

CONSTRUCCIÓN DE OSCILADORES CONTROLADOS POR LUZ Y MEDIDA DE SU COMPORTAMIENTO SÍNCRONO

J.L. Guisset^{a*}; G.M. Ramírez Ávila^{a,b†}; J.L. Deneubourg^{a‡}

^a *Université Libre de Bruxelles, Belgium*

^b *Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia*

Resumen

Se explica en detalle la construcción de los osciladores opto-electrónicos y el mecanismo de la sincronización entre los mismos; para la comprensión de éste fenómeno nos valemos del estudio de la influencia que ejerce un generador de frecuencias sobre uno de los osciladores. Finalmente, se muestran las mediciones realizadas cuando dos y tres osciladores están en interacción.

1 Introducción

La sincronización espontánea de un conjunto de luciernagas electrónicas constituye un espectáculo sumamente demostrativo [1] y que ofrece un gran interés en su presentación cualitativa. Nosotros lo reprodujimos y además hicimos los arreglos de manera que fue posible realizar observaciones cuantitativas, lo que nos permitió caracterizar los parámetros experimentales que rigen su funcionamiento.

Existen numerosos ejemplos de conjuntos de osciladores acoplados capaces de inducir una interacción estructurada de los osciladores que los constituyen [3]. Generalmente, estos sistemas están constituidos de un gran número de elementos oscilantes que interactúan de forma compleja, en los cuales, se introducen hipótesis simplificadoras que a veces no concuerdan plenamente con la realidad experimental.

*e-mail: jlguisse@ulb.ac.be

†e-mail: gramirez@ulb.ac.be

‡e-mail: jldeneub@ulb.ac.be

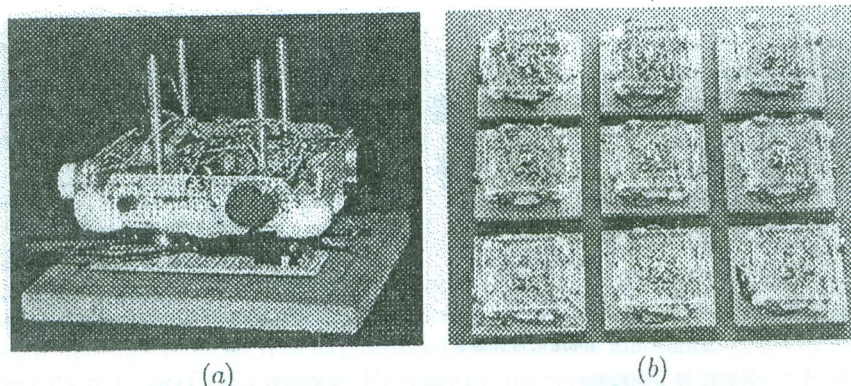


Figura 1: (a) Imagen de un LCO. (b) Grupo de nueve LCOs.

En contraposición, el conjunto que presentamos aquí está constituido de pocos osciladores electrónicos de construcción relativamente fácil donde los acoplamientos son simples y se tiene la posibilidad de controlarlos. A pesar de la simplicidad de los componentes del sistema, el conjunto posee una complejidad suficiente para producir comportamientos análogos a los estudiados de manera general. Justamente, esta simplicidad nos permitió poner en evidencia la dinámica del sistema.

2 Presentación de un oscilador controlado por luz (LCO) ¹

Un LCO (Fig.1(a)) se compone esencialmente de un controlador de tiempo LM555 trabajando en aestado [2], en el cual las alternancias son determinadas por un circuito RC conectado a uno o varios fotodiodos [1].

En primera instancia, concebimos la construcción de nueve LCOs Fig. 1(b)) en miras a la presentación demostrativa de la sincronización. Estos osciladores en principio son idénticos. Su estructura es modular, teniendo una base cuadrada de 11 cm X 11 cm coronada de varios niveles que permiten vislumbrar futuras extensiones sin modificar la talla prevista inicialmente para la formación de los grupos de LCOs en interacción.

Nuestra primera realización está compuesta de dos niveles (Fig. 1(a)). El nivel inferior comprende una batería móvil y su dispositivo de fijación, en

¹Se utiliza la abreviación inglesa para mantener la uniformidad con futuras publicaciones.

