac{\frac{s}{z} + 1}{\frac{s}{p} + 1} \quad \text{ec. (4.2)}$$

donde se tiene:

- Un polo en el semiplano negativo ($p > 0$)
- Un cero en el semiplano positivo ($z < 0$)
- Un término constante ($k_{DC} < 0$).

La impedancia en baja frecuencia, (para $f_{pert} \rightarrow 0$) es lo que se denomina resistencia dinámica de la lámpara (r_d). Por otro lado, a frecuencia altas (piénsese, por ejemplo, en frecuencias próximas a las de conmutación en un inversor electrónico, del orden de 100 kHz) se tiene que esta impedancia incremental va a ser prácticamente igual a la impedancia equivalente que presenta la lámpara.

Una característica completamente equivalente a esta impedancia incremental sería representar estas perturbaciones en un diagrama potencia-resistencia. La expresión podría definirse como

$$\Gamma_L(\omega j) = \frac{\hat{r}}{\hat{p}} \quad \text{ec. (4.3)}$$

donde \hat{r} es la variación en la carga al introducir determinada variación en la potencia, \hat{p} .

Al expresar el modelo Deng-Cuk como resistencia-potencia, la expresión de esta característica de la lámpara pasa a ser:

$$\Gamma_L(s) = \frac{\hat{r}}{\hat{p}} = \frac{2}{I^2} \cdot \frac{k_{DC} - R_{LAMP}}{k_{DC} + R_{LAMP}} \cdot \frac{s \cdot \frac{Z}{p} + 1}{s \cdot \frac{Z}{k_{DC} + R_{LAMP}} + 1} \quad \text{ec. (4.4)}$$

Es posible, por tanto, realizar también una representación en el plano complejo de esta característica $\Gamma_L(\omega j)$, tal y como se muestra en la figura 4.5.

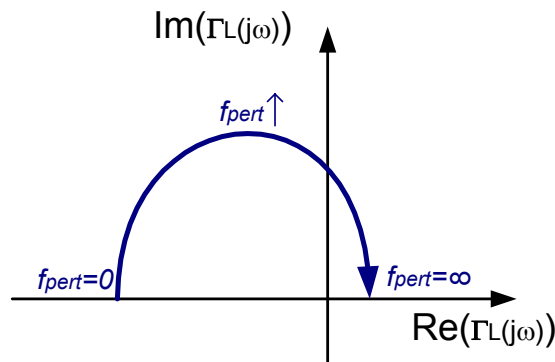


Figura 4.5 Característica $\Gamma_L(j\omega)$ de una lámpara de alta intensidad de descarga en el plano complejo

Cabría plantearse la posibilidad de alguna simplificación que permita simplificar las ecuaciones (4.4) y (4.2). Cuando se cumple la condición de que a alta frecuencia la impedancia equivalente es resistiva [8], entonces:

$$Z_L(f_{\text{pert}} \rightarrow \infty) \approx R_{\text{LAMP}} \Rightarrow k_{\text{DC}} \cdot \frac{p}{z} \approx R_{\text{LAMP}} \quad \text{ec. (4.5)}$$

de donde, para esta simplificación,

$$k_{\text{DC}} = R_{\text{LAMP}} \cdot \frac{z}{p} \quad \text{ec. (4.6)}$$

Llevando esta expresión de k_{DC} a la ecuación (4.4), la expresión de la característica potencia-resistencia de la lámpara queda como:

$$\Gamma_L(s) = \frac{\hat{r}}{\hat{p}} = \frac{1}{I^2} \cdot \frac{k_{\text{DC}} - R_{\text{LAMP}}}{k_{\text{DC}} + R_{\text{LAMP}}} \cdot \frac{1}{s \cdot \frac{R_{\text{LAMP}}}{(k + R_{\text{LAMP}})p} + 1} \quad \text{ec. (4.7)}$$

con lo que esta expresión presenta un único polo [8].

Al representar esta expresión simplificada en el plano s , la característica $\Gamma_L(s)$ presenta el aspecto de la figura 4.6, donde cuando la frecuencia de perturbación f_{Pert} tiende a infinito, la característica se acerca al origen.

