

# FLUCTUACIONES DE TENSIÓN



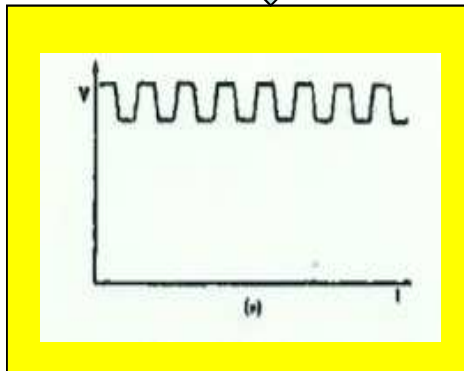
SE DICE QUE EXISTEN  
FLUCTUACIONES DE TENSIÓN  
CUANDO SE PRODUCEN  
VARIACIONES PERIÓDICAS  
O SERIES DE CAMBIOS  
ALEATORIOS EN LA TENSIÓN

SU DURACIÓN VA DESDE VARIOS  
MILISEGUNDOS HASTA UNOS 10 s  
Y CON UNA AMPLITUD QUE NO  
SUPERA EL  $\pm 10\%$  DEL VALOR  
NOMINAL (o valor declarado).

# FLUCTUACIONES DE TENSIÓN

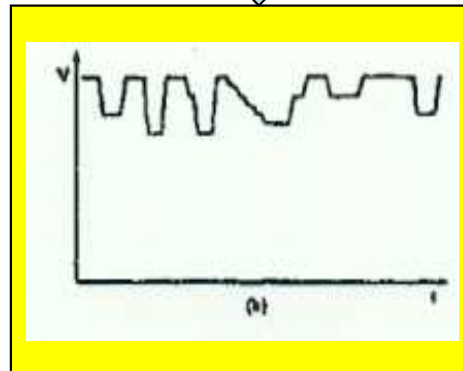
LA COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL (IEC) CLASIFICA LAS FLUCTUACIONES DE TENSIÓN EN CUATRO TIPOS:

**TIPO A**



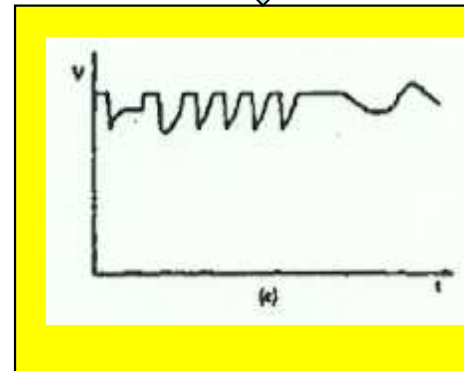
VARIACIONES RECTANGULARES DE TENSIÓN DE PERÍODO CONSTANTE Y DE LA MISMA AMPLITUD

**TIPO B**



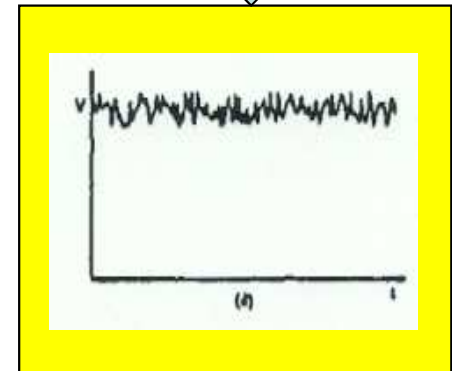
ESCALONES DE TENSIÓN QUE SE PRESENTAN DE FORMA IRREGULAR EN EL TIEMPO Y CUYA MAGNITUD VARIA TANTO EN SENTIDO POSITIVO COMO NEGATIVO

**TIPO C**



CAMBIOS EN LA TENSIÓN CLARAMENTE SEPARADOS QUE NO SIEMPRE LLEVAN APAREJADOS ESCALONES DE TENSIÓN

**TIPO D**



SERIES DE FLUCTUACIONES ESPORÁDICAS O REPETITIVAS

# Definición del flicker

- ➡ El “flicker” es la **percepción de la variación de la luminosidad de una lámpara**, ocasionada por fluctuaciones de tensión en la red de alimentación eléctrica, **originando en quien lo perciba una sensación de molestia.**
- ➡ El “flicker” depende fundamentalmente de la *amplitud, frecuencia y duración de las fluctuaciones de tensión* que lo producen; la frecuencia de las cuales oscilan entre 0,5 Hz y los 30 Hz.
- ➡ El medidor de “flicker” se denomina “flickermetro”, el cual permite conocer el nivel de sensación de molestia que experimentaría un observador medio en el punto de la red en que se conecte el medidor.
- ➡ Se emplea para ello un *algoritmo que traduce las fluctuaciones de tensión existentes en ese punto, en las sensaciones equivalentes que serían percibidas por el sistema ojo-cerebro del observador medio.*

El “flickermetro” proporciona sus medidas en unidades de perceptibilidad (p.u.),  
siendo el límite admisible de percepción  $P=1$  (p.u.)

# La medida del efecto flicker

- ➡ A la hora de diseñar un medidor de efecto flicker, se ha de tener en cuenta que debe ser un instrumento que, *partiendo de las fluctuaciones de tensión existentes en el punto de la red en el que se instala el medidor, produzca una indicación numérica proporcional a la sensación de molestia visual*. Para obtener un resultado adecuado, ha sido necesario tener en cuenta, en el instrumento, el siguiente proceso:

- ➡ 1.- *La entrada debe ser una fluctuación de tensión*

- ➡ 2.- *Se ha de modelar la lámpara*

- ➡ 3.- *Se ha de conseguir la fluctuación de iluminación*

- ➡ 4.- *Se ha de modelar el sistema ojo-cerebro*

- ➡ 5.- *La salida deberá ser una indicación numérica de la sensación de molestia visual*

- ➡ La magnitud de entrada al instrumento debe ser la *variación relativa de la tensión* y no su valor absoluto, puesto que el ojo del observador se supone que se ha adaptado al nivel medio de luminosidad existente en el ambiente o en la zona en la cual realiza su ocupación.

# Evaluación del flicker

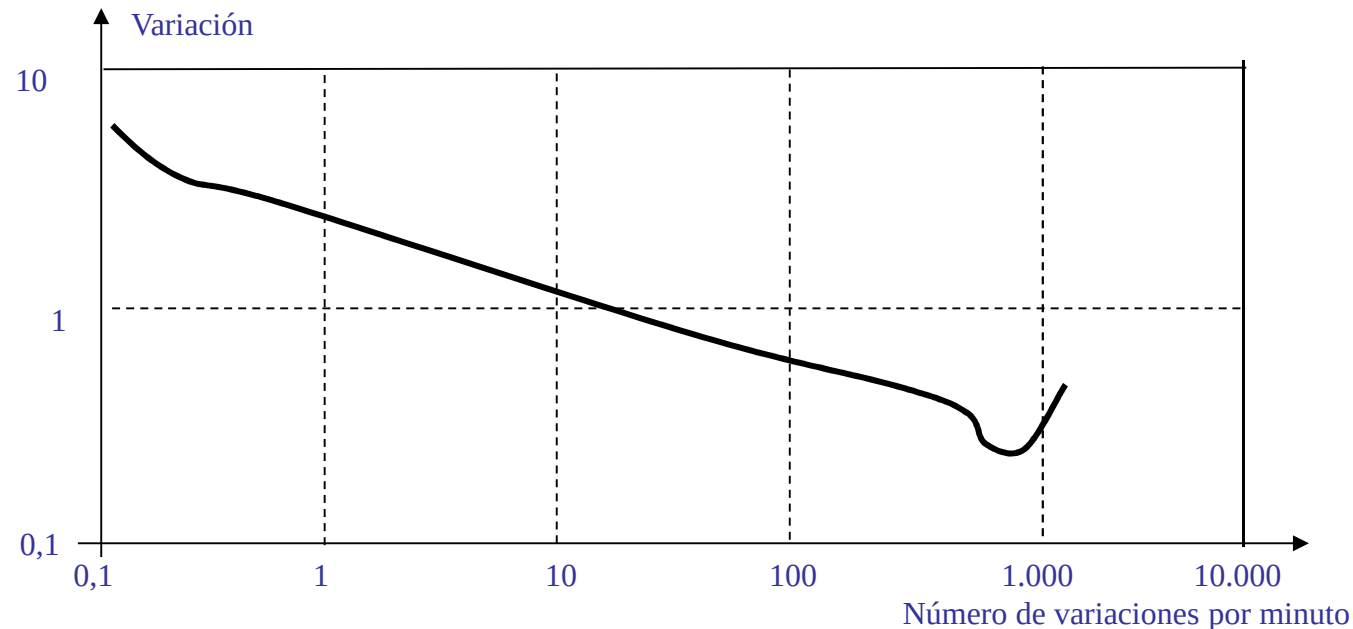
- ➡ La severidad del “flicker”, es decir, la intensidad de la molestia que éste produce, se puede evaluar, básicamente, mediante **dos índices**:
- ➡ El “Pst” que evalúa la severidad del “flicker” en períodos cortos de tiempo, con intervalos de observación de **diez minutos**.
- ➡ El valor del Pst, se expresa en unidades p.u., de modo que, para valores de Pst superiores a 1, se considera que el “flicker” es perceptible y afecta, por lo tanto, a la visión.
- ➡ El “Plt” que evalúa la severidad del “flicker” de larga duración, con intervalos de observación de **dos horas**.
- ➡ El “Plt”, se calcula según IEC 61000-3-7, a partir de doce valores consecutivos de Pst de acuerdo con la siguiente expresión:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} P_{st,i}^3}$$

La evaluación de la severidad del “flicker”, se puede hacer a partir de dos criterios: basados en las medidas de un día o de una semana (aunque la norma establece una semana), respectivamente. Los resultados se obtienen mediante tratamiento estadístico de los valores registrados de los índices Pst y Plt.

# Niveles de compatibilidad

- ➡ Los valores del nivel de CEM de las fluctuaciones de tensión, con una probabilidad del 95% de no ser excedidos, dependen del valor de la tensión del sistema de distribución. Estos niveles, actualmente, están referidos a variaciones de tensión rectangulares con diferentes tasas de repetición (ver figura). No obstante, es posible relacionar los efectos de las variaciones de tensión no rectangulares con dicha curva, utilizando un “flickermetro” o los factores de conversión que se indican en la norma [EN 61000-3-3](#).



# Índices de severidad del flicker

- ➡ En la tabla inferior, se recogen los valores establecidos del índice de severidad del “flicker” en redes de baja, media y alta tensión, tanto para el intervalo de observación base de 10 minutos (Pst), como para períodos largos (Plt).

| Nivel         | Pst (p.u.)      | Plt (p.u.)      |
|---------------|-----------------|-----------------|
| Baja Tensión  | 1               | 1               |
| Media Tensión | 1               | 1               |
| Alta Tensión  | 0,80 a 0,90 (*) | 0,65 a 0,80 (*) |

(\*) Es una recomendación que no aparece en la norma UNE-EN 50160 la cual, además, únicamente establece las características de la onda de tensión en BT :  $U_n \leq 1\text{kV}$  y MT:  $1\text{kV} < U_c \leq 35\text{ kV}$

## NIVELES DE CEM DE LA SEVERIDAD DE “FLICKER” EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Los valores reflejados en la tabla no debieran ser superados y deben cumplirse con una probabilidad igual o mayor del 95% durante el período de medida de una semana.

El LÍMITE DE EMISIÓN debe ser igual o menor que los niveles de CEM.

# Causas que originan flicker

Los aparatos o aplicaciones industriales productoras de fluctuaciones de tensión y, como consecuencia, flicker, podrían clasificarse en dos grupos:

- ✚ **Aquellos cuya carga varía rápidamente, como pueden ser: hornos de arco, máquinas de soldadura eléctrica, laminadoras, compresores, etc.**
- ✚ **Los que están sometidos a cargas no fluctuantes pero intermitentes, como motores con arranques frecuentes, algunos electrodomésticos, etc.**

| Frecuencia de variación de la carga | Receptores perturbadores                                                                                                          |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Hora                                | Motores para bombas de uso doméstico<br>Motores para bombas de circulación de aceite<br>Conexión de equipos de aire acondicionado |
| Minuto                              | Ascensores<br>Grúas<br>Arranque estrella-triángulo de motores                                                                     |
| Segundo                             | Hornos de arco<br>Soldadoras por arco<br>Soldadoras por puntos                                                                    |

Tabla 2.- Frecuencia de variación de la carga de receptores que provocan fluctuaciones de tensión



# Efectos que producen

- ✚ Las fluctuaciones de tensión pueden afectar a muchos receptores sensibles conectados a la red:

Estas fluctuaciones de tensión no suelen tener una amplitud superior a  $\pm 10\%$ , por lo que no afectan a muchos equipos

Los aparatos que producen mayor flicker comparativamente a su potencia son:

- Las lámparas de incandescencia y de descarga
- Los monitores y receptores de televisión

## Limitadores

- Compensadores síncronos rotativos
- Condensadores serie en líneas de distribución

### Compensadores estáticos:

- ✚ Reactancias saturables
- ✚ Condensadores conmutados por tiristores (TSC)
- ✚ Bobinas controladas por tiristores (TCR)
- ✚ TSC, TCR y bancos de condensadores = SVC (Static Var Compensator)
- ✚ STATCOM (Static Synchronous Compensator)

# Modelo de flickermetro

- ➡ Es necesario establecer un modelo que valore numéricamente la impresión subjetiva de molestia, para lo cual es preciso comprender la fisiología del flicker.
- ➡ Realizar estudios estadísticos sobre personas sometidas a fluctuaciones de luminosidad.
- ➡ Modelo de la cadena lámpara – ojo – cerebro.
- ➡ Indicación numérica de la sensación de molestia correspondiente a cada fluctuación de tensión.

# Fisiología del flicker

- ➡ El “flicker” es un fenómeno subjetivo que varía de individuo a individuo, no sólo en términos de intensidad de la sensación sino también en todo lo que se refiere a la amplitud de la molestia generada.
- ➡ Las investigaciones realizadas han conseguido generar un modelo de sistema ojo-cerebro adecuado para caracterizar la percepción de la fluctuación luminosa.

# Fisiología del flicker

➡ Para la determinación del modelo fue preciso previamente dar respuesta apropiada a las siguientes preguntas:

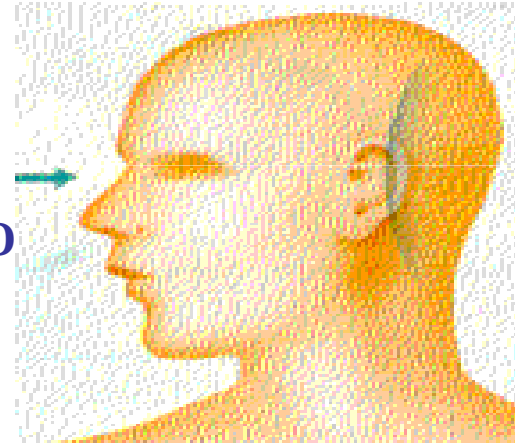
- 1.- *¿Cuál es la sensación de percepción visual de una fluctuación luminosa caracterizada por una determinada forma y secuencia de repetición?*
- 2.- Fijada la forma de la fluctuación, *¿Cómo varía la sensación recibida en función de la frecuencia?*
- 3.- Aunque las variaciones esporádicas de iluminación son perceptibles y pueden resultar molestas, *¿cómo caracterizar las respuestas fisiológicas a este tipo de estímulos?*
- 4.- *¿Es posible asimilar la sensación generada por una fluctuación de luminosidad irregular a la provocada por una fluctuación periódica, por ejemplo senoidal o rectangular, de forma que se pueda construir un instrumento de medida que sea independiente de la forma y del tiempo de duración de la fluctuación?.*

# Fisiología del flicker

- ➔ El resultado de las pruebas realizadas sobre individuos han demostrado que la visión humana es un sistema complejo y subjetivo, dependiente no sólo de las características del ojo, sino también del mecanismo de percepción cerebral, influenciado también por el grado de atención que el sujeto sometido al experimento demuestre ante la existencia del fenómeno.



