

EFFECTOS DE LA MODULACIÓN TEMPORAL DE LA LUZ SOBRE EL SISTEMA VISUAL

Mirta Jaén

Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión "Ing. H. Bühler".
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Universidad Nacional de Tucumán.
Av. Independencia 1800. 4000 - San Miguel de Tucumán
mjaen@herrera.unt.edu.ar

Se realiza un experimento psicofísico para evaluar el efecto de la modulación temporal de la luz sobre el rendimiento visual de observadores. Ocho sujetos participantes realizan tareas visuales bajo dos tipos de iluminación fluorescente: de alta frecuencia (30kHz) y de baja frecuencia (100Hz) de modulación. Los resultados muestran que la exactitud de la tarea en un test de Anillos de Landolt y la velocidad de realización en un test de búsqueda visual (con exactitud máxima para todos los observadores) son significativamente mayores en alta frecuencia ($F(1,96)=7,67$; $p<0,0067$) y $F(1,96)=9,74$; $p<0,0024$ respectivamente). Estos resultados, que corroboran observaciones previas en el mismo sentido, pueden ser interpretados en términos de un modelo de procesamiento visual que considera que las modulaciones temporales de la luz a una frecuencia justo por encima del límite de fusión, son transmitidas por los nervios ópticos a los centros cerebrales más altos y pueden originar un estado de mayor excitación nerviosa que daría cuenta de una menor exactitud en la tarea visual, situación que no se constata con iluminación modulada a muy alta frecuencia.

It was carried out an psychophysical experiment to evaluate the effect of temporal light modulation on the visual performance of human subjects. Eight participant observers carry out visual tasks under two types of fluorescent illumination: with high frequency (30kHz) and with low frequency (100Hz) of modulation. The results show that the accuracy of the task in a test of Landolt's rings and the speed in a test of visual search (with maximal accuracy for all the observers) are significantly bigger in high frequency ($F(1,96)=7,67$; $p <0,0067$) and $F(1,96)=9,74$; $p <0,0024$ respectively). These results corroborate previous observations in the same sense. They can be interpreted in terms of a model of visual processing that considers that temporal modulations of light to a frequency exactly above the temporal fusion threshold are transmitted by the optic nerves to highest cerebral centres causing a state of more nervous excitement that originates a smaller accuracy in the visual task, situation that is not verified with illumination modulated to very high frequency.

1.- INTRODUCCIÓN

Diferentes investigadores vinculan los síntomas de dolores de cabeza de trabajadores en oficinas iluminadas con luz fluorescente, con la modulación de 100hz de la emisión de los tubos de descarga gaseosa conectados a la corriente alterna ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾.

Las investigaciones clásicas sostenían que, como la frecuencia de modulación de la luz emitida por estos tubos está por encima de la frecuencia crítica de fusión (CFF) para la mayoría de los observadores, este parpadeo no debía tener ningún efecto sobre el sistema visual humano (SVH). Este argumento supone que el filtrado temporal, que limita la respuesta en alta frecuencia, ocurre en una etapa muy temprana del procesamiento visual.

Sin embargo, hay evidencias fisiológicas que muestran que las etapas tempranas de procesamiento del SVH responden a frecuencias muy por encima a la CFF⁽⁴⁾⁽⁵⁾ de manera que el filtrado temporal que limita la percepción de las altas frecuencias debe ocurrir en centros visuales más avanzados. Por lo tanto, si los receptores responden a estas altas frecuencias podrán, entonces, dar por resultado señales neuronales a frecuencias iguales a las de excitación que luego podrían ser procesadas por etapas posteriores en el sistema visual.

Cuando se incluyen los balastos electrónicos en los sistemas de iluminación fluorescente, se eleva la frecuencia de modulación de la luz de 100 hz a 30 ó 50khz. Hay algunas evidencias de que con este tipo de balastos disminuyen los síntomas de dolores de cabeza

incluso disminuye la excitación nerviosa en personas más sensibles al efecto ⁽⁶⁾⁽⁷⁾.