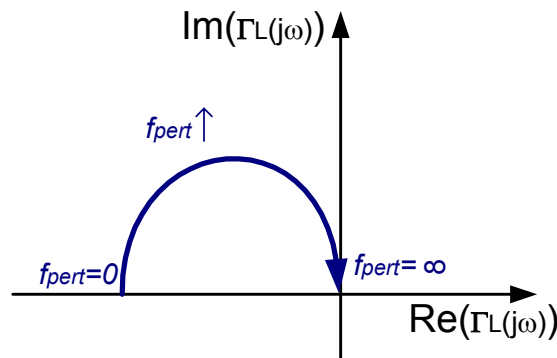


Figura 4.6 Característica $\Gamma_L(j\omega)$ de una lámpara de alta intensidad de descarga en el plano complejo con simplificación de polo único.

4.3 CARACTERÍSTICA DE SALIDA DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO

El comportamiento del sistema de alimentación se analiza teniendo en cuenta la característica de salida del mismo.

Tratándose de fuentes de alimentación electrónicas, generalmente la dinámica de la propia fuente es mucho más rápida que la dinámica de las cargas a las que alimenta. En este caso, es suficiente con conocer la característica estática de salida de la fuente de alimentación. Para la mayoría de las aplicaciones estas características se representan en un diagrama V-I.

Para cada margen de funcionamiento del sistema en el que éste pueda considerarse como lineal, puede calcularse el equivalente Thevenin, y representarse en el diagrama V-I. Esta representación de un equivalente Thevenin se denomina también recta de carga, y sirve para estimar el punto de funcionamiento del sistema, una vez que el equipo alimente una determinada carga y se alcance el permanente. De este modo puede tenerse gráficamente una representación del comportamiento del sistema para cualquier margen de funcionamiento.

Sin embargo, el comportamiento del sistema puede representarse también en un diagrama P-R. Esta representación presenta una serie de ventajas importantes a la hora de realizar el diseño, sobre todo en sistemas aplicados a iluminación ([1], [3], [8], [9]).

En cargas en las que esté determinada la potencia de funcionamiento, pero que puedan presentar muy distinta carga en distintos instantes, la característica V-I da poca idea de la evolución de la potencia que entrega la fuente para cada impedancia equivalente. En lámparas de alta intensidad de descarga, por ejemplo, cada lámpara, y cada balasto, se define por su potencia nominal. Sin embargo, a lo largo de la vida útil de la lámpara, la resistencia equivalente que presenta la misma varía enormemente (incluso en órdenes del 100%). Además, en la fase de calentamiento, se parte de una resistencia equivalente inicial de órdenes del 10% al 20% de la nominal. Por todo ello, a la hora de estudiar el funcionamiento de inversores electrónicos que alimentan lámparas de alta intensidad de descarga, es fundamental calcular la característica estática de salida potencia-resistencia.

La dinámica de los inversores electrónicos generalmente empleados en iluminación es del orden de algunos periodos de conmutación (decenas de microsegundos hasta unos 100 microsegundos). Por otra parte, las características dinámicas de las lámparas de alta intensidad de descarga son del orden de pocos centenares de hertzios. Así, la característica estática del inversor es también suficiente para estudiar la estabilidad del sistema.

4.4 CRITERIO DE ESTABILIDAD

El sistema balasto-lámpara es un sistema complicado en el que existen dependencias de unos parámetros en función de otros. Sin embargo, puede demostrarse [8], que existe un lazo de realimentación en el sistema que admite la representación de la figura 4.7.

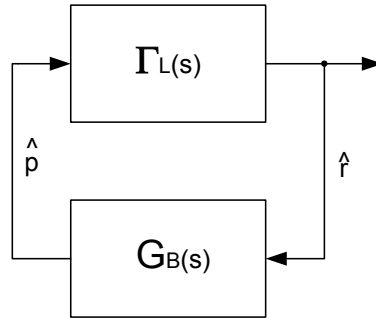


Figura 4.7 Diagrama de bloques del lazo de realimentación de un sistema Balasto-Lámpara

Teniendo en cuenta que la característica de salida del inversor puede expresarse como

$$G_B(s) = \frac{\hat{p}}{\hat{r}} \quad \text{ec. (4.8)}$$

se tiene la *ecuación característica* del lazo de realimentación:

$$1 - \Gamma_L(s) \cdot G_B(s) = 0 \quad \text{ec. (4.9)}$$

Para ver si el sistema es estable, puede aplicarse el criterio de Nyquist a la ecuación característica.

Puesto que el inversor es mucho más rápido que la lámpara, la función de transferencia en cadena abierta, $-\Gamma_L(j\omega) \cdot G_B(j\omega)$, puede simplificarse. En ese caso, el punto crítico que determina la estabilidad, será el correspondiente al límite de frecuencias bajas (características del inversor y de la lámpara estáticas). Por tanto, como característica del inversor puede tomarse simplemente la característica estática,

$$G_B(0) = K \quad \text{ec. (4.10)}$$

Así, el sistema es estable si el diagrama de Nyquist de $-\Gamma_L(s) \cdot K$, no rodea al punto $-1+0j$, como se muestra en la figura 4.8.