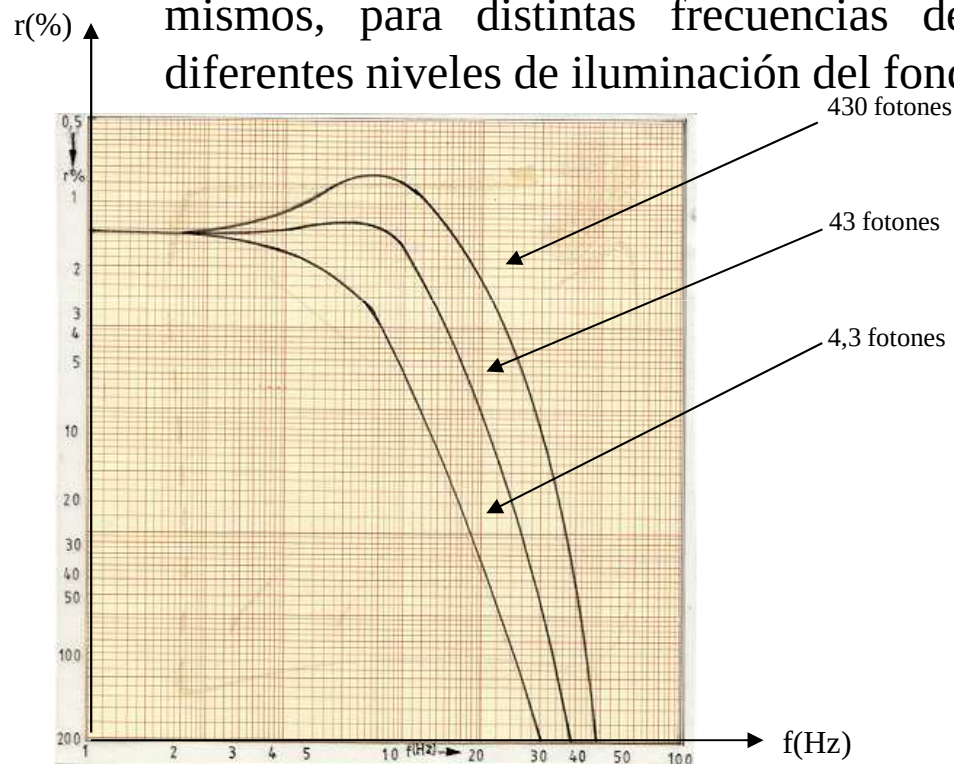
Cadena  
**OJO-CEREBRO**



**CONCLUSIONES:** El ojo tiene una respuesta selectiva en función de la frecuencia de las fluctuaciones luminosas periódicas, con un **máximo de sensibilidad alrededor de los nueve hertzios**, y también que **la intensidad del estímulo percibido es proporcional al cuadrado de la amplitud de la perturbación**. La sensación de molestia, flicker, depende de la amplitud relativa de la variación con respecto a la intensidad de iluminación existente en el ambiente (adaptación del ojo). Existiendo, además, un **efecto de memorización**.

# Experimentos de De Lange

- ➡ Los experimentos de De Lange consistían en la aplicación, a los individuos objeto del experimento, de variaciones de luminosidad, simétricas y asimétricas, y en valorar la perceptibilidad de los mismos, para distintas frecuencias de repetición, partiendo de diferentes niveles de iluminación del fondo observado por el sujeto.



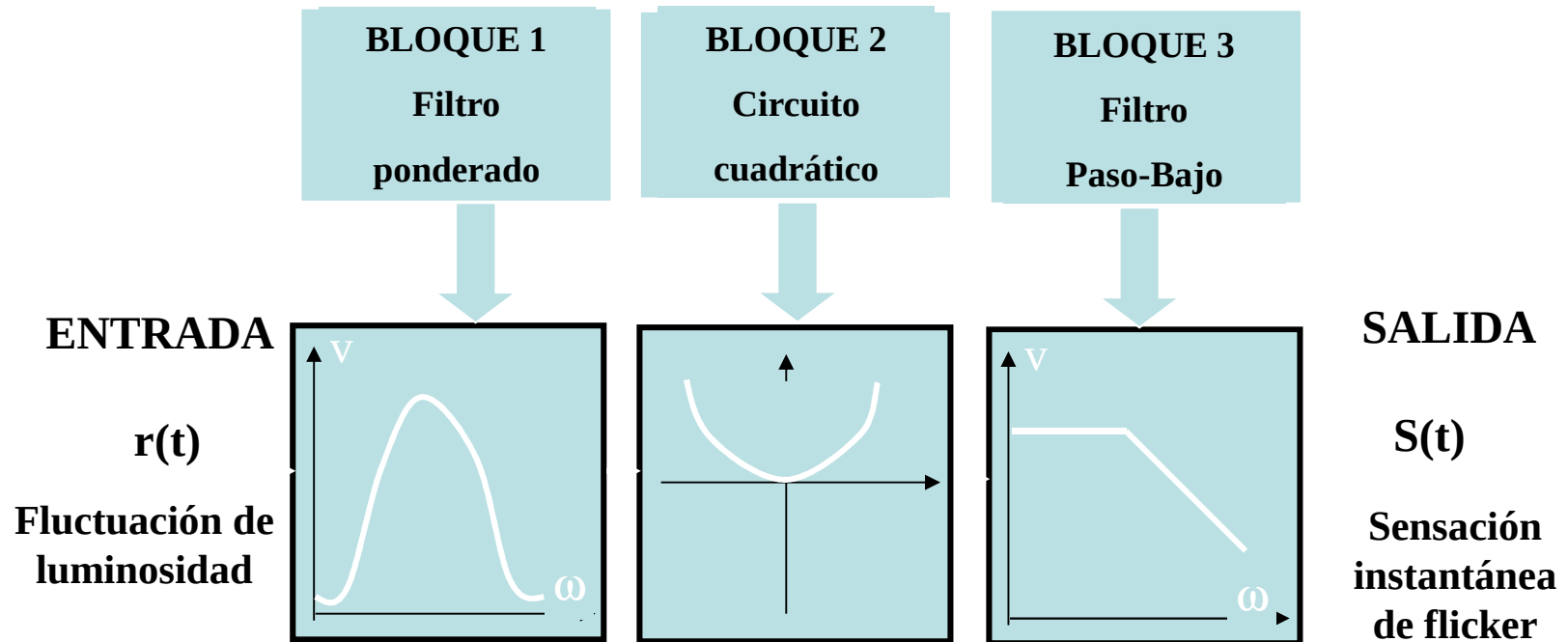
## Curvas de De Lange

De Lange propone un modelo eléctrico del comportamiento del ojo en función de la frecuencia, asumiendo un funcionamiento similar al de un filtro paso bajo. Este modelo fue perfeccionado por Kelly.

# Experimentos de Rashbass

- ➡ Rashbass utilizó variaciones de iluminación tipo impulso, positivas y negativas respecto a la iluminación media ambiental y obtuvo las siguientes conclusiones:
- ➡ 1.- La duración del estímulo es superior a la duración de la variación tipo impulso que lo provoca.
- ➡ 2.- El signo de la variación, incremento o disminución de la luminosidad, no influye en la sensibilidad de la percepción.
- ➡ 3.- Si dos impulsos luminosos se suceden con amplitudes A y B, se obtiene el mismo nivel de sensación con la secuencia B y A.
- ➡ 4.- La relación existente entre la sensación y la amplitud del estímulo es de tipo cuadrática.

# El modelo de Rashbass



-**BLOQUE 1**, filtro de entrada, (basado en De Lange) representa el comportamiento del ojo en función de la frecuencia.

-**BLOQUE 2**, representa a un circuito que eleva al cuadrado las señales y que modela la no linealidad de la respuesta visual a la amplitud del estímulo y la insensibilidad a su signo.

- **BLOQUE 3**, filtro paso-bajo final, modela el efecto de acumulación de impulsos repetitivos

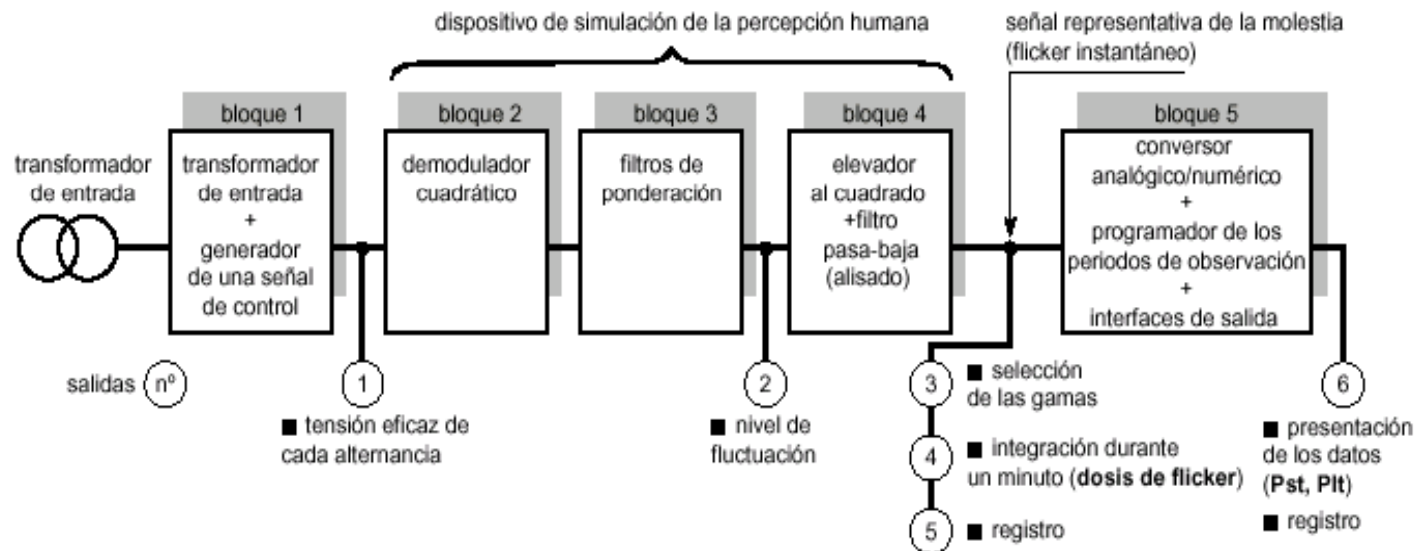


# El medidor de la IEC

- ➡ Basado en los experimentos de Simons, De Lange y Rashbass
  - ➡ Establece una relación entre la amplitud y frecuencia de las fluctuaciones regulares de luminosidad y el nivel de perceptibilidad de la molestia
  - ➡ Puede determinar la sensación de flicker generada por fluctuaciones irregulares de luminosidad (tensión)
  - ➡ Tiene en cuenta la constante de tiempo del cerebro humano así como el término memoria ante todo tipo de fluctuaciones de iluminación
- ➡ Los estudios de Rashbass se han utilizado como base en la elaboración del medidor de flicker de la IEC, con sólo dos modificaciones:
- 1.- La curva de respuesta del ojo en función de la frecuencia de la fluctuación ha sido obtenida de las utilizadas en Francia y Alemania.
  - 2.- La constante de tiempo del filtro paso-bajo se fija en 300 ms.

# El medidor de la UIE

✚ El esquema básico del medidor desarrollado por la Unión Internacional de Electrotermia (UIE), es el que se muestra en la figura; en su diseño han participado diferentes grupos de trabajo, entre ellos de la IEC.



✚ El diseño incorpora un modelo similar al propuesto por Rashbass (bloques 2, 3 y 4) y, además, un convertidor analógico-digital con programación de los períodos de observación y adecuación de la señal de salida para obtener estadísticamente el valor de Pst y por cálculo el Plt (bloque 5). Existe un acondicionador de señal de entrada que se encarga de normalizar y estabilizar la tensión eléctrica a la entrada del instrumento (bloque 1). El medidor proporciona a la salida los valores de Pst y Plt, indicativos de la severidad del Flícker.

# El medidor de la UIE



Uno de los aparatos de medida de efecto flicker ha sido desarrollado por PANENSA S.A. en Corcelles Suiza, sobre la base de la publicación 868 (Flickermetro. Especificaciones funcionales y de concepción) de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). El medidor es un aparato portátil con indicador visual y que tiene las siguientes características:

- 3 canales de entrada 230 V., 50 Hz, para medida de tensiones de 150-250 V., c.a.
- 3 canales de entrada 230 V., 50 Hz, para la medida de tensiones de 50-150 V., c.a.
- Circuito de memoria RAM extraíble que independiza la programación y el estudio de los resultados del lugar de medición.
- Un circuito de cálculo compuesto por un microprocesador 8097 BH, que se encarga del multiplexado y de la conversión analógico/digital.
- Programa de control
- Resultados de las medidas
- Salida serie RS-232
- Indicador de cristal liquido que permite la lectura cíclica de los últimos valores registrados.

# El medidor de la UIE

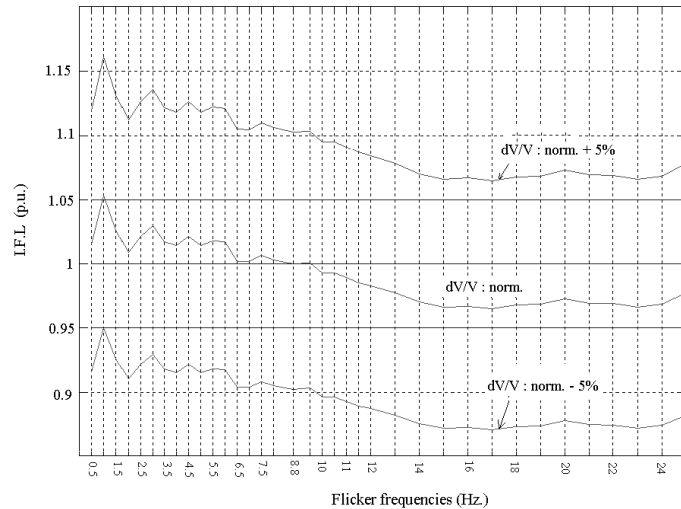


Figura 5.8. I.F.L. Valores del flickermetro para valores de la modulación senoidal normalizada.