En un trabajo previo ⁽⁸⁾, se encontraron diferencias significativas de los valores de contraste umbral necesarios para discriminar correctamente la orientación de Anillos de Landolt, para las dos condiciones de iluminación: lámparas fluorescentes con balastos convencionales y con balastos electrónicos. En el presente trabajo se lleva a cabo un experimento psicofísico en el supra-umbral, para evaluar el efecto del parpadeo de la iluminación fluorescente sobre el rendimiento visual de observadores. Este consiste en la realización de tareas visuales bajo los dos tipos de iluminación fluorescente, con parpadeo: de alta frecuencia (AF ≈ 30 kHz) y de baja frecuencia (BF = 100Hz) sin que el observador tenga forma de identificar cada iluminación.

2.- MODULACIÓN TEMPORAL DE LA ILUMINACION FLUORESCENTE

En los tubos fluorescentes, la mayor parte de la luz visible que emite la lámpara proviene de la re-emisión del material luminescente (cubierta interna de fósforo sobre las paredes del tubo). Las características espectrales y la intermitencia de la luz dependen del tipo de fósforo y de la persistencia de la luminiscencia de la cubierta. Por otra parte, el deterioro de los elementos fosforados, con el paso del tiempo, afecta principalmente la parte roja del

espectro, por lo tanto las características espectrales de la luz cambian en el tiempo hacia el verde ⁽⁶⁾.

La modulación temporal de la emisión de los tubos fluorescentes presenta así, varios componentes. Una componente principal de 100 hz en todo el tubo debido a que la descarga se extingue dos veces en cada ciclo (fig.1). La modulación de esta emisión depende de los fósforos de la cubierta interna del tubo y puede variar entre 15% y 100% para los diversos tipos de recubrimiento de los tubos.

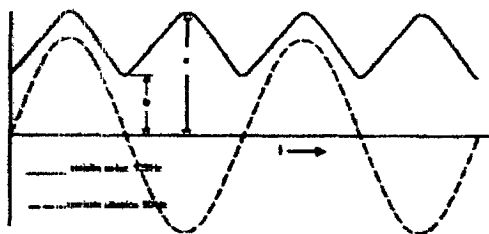


Fig. 1.- Forma esquemática de la onda emitida por una lámpara fluorescente. "a": Intensidad máxima coincidente con el máximo de la CA, "b": Intensidad mínima coincidente con corriente nula.

Una componente de modulación de 50hz (en los extremos del tubo) debido a la alternancia del rol de los electrodos entre ánodo y cátodo que se suma a otra componente armónica de 100 hz que aparece en todo el tubo, debido a posibles asimetrías en la emisión de los electrodos. Se detectan más en tubos envejecidos y se manifiestan como una desigualdad entre picos adyacentes de la emisión de 100Hz ⁽¹⁰⁾⁽³⁾.

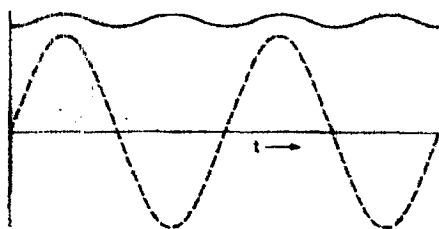


Fig. 2.- Forma esquemática de la onda emitida por una lámpara fluorescente con balasto electrónico.

Se presenta, además, una fluctuación cromática de 100Hz, debido a la diferente persistencia de los distintos fósforos después de la descarga que da origen a una dependencia de la modulación con la longitud de onda.

Cuando los mismos tubos fluorescentes son accionados por balastos electrónicos, la frecuencia de funcionamiento se eleva a aproximadamente 30 kHz. Si el balasto elimina en forma efectiva la componente de 100 Hz de la modulación, de modo que su incidencia sea mínima, la emisión se comporta en forma muy similar a la de una lámpara incandescente, con una modulación de 100Hz que oscila entre el 1% y el 4% ⁽³⁾⁽⁹⁾.

3.1.- DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Se lleva a cabo un experimento psicofísico para evaluar el efecto del parpadeo de las lámparas fluorescentes sobre el rendimiento visual de observadores.