Esto puede expresarse matemáticamente como:

$$-\Gamma_L(f_p = 0) \cdot K > -1 \quad \text{ec. (4.11)}$$

Ahora bien, se tiene, por un lado,

$$K = G_B(0) = \operatorname{tg}(\varphi_{\text{INV}}) = \frac{\hat{p}}{\hat{r}} \quad \text{ec. (4.12)}$$

y, por otra parte,

$$\frac{1}{\Gamma_L(f_p = 0)} = \operatorname{tg}(\varphi_{\text{LAMP}}) = \frac{\hat{p}}{\hat{r}} \quad \text{ec. (4.13)}$$

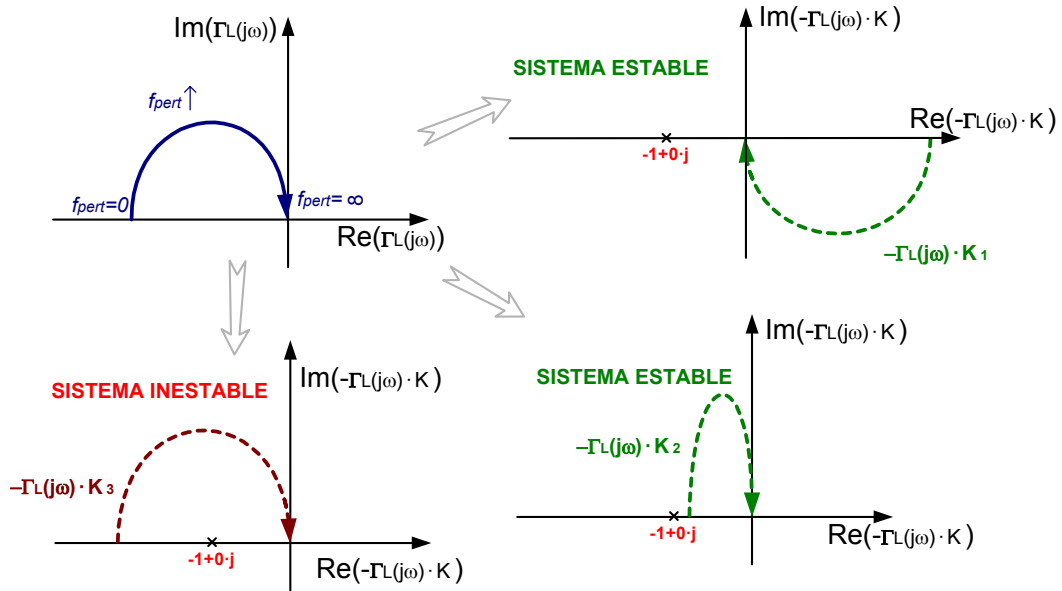


Figura 4.8 Estabilidad del sistema según el criterio de Nyquist.

Por tanto, representando en el mismo diagrama P-R las características del inversor y de la lámpara, puede verse cómo la condición de estabilidad puede expresarse, en términos de pendientes de las características en el punto de corte, como:

$$\operatorname{tg}(\varphi_{\text{INV}}) > \operatorname{tg}(\varphi_{\text{LAMP}}) \rightarrow \text{SISTEMA ESTABLE} \quad \text{ec. (4.14)}$$

$$\operatorname{tg}(\varphi_{\text{INV}}) < \operatorname{tg}(\varphi_{\text{LAMP}}) \rightarrow \text{SISTEMA INESTABLE} \quad \text{ec. (4.15)}$$

Así, se llega a la conclusión de que dadas las características potencia-resistencia, tanto de un balasto como de una lámpara de descarga, *si en el punto de corte la pendiente de la característica de la lámpara es menor que la del balasto, el sistema balasto-lámpara es estable. En caso contrario, el sistema es inestable.*

Puede también expresarse este criterio del siguiente modo: si antes del punto de corte, la característica del balasto está por debajo de la de la lámpara, el sistema estable. El criterio en el plano P-R puede verse en la figura 4.9.

De este modo puede estudiarse la estabilidad del sistema para distintos tipos de fuentes de alimentación, como son fuentes de tensión, fuentes de corriente, fuentes

de potencia, etc. En la figura 4.10 pueden observarse estos distintos tipos de fuentes alimentando lámparas de descarga.