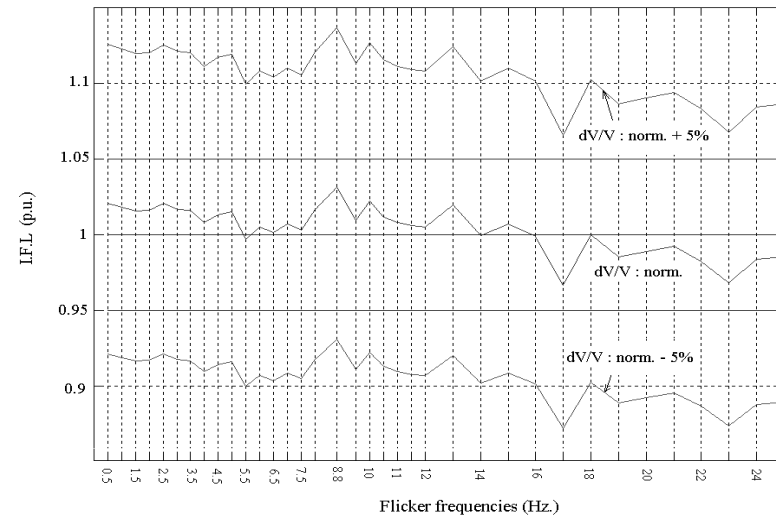


Figure 5.9. I.F.L. Valores del flickermetro para valores de la modulación cuadrada normalizada.

En las figuras 5.8 y 5.9 las líneas medias muestran la respuesta del flickermetro cuando se están midiendo valores normalizados de la fluctuación flicker. La norma también indica que  $IFL = 1$  (p.u) ha de ser posible en un margen de  $\pm 5\%$  de magnitudes normalizadas.

**Nota:**  $IFL = 1$  no significa  $Pst = 1$ .

# El medidor de la UIE

**Una vez en posesión de IFL, el siguiente paso es realizar el análisis estadístico para obtener el valor de Pst.**

La medida de la severidad del flicker, Pst, se basa en un período de observación de 10 minutos y se calcula a partir de las medidas obtenidas por el medidor, que utiliza la siguiente expresión:

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_{1s} + 0.0657P_{3s} + 0.28P_{10s} + 0.08P_{50s}}$$

El factor más importante es la forma de calcular los percentiles promedio en la ecuación anterior. El valor del percentil dependerá del tipo de clasificación de clases en la Función de Probabilidad Acumulativa (CPF). Los percentiles P0,1s , P1s , P3s , P10s y P50s, representan los niveles de *flicker* excedidos a lo largo de 0,1; 1; 3; 10 y 50% del tiempo correspondiente al período de observación.

**Cada percentil corresponde a un valor ponderado:**

$$P_{50s} = (P_{30s} + P_{50s} + P_{80s}) / 3$$

$$P_{10s} = (P_{6s} + P_{8s} + P_{10s} + P_{13s} + P_{17s}) / 5$$

$$P_{3s} = (P_{2,2s} + P_{3s} + P_{4s}) / 3$$

$$P_{1s} = (P_{0,7s} + P_{1s} + P_{1,5s}) / 3$$

# Otros índices de flicker

En años posteriores a la normalización del medidor, los estudios se centran en la influencia del flícker en las redes eléctricas. Aparecen propuestas de mejora a la hora de valorar las medidas del medidor de flícker.

**Pst MD** = Máximo Pst de los valores de un día.

**Pst 99D** = Valor de Pst que no ha sido sobrepasado por el 99% de las medidas de un día

**Pst 99** = Valor de Pst que no ha sido sobrepasado por el 99% de las medidas de una semana

**Pst 95D** = Valor de Pst que no ha sido sobrepasado por el 95% de las medidas de un día

Actualmente, el estudio de flicker también está enfocado a temas como: influencia de los parques eólicos en la generación de flícker, posibilidad de adaptar el medidor de la IEC a los parámetros eléctricos americanos (60 Hz, 120 V), influencia de los huecos en la salida del medidor de flícker, etc.

# Medida de flicker en una siderurgia

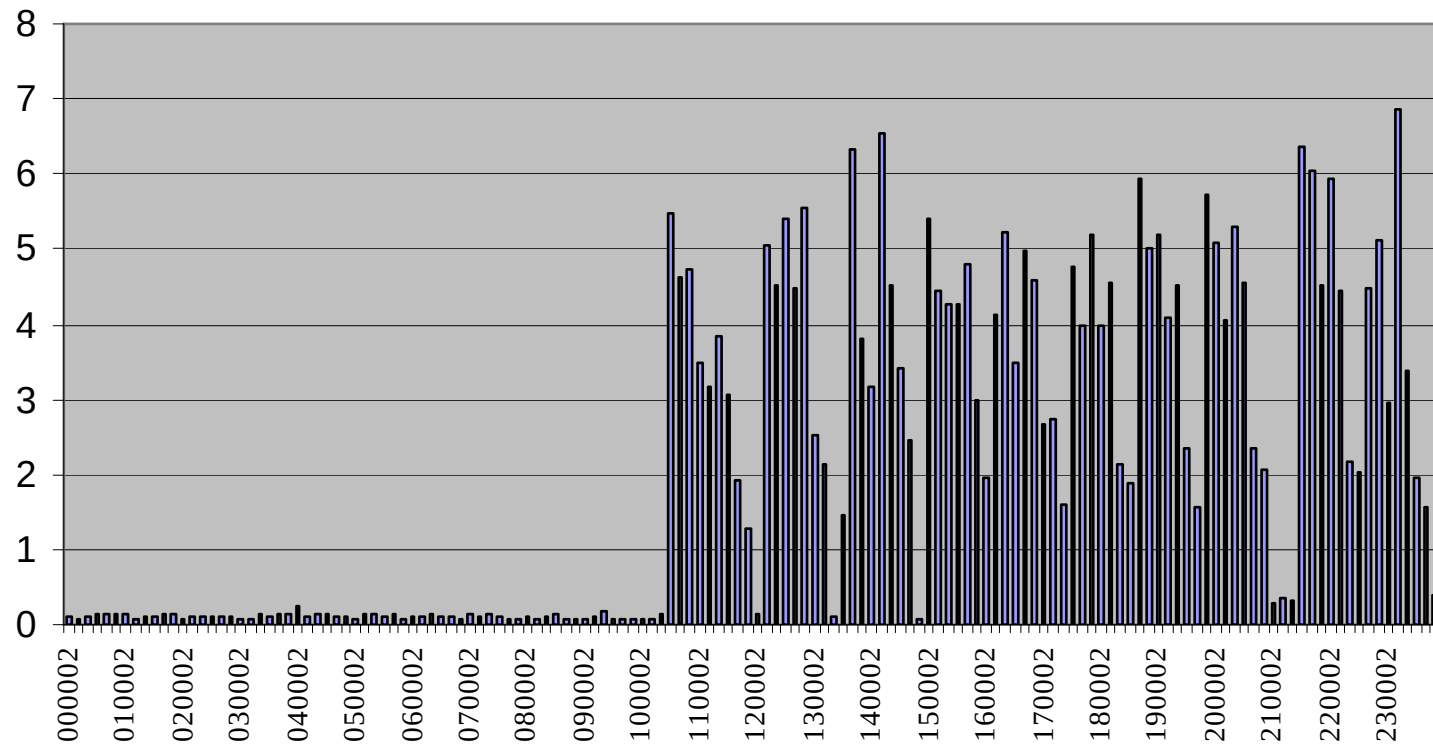
La empresa Siderurgia Nacional de Productos Longos (Xeixal, Portugal), se trata de una acería con un horno de 120 TM, con un transformador de 120 MVA. La acería se alimenta a través de una línea independiente de 55 km a 220 kV que la interconecta con la Subestación de Carregado.



La Scc de la Subestación es de 4.400 MVA, mientras que la Scc en el punto de conexión de la red interior de la factoria es de 1.370 MVA; por lo que, todas las medidas de calidad realizadas se han de extrapolar al punto de interconexión en la Subestación

# Medida de flicker en una siderurgia

PST FASE1 10/2/2003

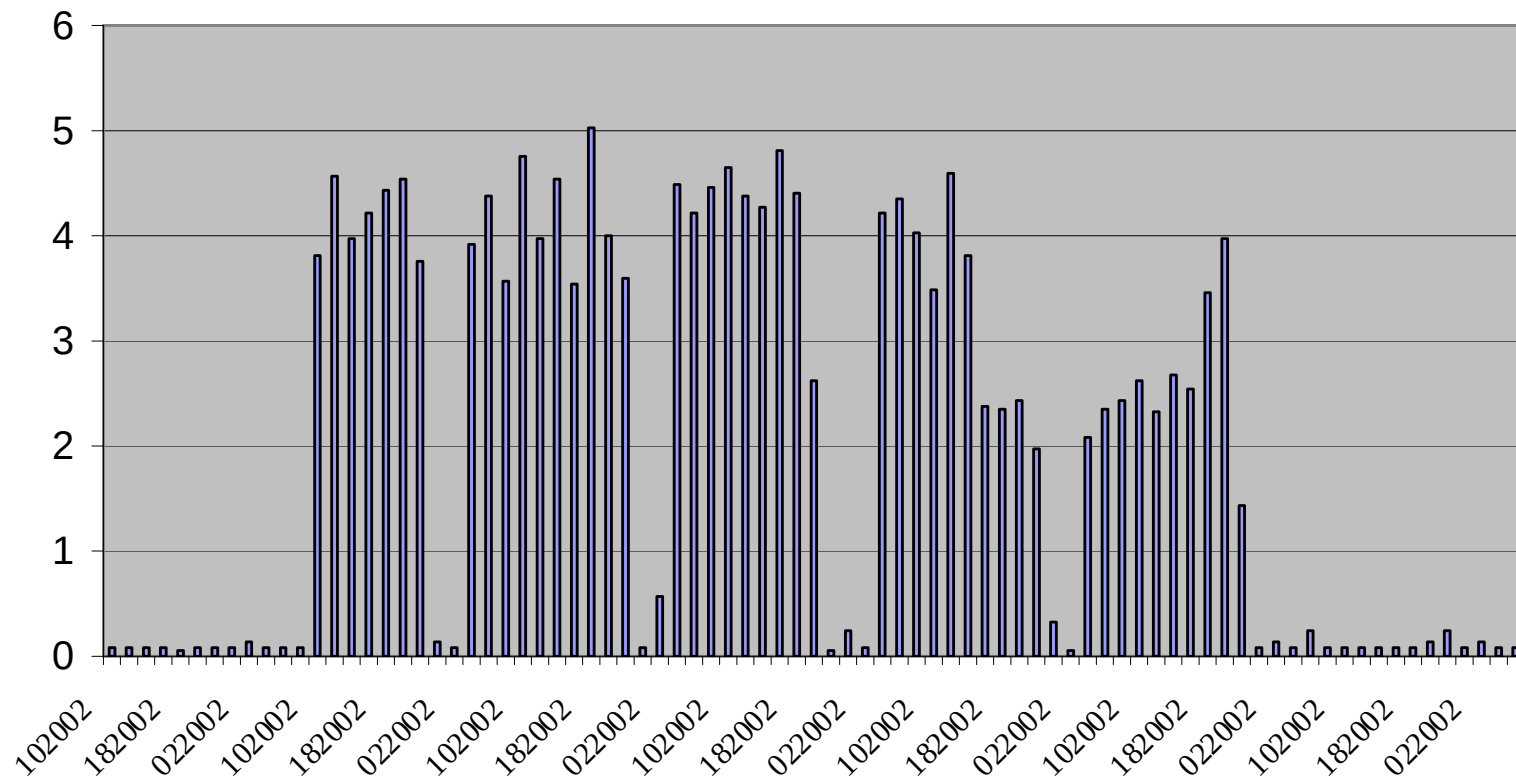


*Diagrama de barras representativo de los índices de flicker de corta duración, Pst, en una de las fases de la empresa siderurgia correspondiente al 10 de febrero de 2003, sin SVC.*



# Medida de flicker en una siderurgia

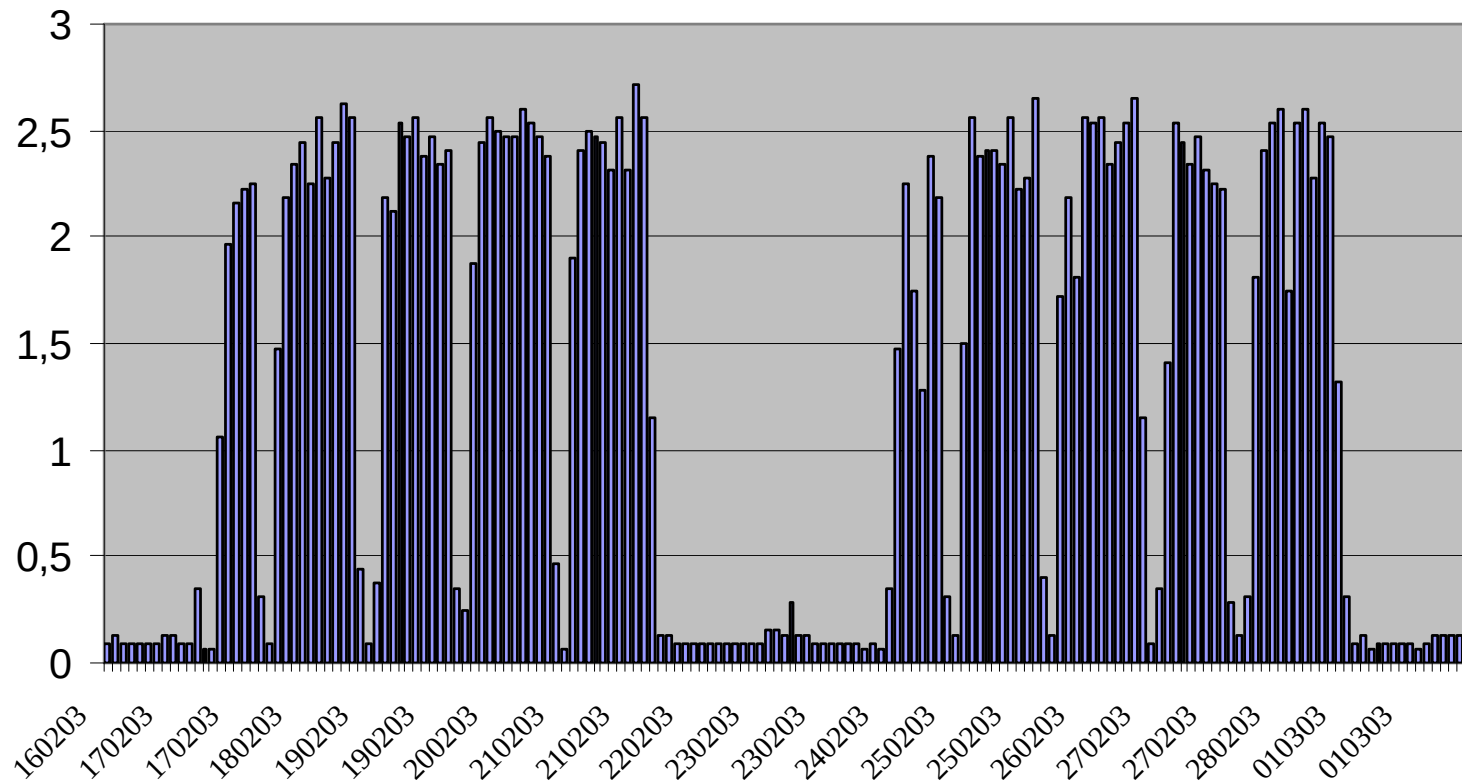
PLT FASE1



*Diagrama de barras representativo de los índices de flicker de larga duración, Plt, en una de las fases de la empresa siderurgia con el horno al 37% de su potencia y con el SVC sin conectar .*