El experimento consiste en la realización de dos tareas visuales (Tarea A: Anillos de Landolt y Tarea B: Puntos aleatorios) bajo dos tipos de iluminación fluorescente: con modulación de alta frecuencia (AF $\approx 30\text{kHz}$), utilizando balastos electrónicos (BE) y con modulación de baja frecuencia (BF = 100Hz), utilizando balastos electromagnéticos convencionales (BC) sin que el observador tenga forma de identificar cada iluminación.

Para ello se construyen dos cajas idénticas (126cm x 33cm x 15cm) en cuyo interior se colocan dos tubos fluorescentes (Osram L36W/12 -950) (fig. 3). Los tubos de una de las cajas se accionan con BC y los de la otra caja con un BE.

En la parte superior de las cajas se abre una ventana de aproximadamente 60 cm x 30 cm que se recubre con un acrílico difusor que homogeneiza la iluminación en la ventana. De esa manera, los extremos de los tubos quedan cubiertos, lo cual evita, además, que se perciban modulaciones extras de 50 Hz.

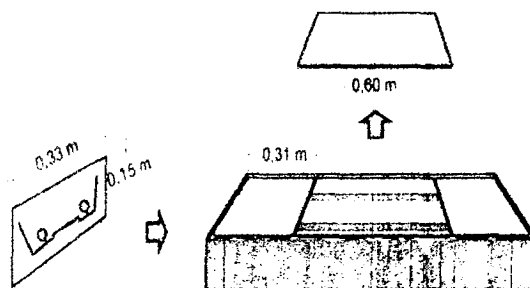


Fig. 3. - "Cajas de luz" con iluminación desde el interior. Dos tubos fluorescentes accionados con BC (en la caja I) y con BE (en la caja II).

Estas "cajas de luz" se disponen sobre los bordes opuestos de una mesa de laboratorio. Sobre las ventanas de acrílico se colocan las pruebas a realizar por el observador. Para evitar alguna asociación eventual, se aleatoriza la posición de las cajas en las sucesivas sesiones.

3.2.- METODOLOGÍA.

Participan del experimento estudiantes de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (UNT) con edades entre 20 y 22 años, con visión normal o corregida que desconocen totalmente el objetivo del experimento. Ninguno de los participantes presentaba síntomas de sensibilidad a la iluminación fluorescente según una encuesta que se realiza al finalizar todas las pruebas.

Tarea A: Sobre una hoja de papel A4 se imprime un conjunto de anillos de Landolt (30 filas de 10 anillos cada una) con dos orientaciones posibles (abertura a la derecha o a la izquierda) ordenados al azar. (fig. 4). Esta muestra se coloca sobre la ventana superior traslúcida de cada una de las "cajas de luz". La tarea del observador

consiste en detectar y contar los anillos que tienen la abertura hacia la derecha (similares a una letra "C") en cada fila. La tarea se realiza alternativamente sobre las cajas I (BC) y II (BE).

Cada observador realiza cinco sesiones de aproximadamente 60 minutos cada una, debidamente contra - balanceadas y aleatorizando el orden de presentación de las pruebas. El experimento se repitió con 8 observadores para 3 contrastes distintos de los caracteres respecto al fondo: $C_1=0,12$; $C_2=0,24$ y $C_3=0,36$ y dos tamaños de caracteres: $T_1=1,1\text{mm}$; $T_2=2,2\text{mm}$.

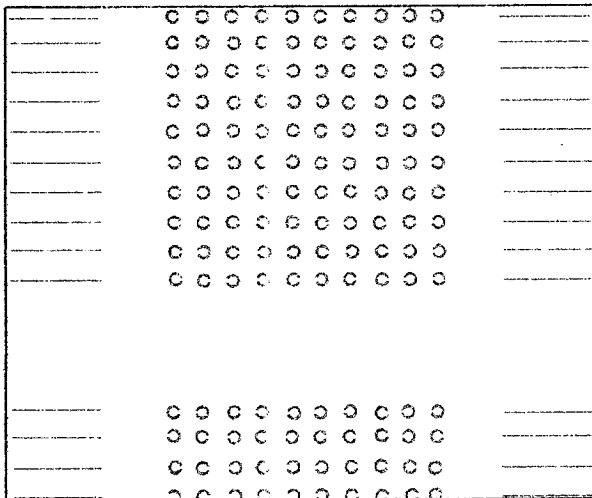


Fig. 4.- Trozo de una tarea visual A) : 30 filas de 10 anillos de Landolt cada una, en dos orientaciones (izquierda y derecha) ordenados al azar (reducción fuera de escala).