Por ello, los métodos de control más adecuados para lámparas de descarga son aquellos que presenten límite de corriente máxima, lo que, por un lado, garantizará estabilidad del comportamiento, y por otro lado, introduce en el funcionamiento intrínseco del balasto una protección de sobrecorriente.

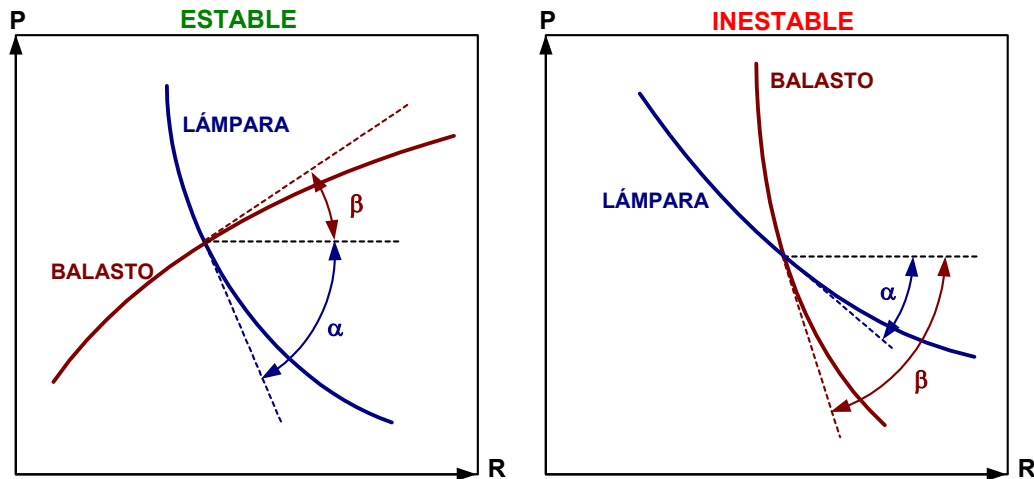


Figura 4.9. Criterio de estabilidad en el plano P-R

Por tanto, puede asegurarse estabilidad balasto-lámpara si se cumplen los siguientes requisitos:

1. La lámpara puede aproximarse suficientemente bien por el modelo de Deng-Cuk en pequeña señal, realizando la simplificación de considerar la impedancia incremental en alta frecuencia igual a la resistencia equivalente que presenta la misma.
2. El inversor es mucho más rápido que la lámpara.
3. La característica estática del inversor, es de fuente de corriente o fuente de potencia en el margen de cargas que puede presentar la lámpara.

Si se cumplen las características 1) y 2) pero el comportamiento del inversor no es a priori estable (comportamiento intermedio entre fuente de potencia y fuente de tensión), es necesario obtener la pendiente de la característica I_L en el punto de funcionamiento de la lámpara que determine la estabilidad.

En este caso, puede determinarse la estabilidad de un sistema balasto-lámpara del siguiente modo:

- a) Definir el punto de trabajo del sistema (normalmente $P=P_{\text{NOMINAL}}$)

b) Diseñar el inversor conforme al punto de trabajo del sistema

c) Obtener la característica estática de salida del inversor, $K = G_B(0) = \frac{\hat{p}}{\hat{i}}$, y representarla en el plano P-R.