# Medida de flicker en una siderurgia

PLT FASE1



*Diagrama de barras representativo de los índices de flicker de larga duración, Plt, en una de las fases de la empresa siderurgia con el horno al 37% de su potencia y con el SVC conectado.*

# Medida de flicker en una siderurgia

| <b>MEDIDAS EN UNA SIDERURGIA CON HORNOS DE ARCO</b><br><b>Del 9/2/2003 al 13/2/2003 y del 16/2/2003 al 20/2/2003</b> |                                                               |       |       |              |       |       |       |       |              |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|
| <b>FLICKER<br/>Pst 95</b>                                                                                            | D 9                                                           | D 10  | D 11  | D 12         | D 13  | D16   | D17   | D18   | D19          | D20   |
| FASE 1                                                                                                               | 0,125                                                         | 6,031 | 6,313 | 6,031        | 5,938 | 0,156 | 2,906 | 3,281 | <b>3,313</b> | 3,280 |
| FASE 2                                                                                                               | 0,156                                                         | 5,750 | 6,313 | <b>6,375</b> | 5,781 | 0,156 | 2,844 | 3,281 | <b>3,313</b> | 3,219 |
| FASE 3                                                                                                               | 0,125                                                         | 5,688 | 5,625 | 5,688        | 5,188 | 0,188 | 2,750 | 3,031 | 3,156        | 3,094 |
|                                                                                                                      | <b>Pst 95</b><br><b>FLICKER EXTRAPOLADOS A LA SUBESTACIÓN</b> |       |       |              |       |       |       |       |              |       |
| FASE 1                                                                                                               | 0,039                                                         | 1,878 | 1,965 | 1,878        | 1,849 | 0,049 | 0,905 | 1,022 | <b>1,031</b> | 1,021 |
| FASE 2                                                                                                               | 0,049                                                         | 1,775 | 1,965 | <b>1,985</b> | 1,800 | 0,049 | 0,885 | 1,022 | <b>1,031</b> | 1,002 |
| FASE 3                                                                                                               | 0,039                                                         | 1,771 | 1,751 | 1,771        | 1,615 | 0,058 | 0,856 | 0,944 | 0,983        | 0,963 |

- Sin SVC
- Con SVC
- Sin Horno

De forma resumida, en condiciones normales de funcionamiento, si bien trabajando por debajo de las potencias nominales y **con SVC instalado**, el nivel de flicker Pst95% diario máximo alcanzado es de **3,313** en el punto de medida, que haciendo la corrección para contemplar su efecto en la subestación resulta de **1,031** que fue alcanzado el día 19 de febrero en la fases 1 y 2 con una potencia del horno de alrededor de 30 MW (30.690 kW).

# Origen del flícker

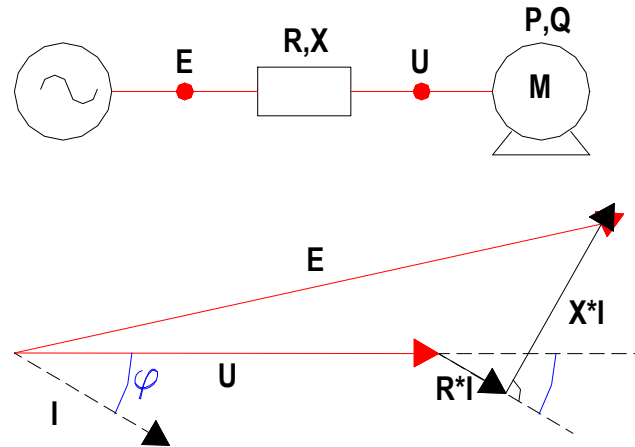


Figura 5.19. Las fluctuaciones de tensión, origen del flicker, se deben a variaciones de intensidad  $I$  que recorren la impedancia de la red.

Si se considera que el ángulo entre  $E$  y  $U$  es pequeño:  $\Delta U = E - U \approx R \cdot I \cos \varphi + X \cdot I \sin \varphi$   
 Se puede escribir:  $P = U \cdot I \cos \varphi$  y  $Q = U \cdot I \sin \varphi$  De donde resulta:

$$\Delta U = \frac{R \cdot P + X \cdot Q}{U} \xrightarrow{\text{En valor relativo}} \frac{\Delta U}{U} = \frac{R \cdot P + X \cdot Q}{U^2} \xrightarrow{\text{En AT}} \frac{\Delta U}{U} \approx \frac{X \cdot Q}{U^2} = \frac{Q}{S_{CC}}$$

✚ La variación de la potencia reactiva  $Q$  tiene un efecto preponderante en la variación relativa de tensión y, por lo tanto, en el flicker como se ha podido ver en el ejemplo práctico; por todo ello se debe de controlar mediante el uso de los equipos de compensación de potencia reactiva apropiados.

En BT, la resistencia  $R$  no es despreciable, de modo que es preciso actuar sobre la potencia activa  $P$  y la potencia reactiva  $Q$ .

# Dispositivos perturbadores

## **El horno de arco**

El horno de arco es el principal generador de flícker. Su funcionamiento normal provoca unas fluctuaciones de tensión, que se perciben más cuanto mayor sea la potencia de los hornos, en particular en relación a la potencia de cortocircuito de la red, habitualmente su valor es del orden de decenas de MVA.

## **Máquinas con cargas fluctuantes**

Los motores de potencia elevada, o grupos de motores, con arranques y paradas frecuentes, o con carga variable, (como los de los trenes de laminación), así como las máquinas con par resistente alterno (compresores), pueden producir flícker.

## **Reguladores de potencia con tiristores**

Para huir de los inconvenientes del “control por ángulo de fase”, (armónicos y parásitos en alta frecuencia), los reguladores con tiristores (a veces llamados también “convertidores”), funcionan con “control PWM” cuando su carga lo permite.

## **Los equipos de soldadura**

Los soldadores de arco de potencia pequeña no son muy molestos (salvo utilización intensiva en una instalación de BT). Por el contrario, los ciclos repetitivos de soldadores por resistencia, a frecuencias comprendidas entre 0,1 y 1 Hz, dan origen a perturbaciones en forma de oscilaciones bruscas de tensión

# Otros orígenes de flicker

## Mal funcionamiento del sistema de iluminación

Los tubos con balastro ferromagnético tradicional, además del parpadeo que se observa al final de su vida, pueden generar flicker cuando están asociados a un regulador, puesto que la ionización del gas no se asegura cuando el mando de ángulo de fase amputa hacia una parte de la senoide.

## Flícker provocado por los subarmónicos y los interarmónicos

- Se ha constatado y demostrado que, en ciertas condiciones, la presencia de interarmónicos en la tensión de alimentación también es una fuente del flícker.
- En particular, las lámparas de incandescencia son sensibles en la banda de frecuencias comprendidas entre 20 Hz y 80 Hz, mientras que las fluorescentes lo son a frecuencias superiores a 100 Hz. Las lámparas de balastro inductivo parecen más sensibles a este fenómeno que las que llevan balastro capacitivo.
- Las lámparas incandescentes presentan flicker (parpadeo) cuando dos interarmónicos, o un interarmónico y un armónico, con frecuencias próximas están presentes en la tensión. Entonces, la lámpara presenta flicker con una frecuencia igual a la diferencia de las frecuencias de los interarmónicos. Puede aparecer flicker si la diferencia de frecuencias, se encuentra dentro del margen perceptible de 0 a 50 Hz (especialmente alrededor de los 9 Hz). También puede aparecer flicker en las lámparas incandescentes si hay sólo un interarmónico presente y su frecuencia está por debajo de dos veces la frecuencia fundamental

## Cálculo del Pst esperado para interarmónicos

- 1.- El Pst esperado para el flicker causado por dos interarmónicos se puede determinar comparándolo con el flicker causado por una fluctuación de tensión senoidal.
- 2.- Una fluctuación de tensión senoidal de magnitud  $d$  y frecuencia  $f$ , se puede expresar por la siguiente ecuación:

$$U = U_0 \cdot \sin(\Omega t) \cdot \left[ 1 + \frac{d}{2} \sin(\omega t) \right]$$

En una lámpara incandescente la potencia, y entonces la luminancia de salida, es proporcional al cuadrado de la tensión de entrada. Por consiguiente, en un flickérmetro la señal de tensión es elevada al cuadrado en el primer bloque del proceso. Elevando al cuadrado la ecuación anterior proporciona una componente fundamental con otras componentes (que se desprecian aquí).

$$U^2 = U_0^2 \left[ \dots + \frac{d}{2} \sin(\omega t) + \dots \right]^2 \quad (*)$$

Una tensión que contiene dos interarmónicos de magnitudes  $a$  y  $b$  y frecuencias  $f_A$  y  $f_B$ , se puede expresar por la siguiente ecuación :

$$U = U_0 \cdot [\sin(\Omega t) + a \cdot \sin(\omega_A t) + b \cdot \sin(\omega_B t)]$$

$$U^2 = U_0^2 [\dots + a \cdot b \cdot \cos((\omega_A - \omega_B) \cdot t) + \dots]^2 \quad (**)$$

Comparando las dos ecuaciones cuadráticas, (\*) y (\*\*), está claro que el flicker causado por dos interarmónicos de magnitudes  $a$  y  $b$  y frecuencias  $f_A$  y  $f_B$ , es el mismo flicker que podría ser causado por una fluctuación de tensión sinusoidal de frecuencia  $f = |f_A - f_B|$  y magnitud  $d = 2 \cdot a \cdot b$ .

# EFECTOS QUE PRODUCEN

Como resumen, se puede escribir que todas las fuentes luminosas son sensibles a las variaciones de tensión. En orden decreciente de sensibilidad, se tiene:

- **Las lámparas de vapor de mercurio o de sodio**, pero este tipo de iluminación se suele utilizar para iluminar lugares donde el parpadeo es poco molesto (espacios exteriores, monumentos, carreteras, etc..).
- **Las lámparas de incandescencia.**
- **Las lámparas fluorescentes.**
- **Los receptores de televisión así como los monitores de los sistemas informáticos** tienen una cierta sensibilidad al flícker. Esta sensibilidad es muy variable según los aparatos.



# EFECTOS QUE PRODUCEN

| Fuentes luminosas                                                   | fluorescencia                                                                                                                                                              | Incandescencia                                                                                                                          | Vapor de sodio a baja presión                                                                                                        | Vapor de sodio a alta presión                                                                                                                   | Vapor de mercurio a alta presión                                                                                                                |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de lámparas                                                    | Rectilínea, circular, de un solo casquillo, compacta, miniatura o de sustitución                                                                                           | Estándar, fantasía, halógena BT o MT                                                                                                    |                                                                                                                                      | Con distintos casquillos                                                                                                                        | Ampolla fluorescente, luz mixta con yoduros metálicos, con distintos casquillos                                                                 |
| Potencia eléctrica (W)                                              | 45 - 65                                                                                                                                                                    | 5 - 200                                                                                                                                 | 18 - 180                                                                                                                             | 35 - 1000                                                                                                                                       | 35 - 3500                                                                                                                                       |
| Eficacia luminosa (lm.W <sup>-1</sup> )                             | 35 - 104                                                                                                                                                                   | 8 - 25                                                                                                                                  | 100 - 200                                                                                                                            | 37 - 150                                                                                                                                        | 11 - 120                                                                                                                                        |
| Comportamiento al ponerla en tensión                                | Después del cebado se obtiene el flujo luminoso completo. Una corriente de precalentamiento de algunos segundos puede alcanzar 2 In                                        | El flujo luminoso es inmediato. La sobreintensidad puede alcanzar 14 In                                                                 | Espera de 5 a 10 m desde que se pone en tensión hasta que se obtiene el flujo luminoso completo. No hay una sobreintensidad notable. | Espera de 5 a 7 m desde que se pone en tensión hasta que se obtiene el flujo luminoso completo. La sobreintensidad puede alcanzar 1,2 ó 1,3 In. | Espera de 1 a 4 m desde que se pone en tensión hasta que se obtiene el flujo luminoso completo. La sobreintensidad puede alcanzar 1,5 ó 1,7 In. |
| Comportamiento frente a fluctuaciones de la tensión de alimentación | Sólo se perturba con fluctuaciones 2 ó 3 veces más fuertes que las que afectan a las lámparas de incandescencia. Esto es debido a la remanencia del depósito fluorescente. | Especialmente sensibles a las pequeñas variaciones de tensión repetidas. Esto se debe a la pequeña constante térmica de los filamentos. | Muy sensible, puesto que su inercia térmica es la del plasma de la descarga luminosa.                                                | Muy sensible, puesto que su inercia térmica es la del plasma de la descarga luminosa                                                            | Muy sensible, puesto que su inercia térmica es la del plasma de la descarga luminosa                                                            |

*Principales características y comportamiento frente a las variaciones de tensión de distintas fuentes luminosas.*

# Métodos de prevención y corrección

## Elección de la fuente de iluminación

Ya que existen fuentes luminosas más o menos sensibles al flícker, la solución evidente y la primera que hay que considerar es elegir bien estas fuentes.

- Las lámparas fluorescentes tienen una sensibilidad a las variaciones de tensión dos o tres veces menor que las lámparas de incandescencia, por lo cual se presentan como la mejor elección.

## Modificación del perturbador

El flicker puede atenuarse modificando el ciclo de funcionamiento de la carga perturbadora, por ejemplo el ritmo de soldadura, la rapidez de rellenado del horno. Cuando el arranque directo y frecuente de un motor es la causa del flícker, puede adoptarse un modo de arranque que reduzca la sobreintensidad.

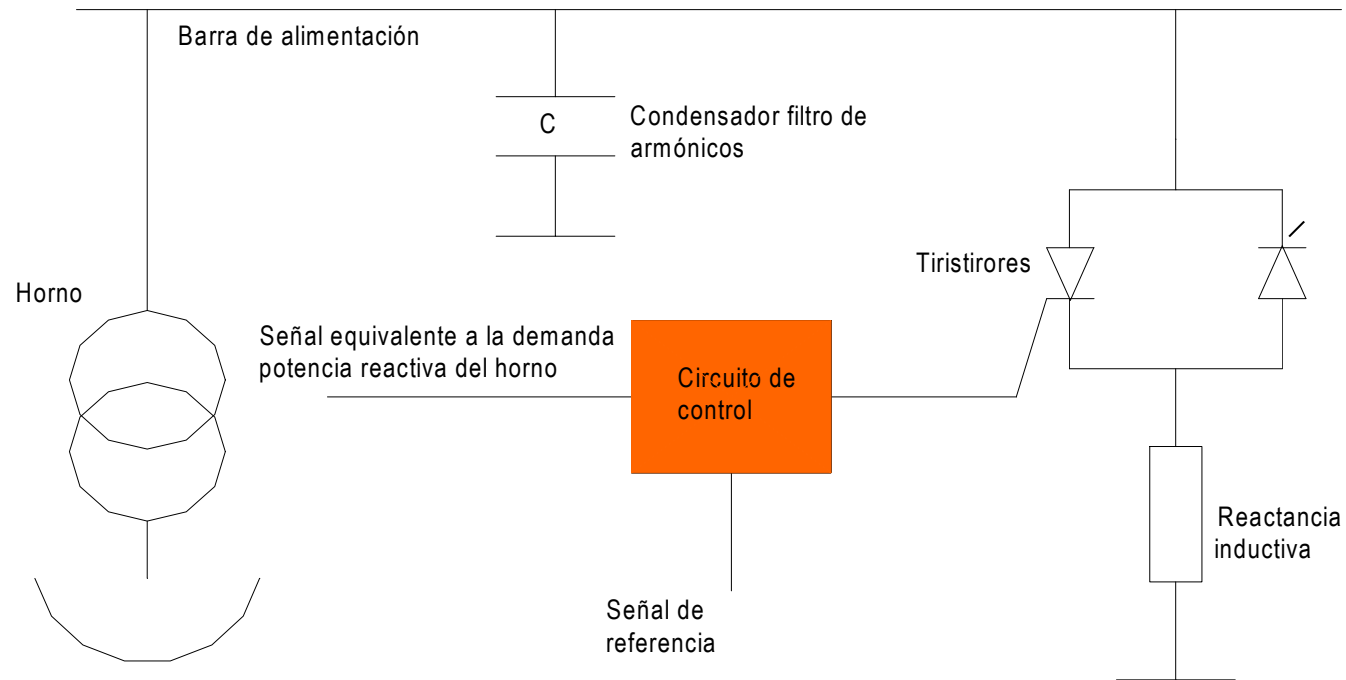
## Modificación de la red

Conexión de los circuitos de iluminación lo más cerca posible de la fuente de alimentación (transformador).