El experimentador mide el tiempo en que el observador realiza la tarea, lo que permite determinar la **velocidad** definida como :

$$V = \frac{\text{nro. total de respuestas}}{\text{tiempo empleado}}$$

siendo el número total de respuestas = 300

Se determina también la **exactitud** de la tarea en base al número de respuestas correctas obtenidas en cada prueba, de la siguiente forma:

$$E = \frac{(\text{nro total de respuestas} - \text{nro. de errores})}{\text{nro. total de respuestas}}$$

Tarea B: Sobre un rectángulo de 20 x 15 cm se dibujan los treinta primeros números distribuidos al azar (fig. 5). La tarea del observador consiste en unir los puntos secuencialmente desde el 0 al 30. Cada observador realiza la prueba a continuación de la prueba (A) de Anillos de Landolt y dentro de la sesión de 60 min. El experimento se repitió con 6 contrastes distintos de los caracteres respecto al fondo: $C_1=0,12$; $C_2 = 0,24$; $C_3=0,36$; $C_4=0,48$; $C_5= 0,60$; $C_6=0,72$ y un solo tamaño $T_1= 1,2\text{ mm}$. Se realizó una replicación de cada condición a lo largo de cinco sesiones.

Para esta prueba, se define la velocidad de realización de la tarea como:

$$V = \frac{\text{número de enlaces}}{\text{tiempo total}}$$

siendo el número de enlaces = 30 .

La exactitud, definida de la misma manera que para la Tarea A, resulta: $E = (30 - \text{nro. de errores}) / 30$

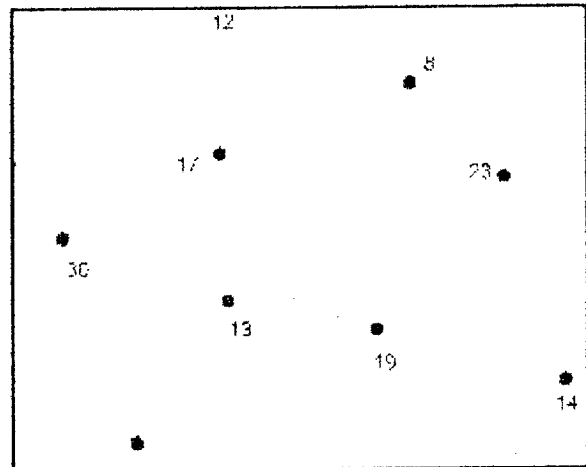


Fig. 5.- Trozo de una tarea visual B): los 30 primeros números ordenados al azar (reducción fuera de escala).

3.- RESULTADOS

Experimento A: Anillos de Landolt.-

El análisis estadístico se hace en base a la hipótesis de un modelo lineal de factores múltiples (frecuencia, contraste, tamaño y observador) con dos réplicas de todo el experimento.

El resultado de este análisis da valores significativamente diferentes para la velocidad en las dos condiciones de iluminación: con $F(1,96)= 7,67$ y $p<0,0067$, los cuales muestran una mayor rapidez de realización de la tarea a más baja frecuencia.

Sin embargo, el valor obtenido para la exactitud en condiciones de modulación de la luz en alta frecuencia es significativamente mayor (con $F(1,96)= 8,82$ y $p<0,0038$) que el resultado en condiciones de baja frecuencia.

En la fig. 6 se representan gráficamente los valores de la exactitud en función de las variables significativas:

- Exactitud en función del tamaño del carácter para las dos frecuencias de la iluminación (BF y AF) (fig. 6.a);
- Exactitud en función del contraste del carácter para las dos frecuencias de la iluminación (BF y AF) (fig. 6.b);
- Exactitud en función de la frecuencia de la iluminación (BF y AF) para los ocho observadores participantes (fig. 6.c).