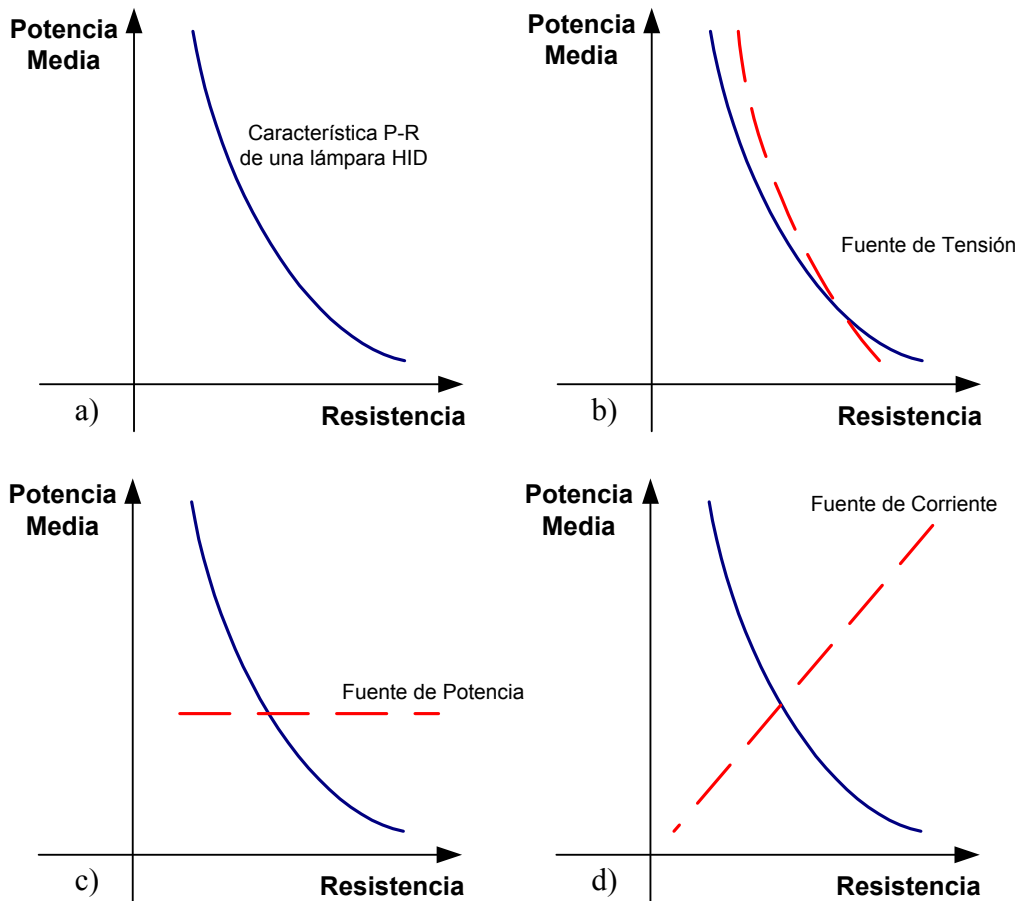


Figura 4.10. a) Característica P-R de una Lámpara de Descarga. b) Lámpara Alimentada por Fuente de Tensión. c) Lámpara Alimentada por Fuente de Potencia. d) Lámpara Alimentada por Fuente de Corriente

d) Obtener la pendiente, en el punto de funcionamiento, de la característica de la lámpara. Para ello:

- Alimentar la lámpara (con una forma de onda lo más parecida posible a la que proporcionará el inversor seleccionado) en el punto de funcionamiento escogido.
- Perturbar la lámpara a una frecuencia tal que las envolventes de tensión y corriente presenten un desfase de 180° (sería el equivalente al corte con el semieje real negativo del plano s). Con los valores de estas variaciones de tensión y corriente puede

calcularse el valor de \hat{r} y \hat{p} necesarios para conocer la pendiente de la característica P-R de la lámpara en baja frecuencia

- e) Comparar ambas características en el punto de funcionamiento. Determinar la estabilidad del sistema.

4.5 REFERENCIAS

- [1] Alonso, J. M.; "Alimentación de Lámparas de Alta Intensidad de Descarga: Aportaciones en la Optimización del Sistema Electrónico", Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, 1994
- [2] Coaton, J. R.; Mardsen, A. M.; "Lamps and Lighting, 4th Edition", 1997, Ed. Arnold;
- [3] Corominas, E. L.; "Alimentación de Lámparas Fluorescentes Compactas desde Muy Baja Tensión: Aportaciones a la Optimización del Sistema Electrónico", Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, Marzo 1999
- [4] Deng, E.; Cuk, S.; "Negative Incremental Impedance and Stability of Fluorescent Lamps", IEEE, APEC 1997.
- [5] Elembaas, W.; "High Pressure Mercury Vapour Lamps and Their Applications", Philips Technical Library, 1965.
- [6] Groot, J. de; Vliet, J. van; "The High Pressure Sodium Lamp", Philips Technical Library, 1986
- [7] Meyer, C.; Nienhuis, H.; "Discharge Lamps", Philips Technical Library, 1988
- [8] Ribas Bueno, J.; "Control Optimizado de Balastos Electrónicos. Modelado Estático y Dinámico de inversores Resonantes y Lámparas de Descarga", Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, 2001.
- [9] Rodríguez Valdés, F.; "Circuitos de Encendido en Balastos Electrónicos para Lámparas de Alta Intensidad de Descarga: Análisis, Optimización y Diseño", Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, Junio 2001
- [10] Waymouth, J. F.; "Electric Discharge Lamps", 1971, MIT Press