- Aumento de la potencia del transformador común (con  $U_{cc}$  constante).
- Disminución de la tensión de cortocircuito del transformador común (a potencia constante).
- Puesta en paralelo de transformadores suplementarios.
- En BT, aumento de la sección de los conductores.
- Conexión de la carga perturbadora a una red de tensión más elevada.
- Alimentación de la carga por un transformador independiente.

# Métodos de prevención y corrección

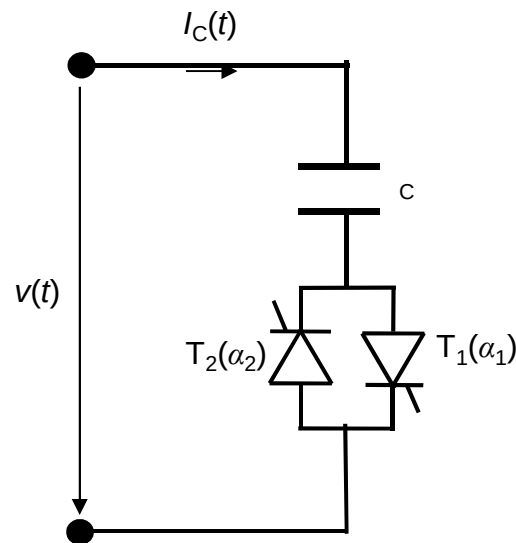
## Reactancias controladas (TCR)



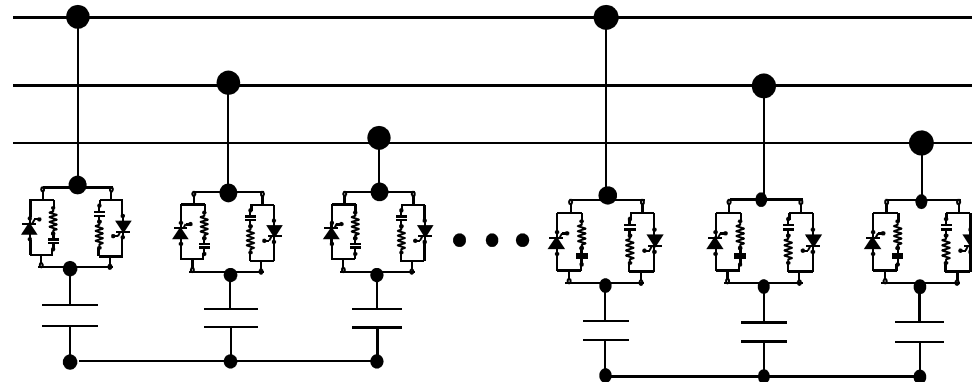
Tienen como función disminuir las variaciones de la potencia demandada que están asociadas a variaciones de su componente reactiva. Su utilización típica es en hornos de arco

# Métodos de prevención y corrección

## Condensadores controlados TSC (*Thyristor Switched Capacitors*)



*Esquema básico de un TSC  
monofásico*

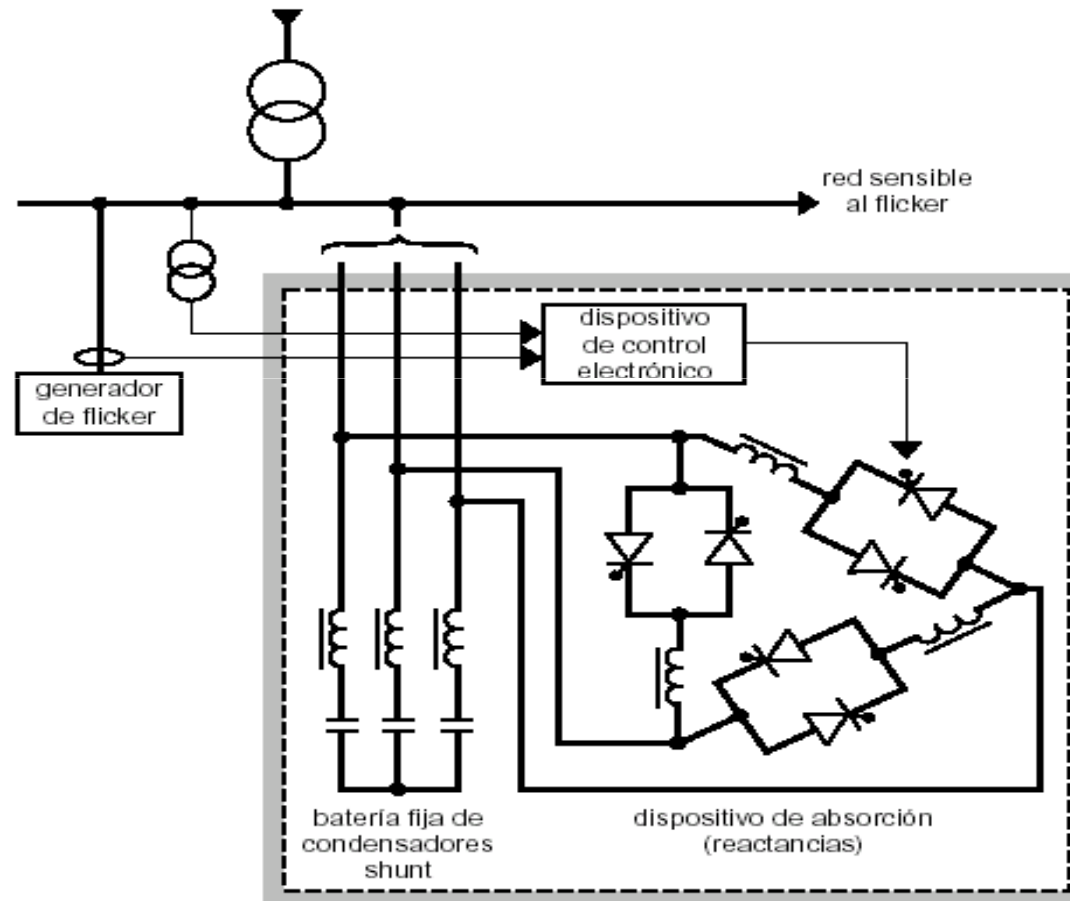


*Esquema representativo de condensadores conmutados por tiristores (TSC).*

Su función es compensar los incrementos de demanda de potencia reactiva corrigiendo las correspondientes variaciones del  $\cos\phi$  de forma que se mantenga aproximadamente constante en un valor prefijado.

# Métodos de prevención y corrección

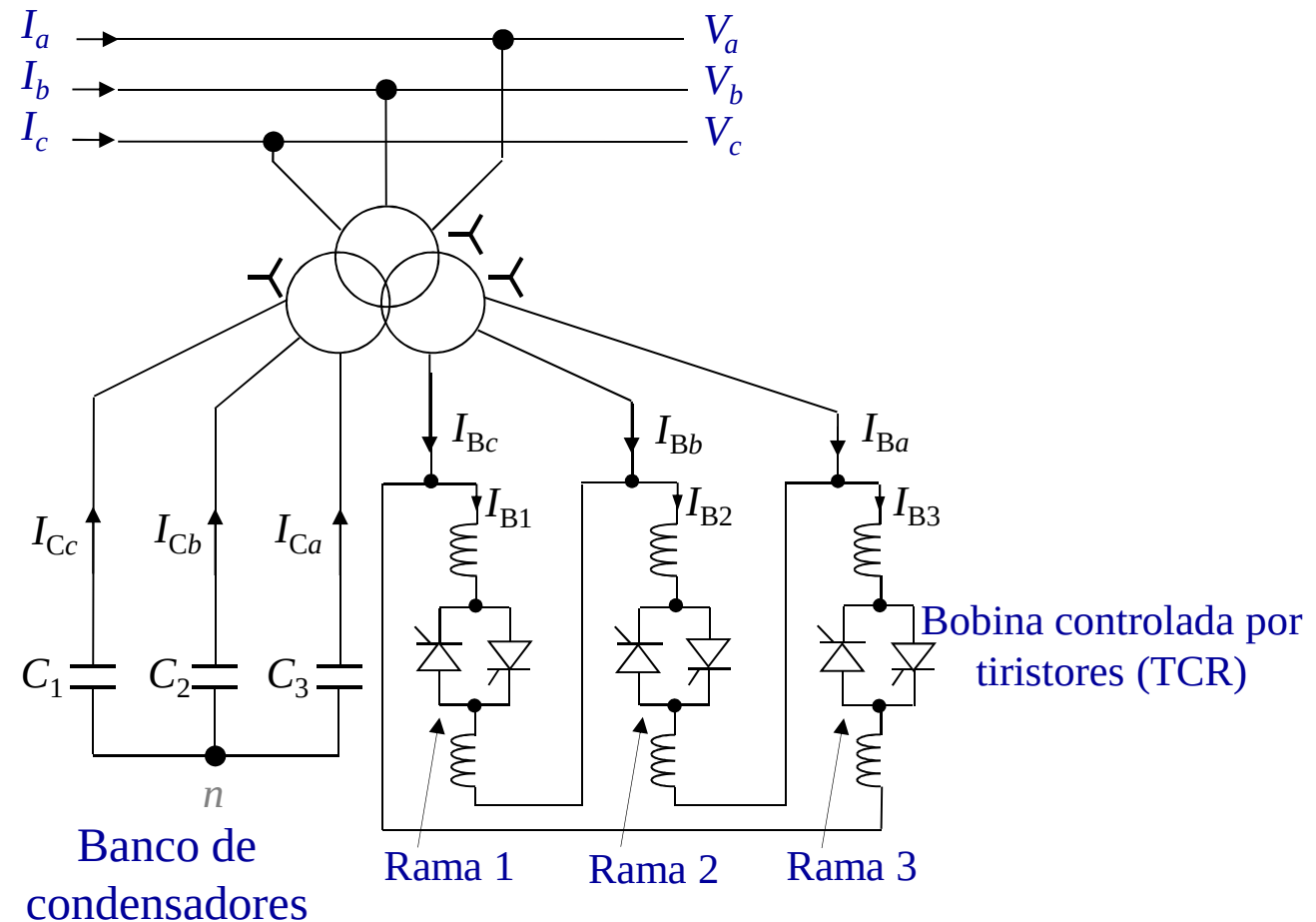
## Reactancias controladas y batería fija de condensadores (SVC)



Su función es compensar los incrementos de demanda de potencia reactiva corrigiendo las correspondientes variaciones del  $\cos\phi$  de forma que se mantenga aproximadamente constante en un valor prefijado.

# Métodos de prevención y corrección

## SVC (Static Var Compensator)



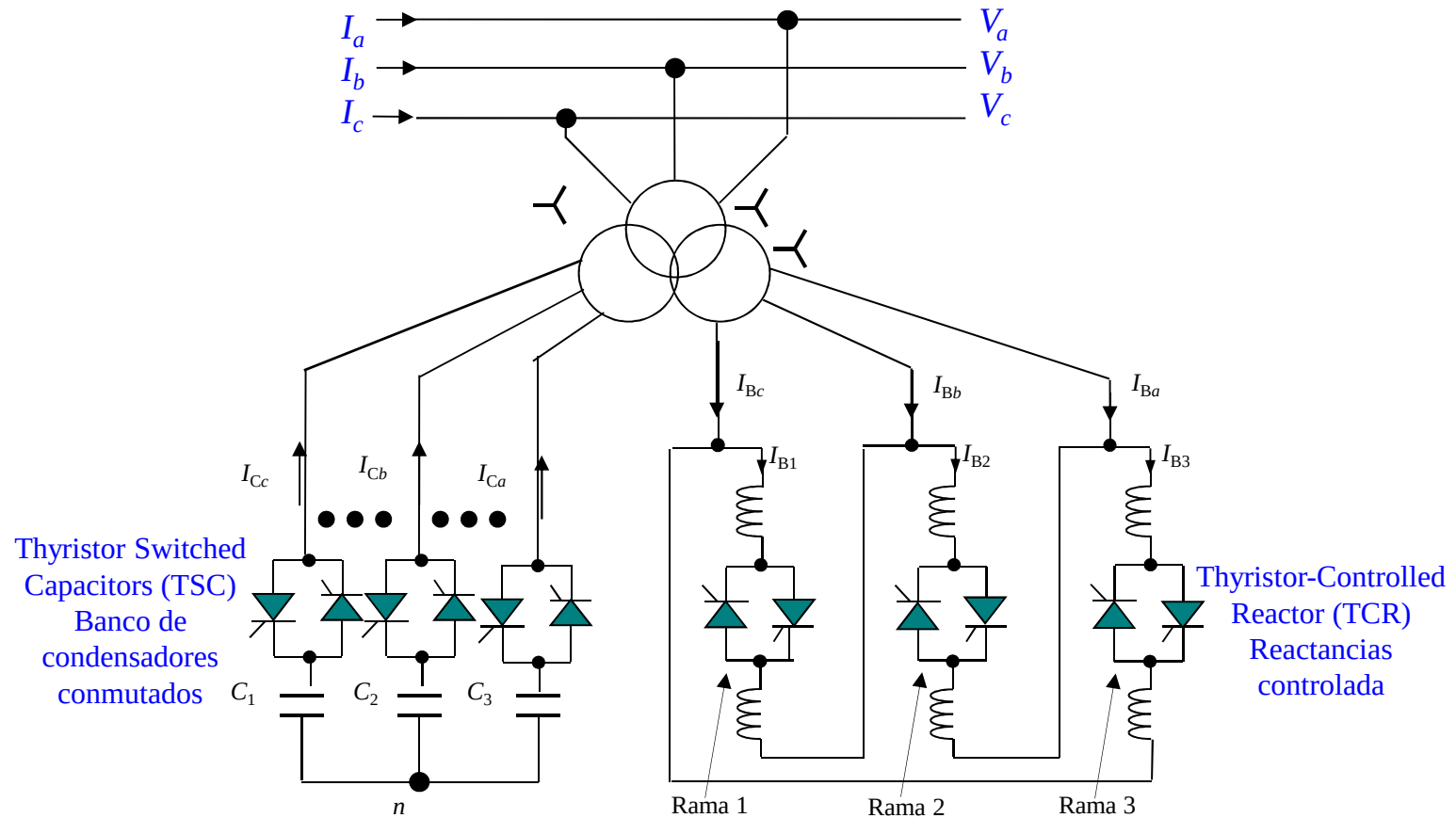
Su esquema de principio incorpora unas inductancias de compensación, una batería fija de condensadores shunt con un filtro y un dispositivo electrónico a base de tiristores, o de IGBTs, que controla las bobinas.