Experimento B: Puntos Aleatorios.-

El análisis estadístico se hace, también en este caso, en base a la hipótesis de un modelo lineal de factores múltiples (frecuencia, contraste y observador) con dos réplicas de todo el experimento. Los valores obtenidos para la exactitud son: $e = 1$ en todos los casos, en AF y BF. El resultado del análisis estadístico da valores significativamente diferentes para la velocidad en las dos condiciones de iluminación: con $F(1,96)= 9,74$ y $p<0,0024$) los cuales muestran una mayor rapidez de

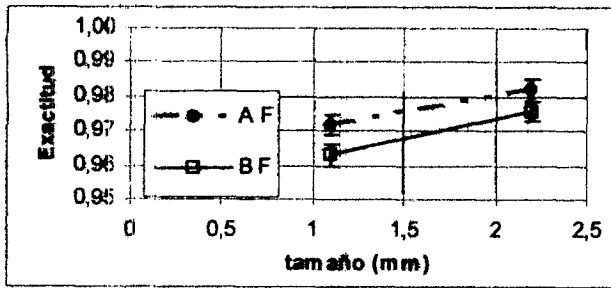


Fig. 6.a.- Exactitud de la tarea en función del tamaño del carácter para las dos frecuencias de la iluminación (Test de Anillos de Landolt). AF: alta frecuencia, BF: baja frecuencia

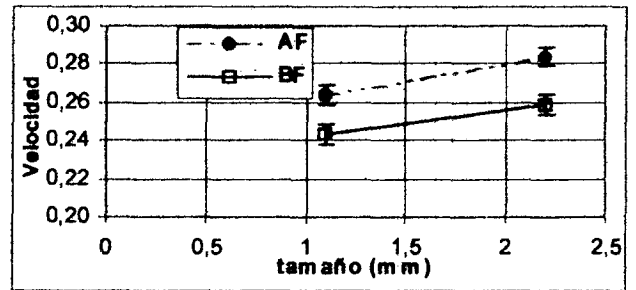


Fig. 7.a.- Velocidad de la tarea en función del tamaño del carácter para las dos frecuencias de la iluminación (Test de Puntos Aleatorios). AF: alta frecuencia, BF: baja frecuencia

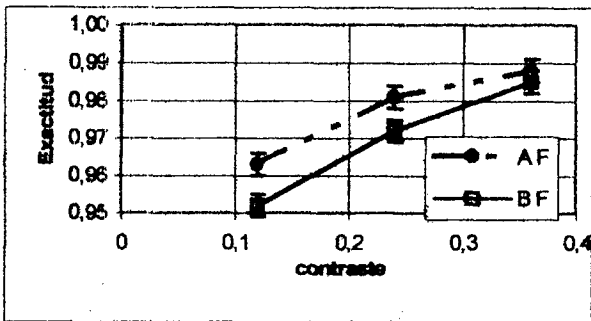


Fig. 6.b.- Exactitud de la tarea en función del contraste del carácter respecto al fondo para las dos frecuencias de la iluminación (Test de Anillos de Landolt). AF: alta frecuencia, BF: baja frecuencia

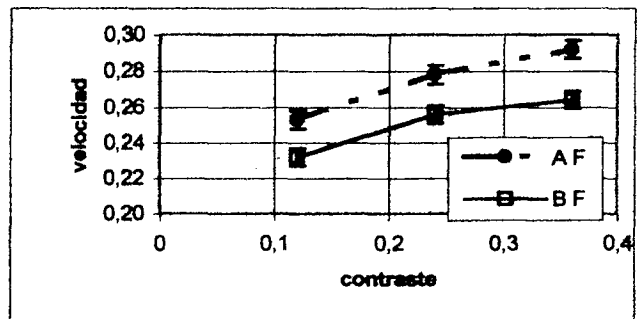


Fig. 7b.- Velocidad de la tarea en función del contraste del carácter para las dos frecuencias de la iluminación (Test de Puntos Aleatorios). AF: alta frecuencia, BF: baja frecuencia

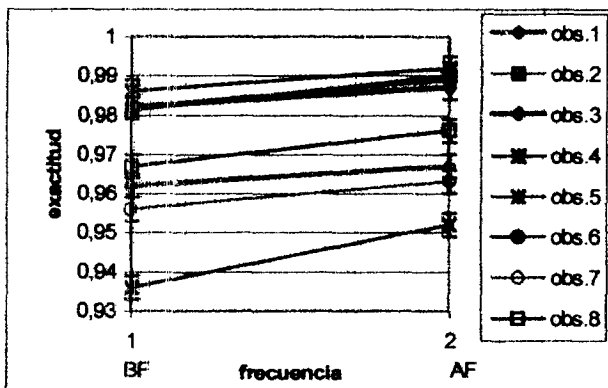


Fig. 6.c.- Exactitud de la tarea en función de la frecuencia de la iluminación (Test de Anillos de Landolt). AF: alta frecuencia, BF: baja frecuencia para los ocho observadores participantes.