## SVC (Static Var Compensator)

- ✚ El control grueso de tensión está proporcionado por los condensadores, mientras que las bobinas controladas por tiristores proporcionan el control fino. Conmutando la bobina dentro del circuito se inyectan armónicos impares no deseados y normalmente son necesarios bancos de filtros de alta potencia que proporcionen una forma de onda suave. Ya que los filtros en si mismos son capacitivos, ellos también contribuyen a la inyección de MVAR en la red.
- ✚ Otros desarrollos prácticos son también bobinas conmutadas por tiristores y condensadores conmutados por tiristores.
- ✚ Un controlador en lazo cerrado proporciona la regulación de tensión. Es normal disponer de un control de supervisión remota, aparte de los usuales ajustes manuales del conjunto de tensiones.
- ✚ La ventaja principal de los SVCs sobre los esquemas de compensación simple conmutada mecánicamente, es la respuesta casi instantánea de los SVCs a los cambios en la tensión del sistema.
- ✚ Son en general más baratos y requieren menos mantenimiento que los esquemas de compensación dinámica tales como compensadores síncronos.

# Métodos de prevención y corrección

## SVC (Static Var Compensator)

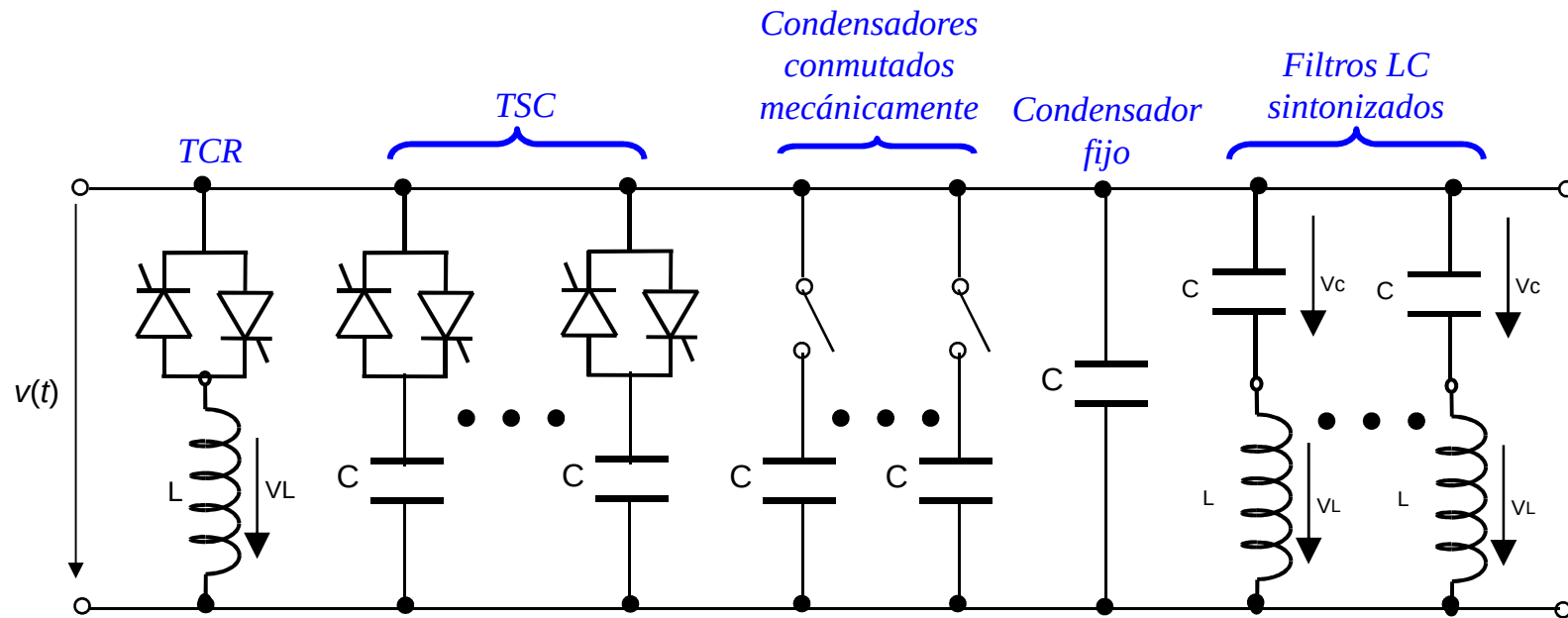


En esquemas más completos la batería de condensadores del SVC esta controlada (condensadores conmutados por tiristores), además de disponer de bobinas controladas.



# Métodos de prevención y corrección

## SVC (Static Var Compensator)



*Esquema eléctrico por fase de un SVC*

En otros esquemas se combinan baterías fijas de condensadores con baterías de condensadores controladas (conmutadas) y, también bobinas controladas y filtros sintonizados para la eliminación de armónicos.

# Métodos de prevención y corrección

## SVC (Static Var Compensator)

El equipo SVC (Static Var Compensator), sirve para compensar automáticamente la energía reactiva. Su uso también permite reducir el flúcker entre un 25% y un 50%.

La siguiente fórmula da un valor estimado del coeficiente de reducción del flúcker que se obtiene con un SVC:

Siendo:

$R_{SVC}$  = factor de reducción de Pst,

$S_{SVC}$  = potencia del compensador (en VAr),

$S_f$  = potencia del horno (en VA).

$$R_{SVC} = 1 + 0,75 \frac{S_{SVC}}{S_f}$$

# Métodos de prevención y corrección

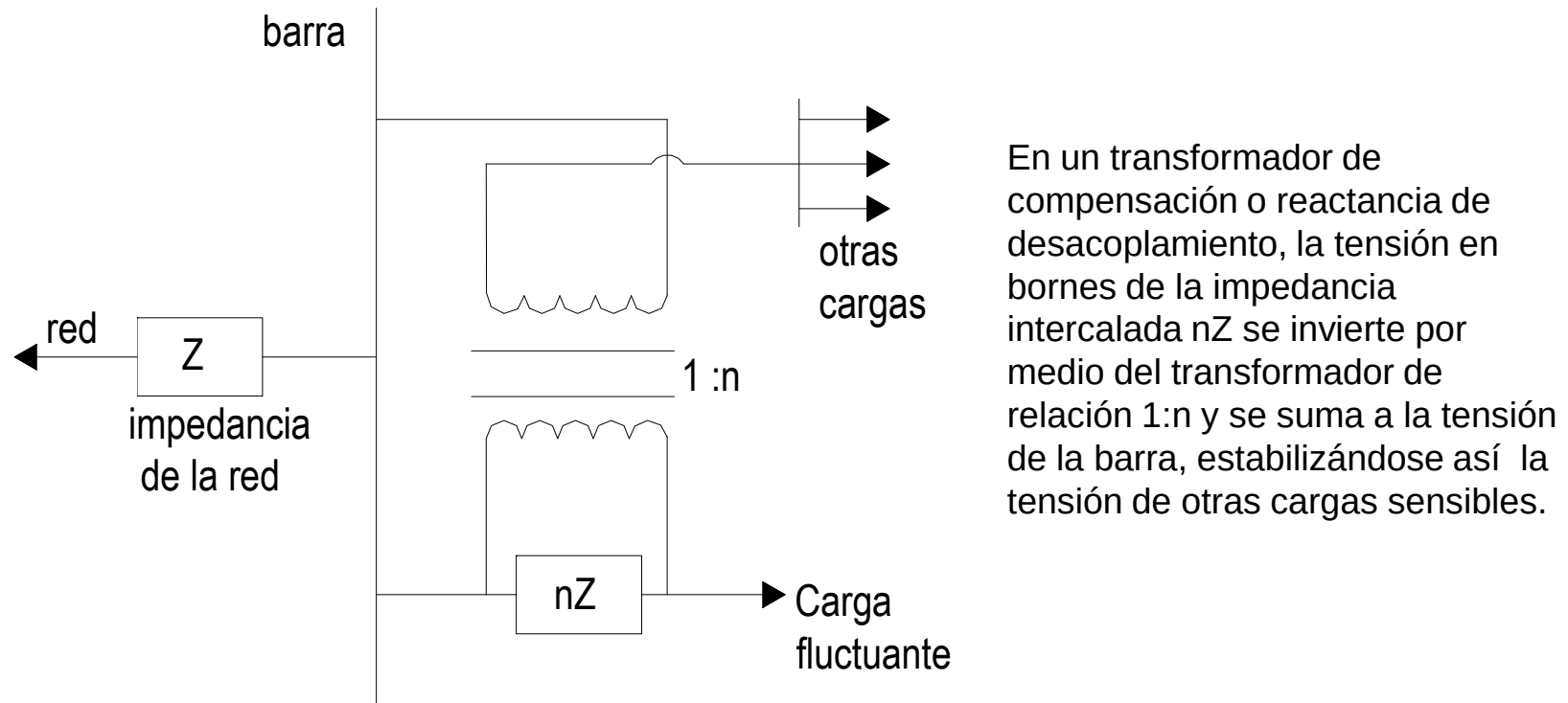
## Condensadores controlados en serie (Minicap)



El Minicap, aplica la tecnología de condensadores en serie especialmente adaptados a líneas de distribución y utiliza un control de tensión instantáneo y continuo, pudiendo constituir una solución económicamente atractiva que ayude a minimizar condiciones de caída de tensión provocadas por la conexión de grandes cargas, mitigar condiciones de sobretensión debidas a la repentina desconexión de cargas y reducir el consumo de potencia reactiva. Este sistema está diseñado para suministros de potencia con tensiones de hasta 36kV.

# Métodos de prevención y corrección

## Transformador de compensación

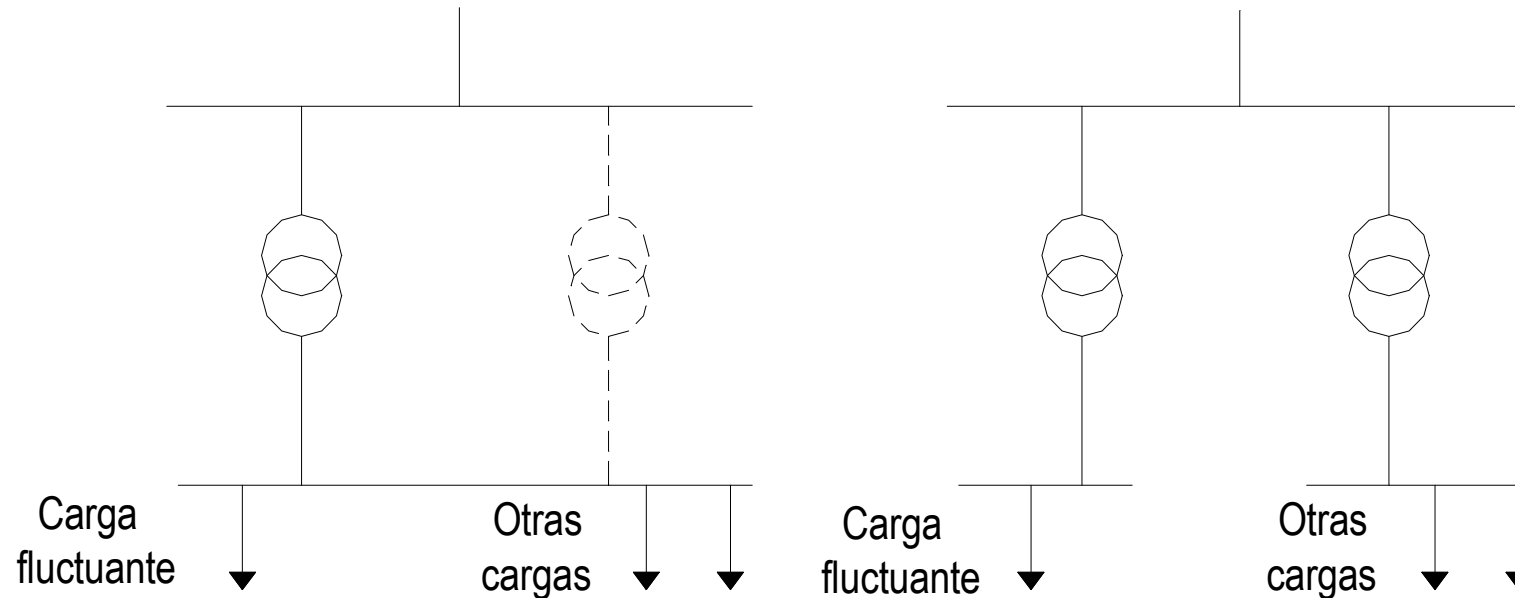


Este corrector es instantáneo y no introduce armónicos, pero la reactancia de la red debe mantenerse muy constante. Este procedimiento es muy eficaz, puesto que puede reducir las fluctuaciones en un factor de 10. En la práctica, se trata de un autotransformador especial.

El inconveniente es que no hay atenuación del flícker aguas arriba del dispositivo.

# Métodos de prevención y corrección

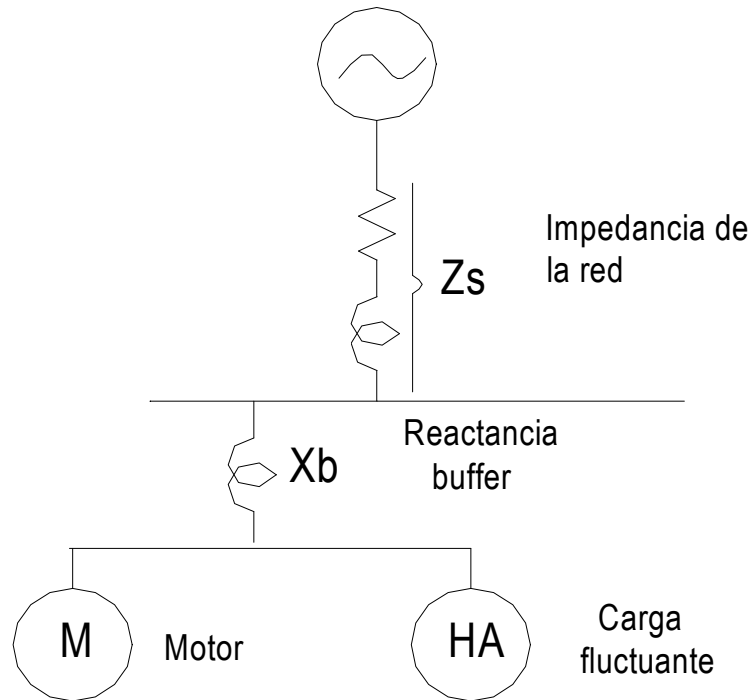
## Transformador de compensación paralelo



Pueden disminuirse las fluctuaciones reduciendo la impedancia de la red. Esto se realiza conectando un segundo transformador entre el punto de unión de la carga fluctuante y la red, o también separando la carga fluctuante causante del flícker de las demás cargas afectadas.