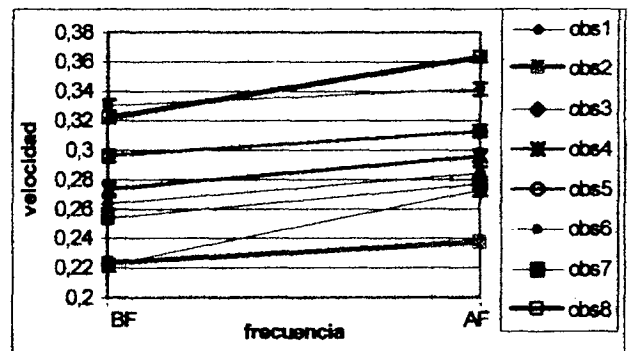


Fig. 7.c.- Exactitud de la tarea en función de la frecuencia de la iluminación (Test de Puntos aleatorios). AF: alta frecuencia, BF: baja frecuencia para los ocho observadores participantes.

realización de la tarea a más alta frecuencia con exactitud máxima. En la fig. 7 se representan gráficamente los valores de la velocidad en función de las variables significativas:

- a) Velocidad en función del tamaño del carácter para las dos frecuencias de la iluminación (BF y AF) (fig. 7.a);
- b) Velocidad en función del contraste del carácter para las dos frecuencias de la iluminación (BF y AF) (fig. 7.b);
- c) Velocidad en función del tamaño del carácter para las dos frecuencias de la iluminación (BF y AF) (fig. 7.a);
- d) Velocidad en función del tamaño del carácter para las dos frecuencias de la iluminación (BF y AF) (fig. 7.a);

- e) Velocidad en función del tamaño del carácter para las dos frecuencias de la iluminación (BF y AF) (fig. 7.a);
- f) Velocidad en función del contraste del carácter para las dos frecuencias de la iluminación (BF y AF) (fig. 7.b);
- g) Velocidad en función de la frecuencia de modulación de la luz (AF y BF) para los ocho observadores participantes (fig. 7.c).

5.- DISCUSION .-

Los resultados del test de Anillos de Landolt muestran que la exactitud de la tarea es significativamente mayor cuando la modulación de la luz tiene alta frecuencia (30 kHz, con BE). Sin embargo, los observadores realizan las pruebas a mayor velocidad

cuando la iluminación está modulada a más baja frecuencia (100 Hz, con BC), con una diferencia significativa entre las dos condiciones de iluminación.

Por otra parte, en el test de búsqueda visual, con una exactitud máxima (igual a la unidad para todos los observadores), la velocidad de realización de la tarea es significativamente mayor en alta frecuencia.

El diseño del experimento se realizó siguiendo en la línea de los realizados por Veitch⁽¹¹⁾ y por Küller⁽⁷⁾, quienes también trabajaron comparando el rendimiento visual de observadores en tareas de laboratorio bajo condiciones de iluminación fluorescente con balasto electrónico y con balasto convencional.

Los resultados de Veitch⁽¹¹⁾ para un test de Anillos de Landolt (Valid test) muestran una diferencia significativa en el número de respuestas correctas, favorable a la iluminación modulada en alta frecuencia, sólo para un contraste de la tarea de $C=0,20$. Para contrastes mayores y menores, las diferencias, a pesar de dar mayor número de respuestas correctas para iluminación en AF, no presentan diferencias estadísticamente significativas. Küller⁽⁷⁾, por otra parte, mide el tiempo de realización de tareas de comparación de listas numéricas, el número de errores y los niveles de excitación en las dos situaciones de experimentación. Muestra que en condiciones de iluminación con BF, los observadores demoran menos en la realización de la prueba pero con iluminación de alta frecuencia, el número de errores desciende a la mitad.