# Métodos de prevención y corrección

## Compensador síncrono

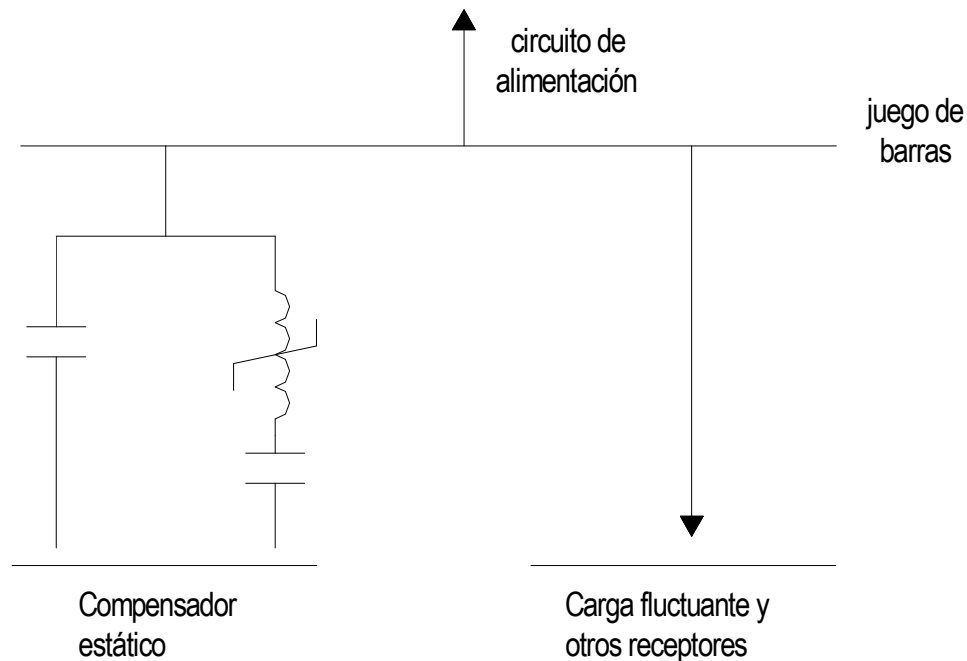


Consiste en un motor síncrono sin carga y sobreexcitado que opera en paralelo con la carga fluctuante. Una reactancia buffer (de choque) se intercala entre la carga y la red, aumentando las variaciones de tensión en los terminales del compensador síncrono para una determinada variación de potencia reactiva. Al caer la tensión en los terminales, se genera corriente reactiva que restaura la tensión.

El procedimiento es caro y además el tiempo de respuesta, en comparación con otros métodos, es más lento. Esta solución lleva a una reducción de fluctuaciones del 2 al 10% y hasta un 30% con los sistemas modernos de control electrónico. El compensador se complementa a veces con reactancias (lineales) de amortiguación instaladas sobre la alimentación.

# Métodos de prevención y corrección

## Compensador estático



Una reactancia saturable en derivación puede reducir las fluctuaciones de tensión del orden 3:1. En el caso, por ejemplo, de una disminución de tensión débil, el compensador se transforma en una fuente importante de potencia reactiva y contrarresta así el fenómeno, con una respuesta casi instantánea.

Este método se compone de condensadores y reactancias de hierro saturable. El principio consiste en que al aumentar la corriente de la carga fluctuante, la corriente absorbida por el compensador estático disminuye, y viceversa.

# Métodos de prevención y corrección

## Estabilizadores magnéticos

En este método la compensación de los incrementos de potencia reactiva se efectúa mediante la conexión, en paralelo con la carga, de un transformador de elevada reactancia de dispersión. El secundario del transformador se cortocircuita durante determinados períodos de tiempo mediante el control de tiristores conectados a él.

## Arrancadores de motores

Su función es limitar las potencias demandadas, muy superiores a las nominales, durante el proceso de arranque.

Por sus características de funcionamiento, los motores asíncronos absorben durante el arranque una intensidad de corriente que puede ser hasta 6 veces la nominal.



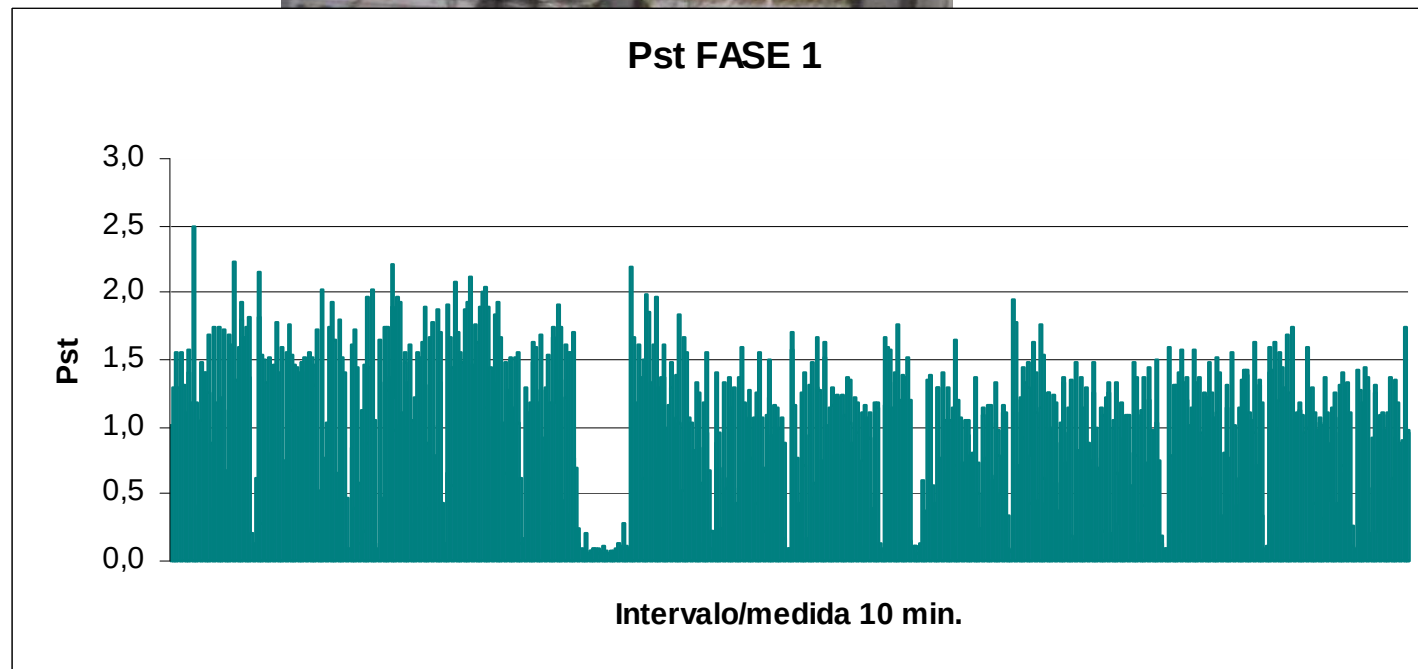
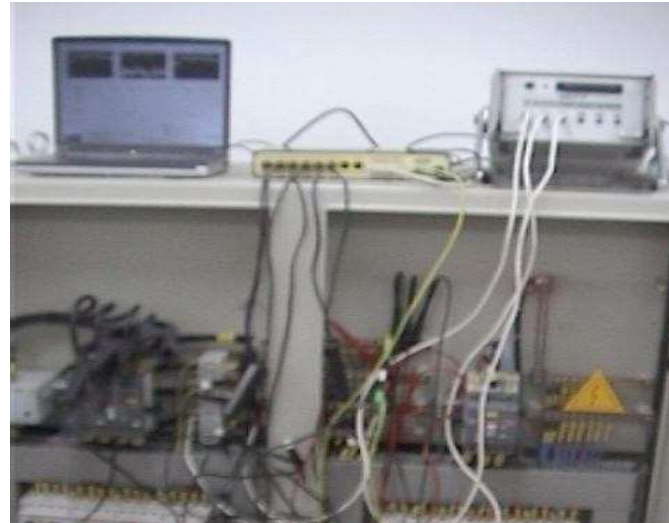
# Experiencia práctica en Sotavento



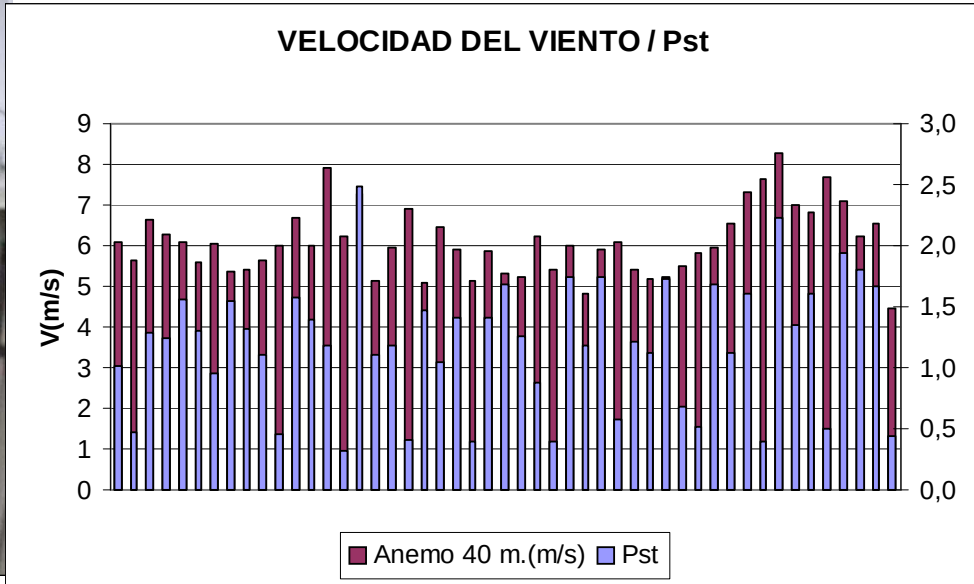
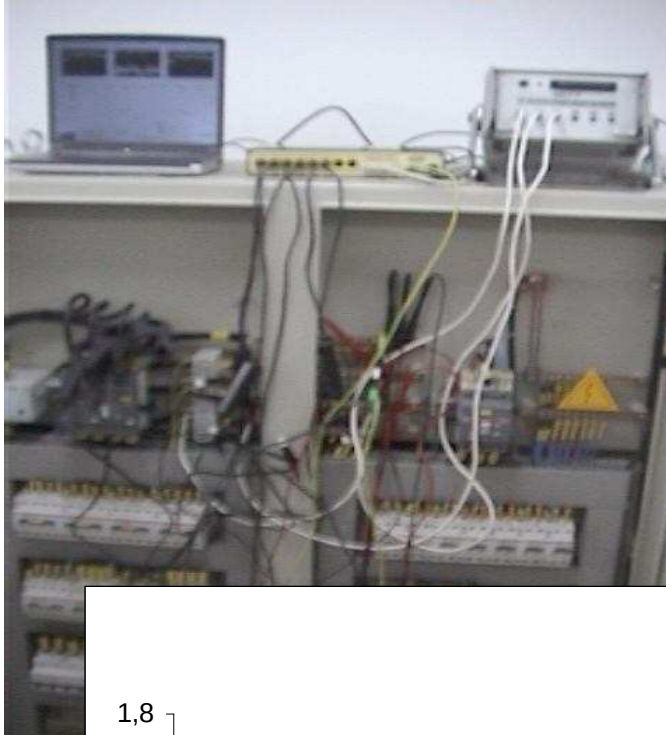
| Fabricante (Ø rotor, H buje) | Unidades | Potencia (kW) |
|------------------------------|----------|---------------|
| MADE (46, 46)                | 4        | 660           |
| GAMESA EÓLICA (47, 45)       | 4        | 660           |
| IZAR-BONUS (44, 40)          | 4        | 600           |
| ECOTECNIA (44, 45)           | 4        | 640           |
| NEG MICON (48, 45)           | 4        | 750           |
| IZAR-BONUS (62, 49)**        | 1        | 1.300         |
| MADE (52, 50)**              | 1        | 800           |
| MADE (60, 61)**              | 1        | 1.320         |
| NEG MICON (52, 45)**         | 1        | 900           |



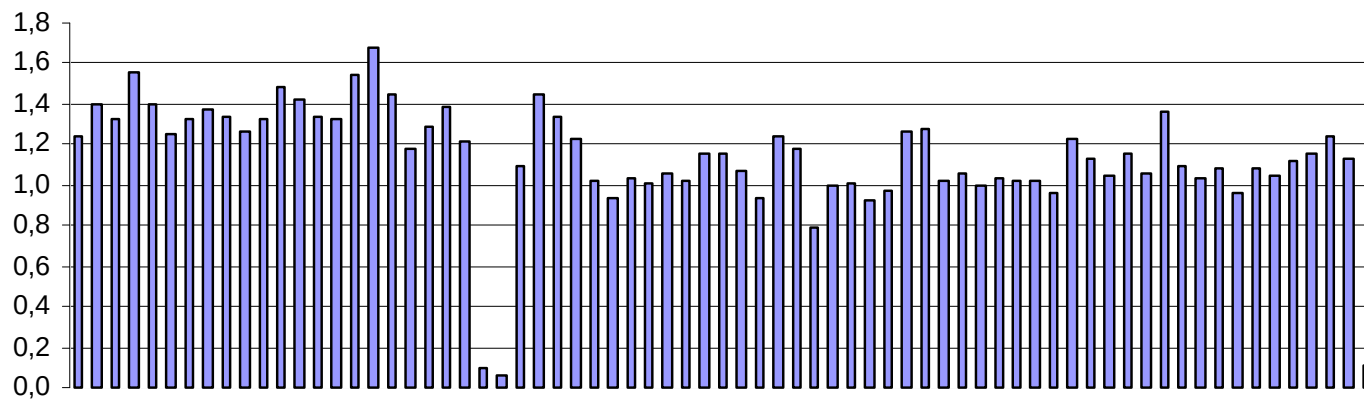
# Experiencia práctica en Sotavento



# Experiencia práctica en Sotavento



**Plt Fase1**

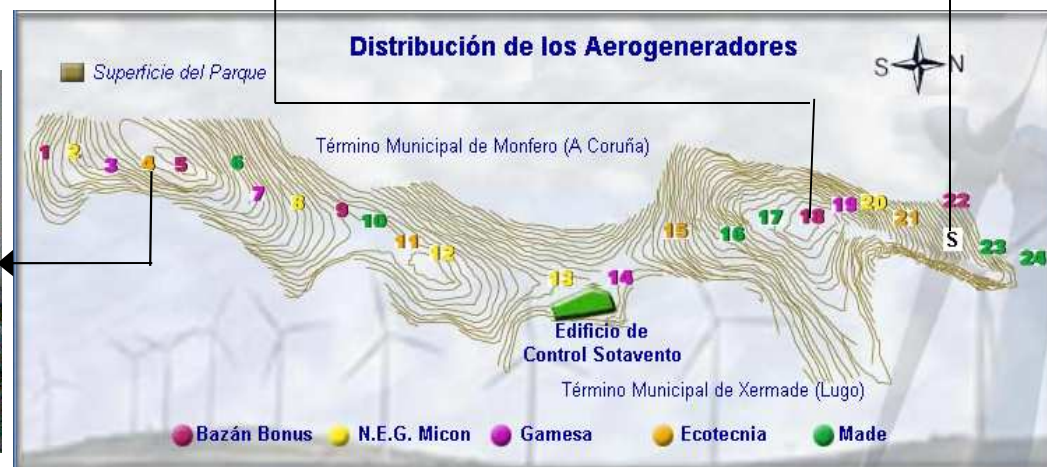
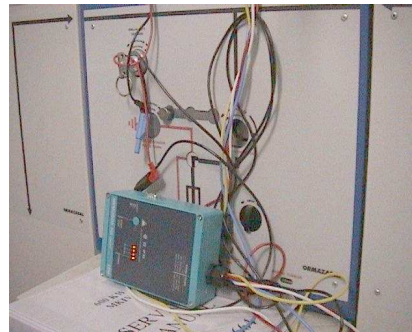