Los resultados del presente trabajo muestran una diferencia significativa entre las dos condiciones de iluminación para los tres contrastes utilizados pero las diferencias, tanto en velocidad como en exactitud, no son de la magnitud de las determinadas por Küller en su trabajo⁽⁷⁾.

En el experimento de los Puntos Aleatorios, todos los observadores completan satisfactoriamente la tarea ($e=1$) y se encuentra que la velocidad de realización es mayor en AF, revelando que la tarea es más fácil en esta condición y por lo tanto se completa antes.

6.- CONCLUSIONES.-

En el presente trabajo se lleva a cabo un experimento psicofísico en el supra-umbral, para evaluar el efecto del parpadeo de la iluminación fluorescente sobre el rendimiento visual de observadores. Los resultados del test de Anillos de Landolt muestran que la exactitud de la tarea es significativamente mayor cuando la modulación de la luz tiene alta frecuencia (30kHz). Sin embargo, cuando la iluminación está modulada a más baja frecuencia (100 Hz), los observadores realizan las pruebas a mayor velocidad, con una diferencia significativa entre las dos condiciones de iluminación.

Por otra parte, en el test de búsqueda visual, con una exactitud máxima para todos los observadores, la velocidad de realización de la tarea es significativamente mayor en alta frecuencia.

Estos resultados pueden ser interpretados en términos de que modulaciones de la luz a una frecuencia justo por encima de la frecuencia de fusión (parpadeo

subliminal, de 100 Hz) son detectadas por el sistema visual y se transmiten como alteraciones al sistema nervioso central provocando un mayor estado de excitación nervioso y como consecuencia una menor exactitud en la tarea visual, situación que no se constata con iluminación modulada a muy alta frecuencia, en donde el observador, más relajado, consigue hacer más rápido y más exacta su tarea.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Wilkins A. and Clark C., Modulation Of Light From Fluorescent Lamps, *Lighting Res. And Technol.*, Vol. 22(2), 103 - 109. (1990).
- (2) Lindner H. and Kropf S., Asthenopic Complaints Associated With Fluorescent Lamp Illumination (FLI): The Role Of Individual Disposition, *Lighting Res. And Technol.*, 25(2), 59 - 69. (1993).
- (3) Jaén, M., Variación temporal de la iluminación. Sensibilidad del sistema visual humano. Fascículos sobre Luz y Visión nro. 6. Dep. de Luminotecnia, Luz y Visión, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología - UNT- (1999).
- (4) Eysel U. T. and Burandt U. Fluorescent Light Evokes Flicker Responses in Visual Neurons. *Vision Res.* 8, 1235 - 1244. (1984)
- (5) Berman S., Greenhouse D., Bailey I., Clear R. and Raasch T., Human Electroretinogram Responses To Video Displays, Fluorescent Lighting And Other High Frequency Sources, *Optometry And Vision Science*, 68 (8), 645 - 662, (1991).
- (6) Wilkins A., Fluorescent Lighting, Headaches And Eyestrain, *Lighting Res. And Technol.* 21 (1), 11 - 18. (1989).
- (7) Küller R. and Laïke T., The impact of flicker from fluorescent lighting on well-being, performance and physiological arousal, *Ergonomics*, vol. 41, no. 4, 433 - 477, (1998).
- (8) Jaén, M., Visual sensibility to the modulation of light from fluorescent lighting. *Proceedings CIE 24th Session*. Warsaw, Poland, (1999)
- (9) Andersson N., Sandström M., Berglund A. and Hansson K., Amplitud Modulation Of Light From Various Sources, *Lighting Res. And Technol.*, 26 (3), 157 - 160. (1994)
- (10) Brundrett G. W., Human Sensitivity To Flicker, *Lighting Res. And Technol.*, 6 (3), 127 - 143, (1974).
- (11) Veitch J. and Mc Coll , Modulation of fluorescent light: flicker rate and light source effects on visual performance and visual comfort, , *Light. Res. and Tech.*, 27(4), 243 - 256, (1995).