**Intervalo de medida 2 h**

# Experiencia práctica en Sotavento

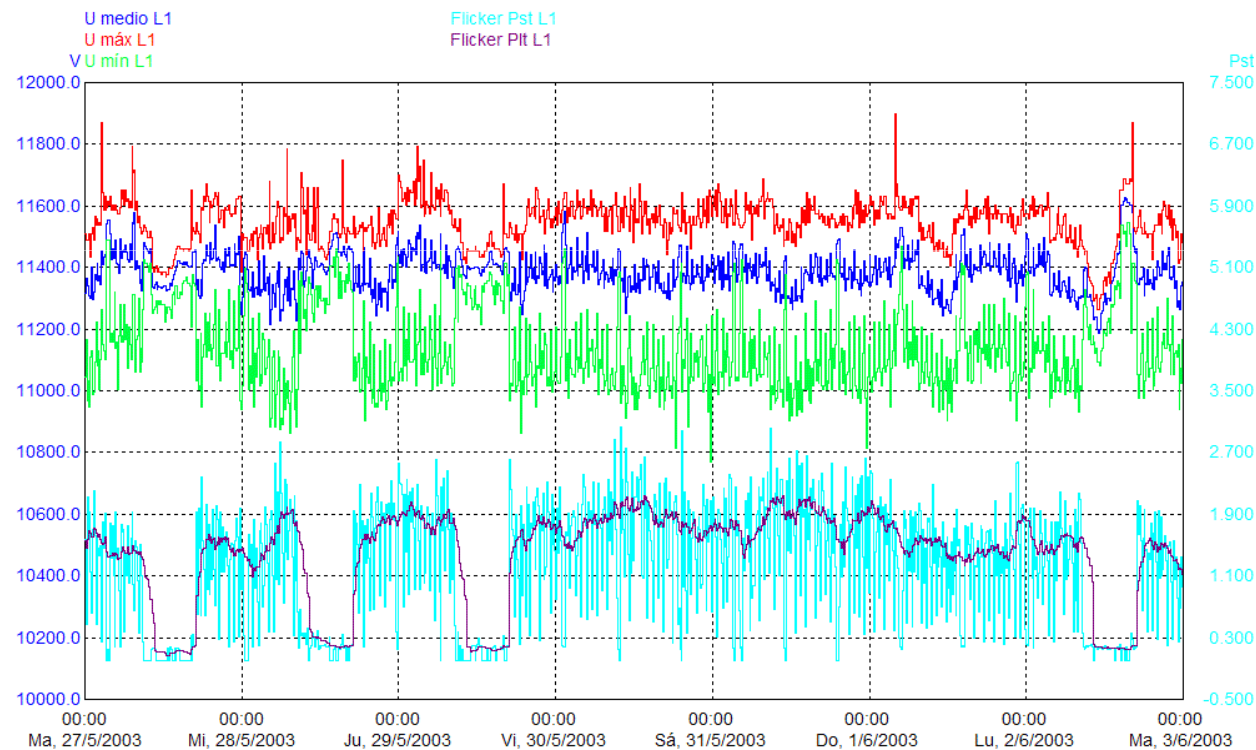
## 2ª campaña

- Dos tipos de equipamiento:
- 1 Memobox 300 Smart, autónomo
  - 2 Unilyzer 812 + 2 computadores



# Experiencia práctica en Sotavento

## 2ª campaña

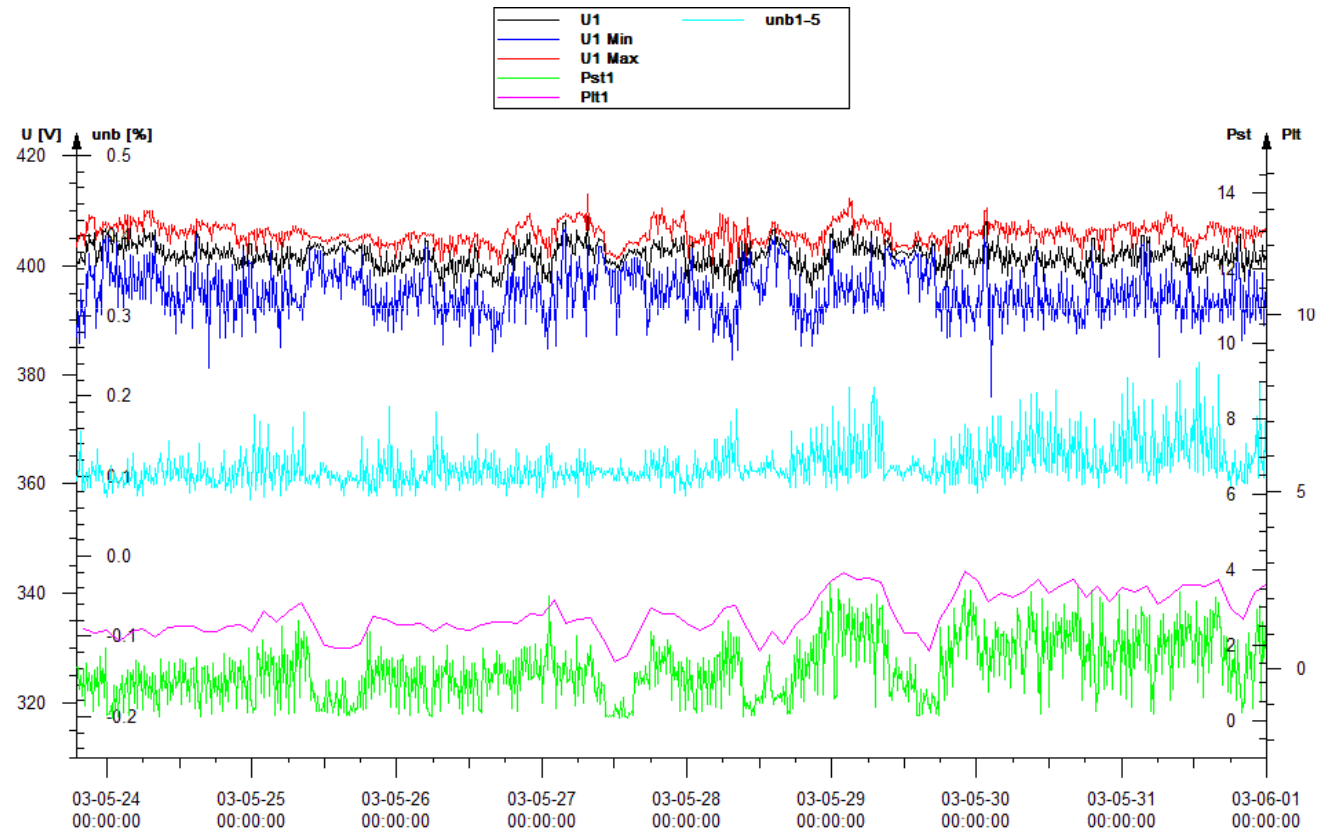


*Representación gráfica de los valores de la tensión y flicker, índices Pst y Plt, en la fase 1 del Aerogerador 18, a lo largo de una semana (1ª)*



# Experiencia práctica en Sotavento

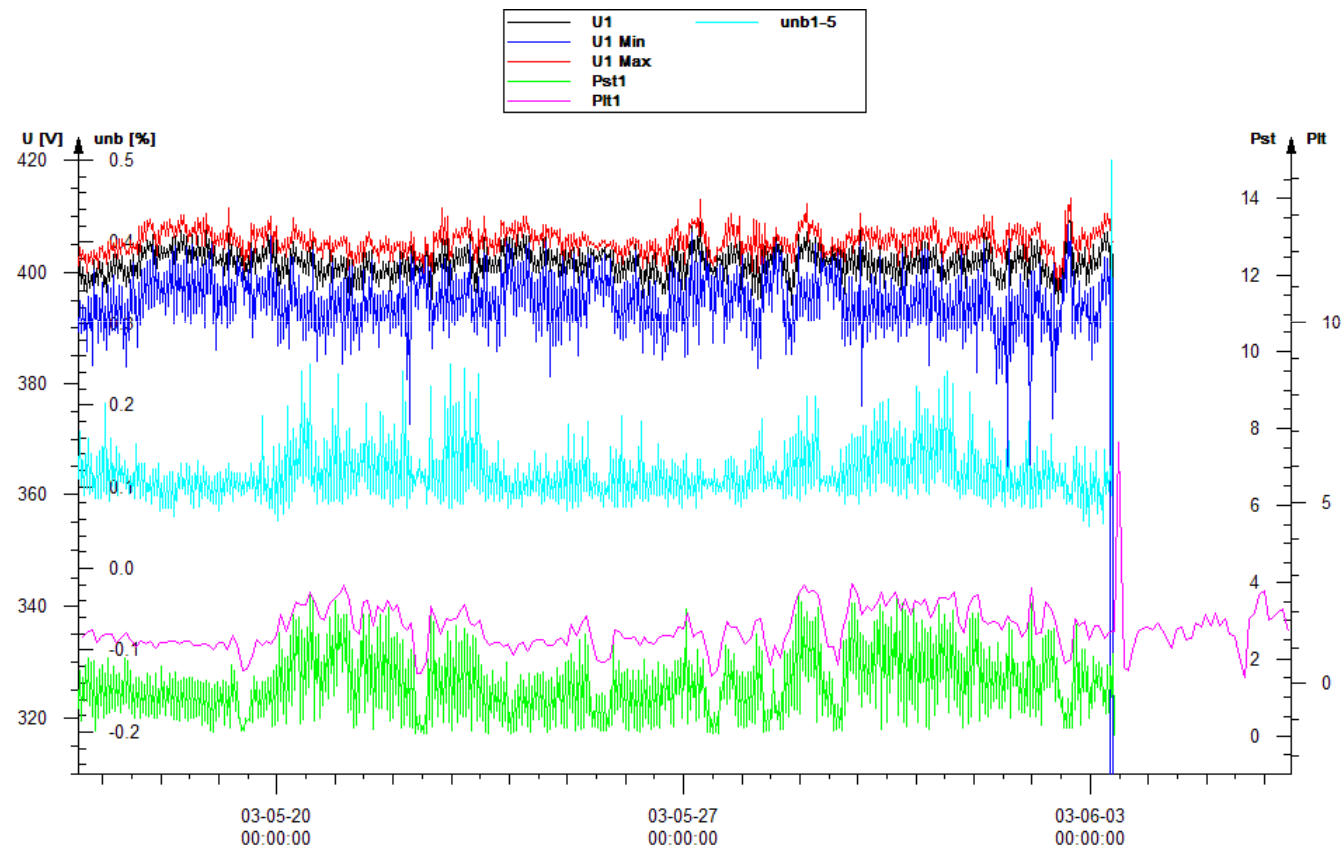
## 2ª campaña



*Representación gráfica de los valores de la tensión y flicker, índices  $Pst$  y  $Plt$ (desplazado), en la fase 1 del Aerogenerador 4 y desequilibrio de tensión – semana 2*

# Experiencia práctica en Sotavento

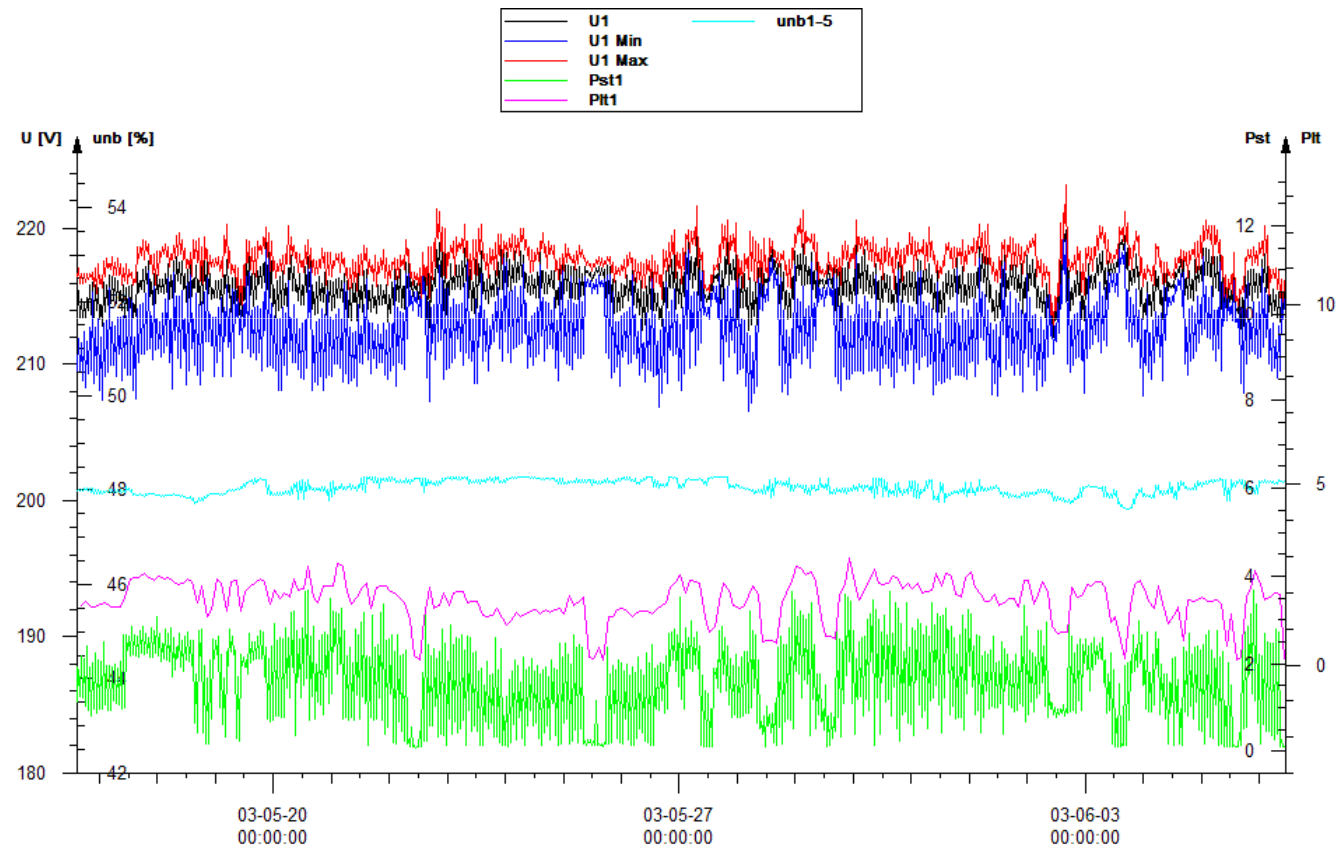
## 2ª campaña



*Representación gráfica de los valores de tensión y flicker, índices  $Pst$  y  $Plt$ , en la fase 1 del Aerogerador 4 y desequilibrio de tensión – período total*

# Experiencia práctica en Sotavento

## 2ª campaña



*Representación gráfica de los valores de tensión y flicker en la fase 1 de la subestación y desequilibrio de tensión – período total*