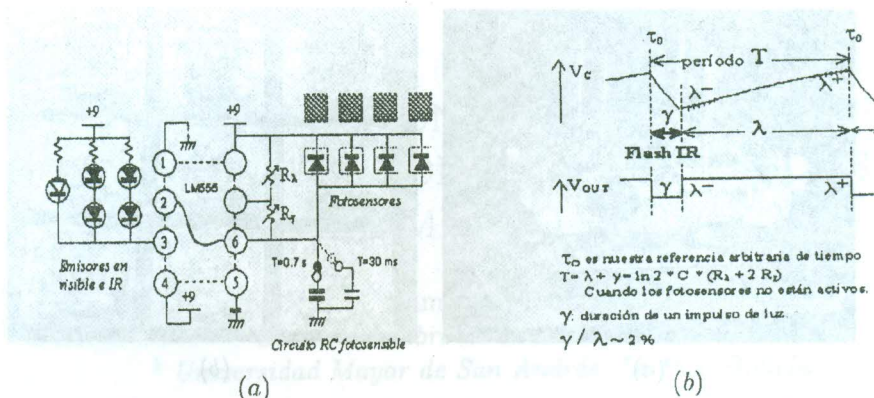


Figura 2: (a) Diagrama electrónico de un LCO. (b) Definición de los parámetros de un LCO.

tanto que el superior contiene el circuito impreso en el cual está montado el aestado, dos potenciómetros utilizados para ajustar las dos alternancias del período, además de paneles verticales -a cada lado del cuadrado-, en cada uno de los cuales se fija un LED IR (emisor de luz infrarroja) y un fotodiodo (fotosensor), éste último provisto de una pequeña tapa que permite aislarlo de perturbaciones luminosas. Para fines de presentaciones demostrativas, los LCOs tienen instalado un quinto LED que emite en el visible en sincronía con los emisores IR.

El circuito RC del aestado LM555 está compuesto de dos resistencias y de un condensador denotados por R_λ , R_γ y C (Fig. 2(a)), lo que produce un período de oscilación constituido de dos alternancias desiguales que pueden ajustarse separadamente. La fotocorriente producida por los fotosensores cuando estos son iluminados, disminuye el tiempo de carga y/o aumenta el tiempo de descarga del circuito RC. Los LEDs están conectados a la salida del LM555 y se encienden durante la alternancia corta.

En nuestro montaje, las resistencias R_λ y R_γ son parcialmente variables:

$$R_\lambda = 68 \text{ k}\Omega + [0, 50] \text{ k}\Omega$$

$$R_\gamma = 1.2 \text{ k}\Omega + [0.0, 1.0] \text{ k}\Omega$$

Por otra parte, cabe señalar que los LCOs son utilizados para dos tareas totalmete diferentes: presentaciones demostrativas en las cuales es conveniente mostrar sincronizaciones a un ritmo de un flash por segundo, o para observar la sincronización en osciloscopios, lo cual requiere un período del orden de 30 ms. Este cambio de escala se lo obtiene modificando únicamente

el valor del condensador lo cual es muy ventajoso puesto que nos permite mantener constante la tasa de iluminación por período (menos del 2%) ya que la relación R_λ/R_γ no se modifica:

$$\begin{aligned} C = 10 \mu F &\rightarrow \text{período } T = 0.7 \text{ s} \quad (\text{demostraciones}) \\ C = 0.47 \mu F &\rightarrow \text{período } T = 30 \text{ ms} \quad (\text{mediciones}) \end{aligned}$$

Dado que la iluminación de los fotosensores modifica el período del aestado, es conveniente distinguir entre el funcionamiento del LCO en la oscuridad de aquel que está expuesto a la iluminación ambiental y/o a la luz emitida por los LCOS vecinos. En nuestras observaciones, el período de un LCO libre de cualquier perturbación luminosa nos sirve de referencia puesto que éste depende solamente de su electrónica; hablaremos en este caso de "período en oscuridad".

A continuación, definimos seis parámetros relativos a la sincronización de los LCOs (Fig. 2(b)):

- λ , la duración de la alternancia larga. Nótese que en la oscuridad, $\lambda = (R_\lambda + R_\gamma)C \ln 2$, corresponde al tiempo de carga del condensador entre los límites 1/3 y 2/3 de la carga total.
- γ , la duración de la alternancia corta, $\gamma = R_\gamma C \ln 2$, corresponde al tiempo de descarga del condensador entre los límites arriba mencionados.
- λ^-, λ^+ , principio y fin de una alternancia larga.
- τ^o , instante que coincide con el paso de λ a γ , en lo que sigue, utilizaremos éste parámetro como el "instante de referencia" en el período de un LCO.
- T_s , período común a un conjunto de LCOs sincronizados.
- $T_A, \tau_A^o, \lambda_A, \gamma_A, T_B, \tau_B^o, \lambda_B, \gamma_B, \dots$, los períodos, los "instantes de referencia" y las duraciones de las alternancias de los LCO_A, LCO_B, \dots en situación de iluminación.
- $T_A^d, T_B^d, T_C^d, \dots, \gamma_A^d, \gamma_B^d, \gamma_C^d, \dots$, los períodos y duraciones de las alternancias cortas "en oscuridad" de los $LCO_A, LCO_B, LCO_C, \dots$

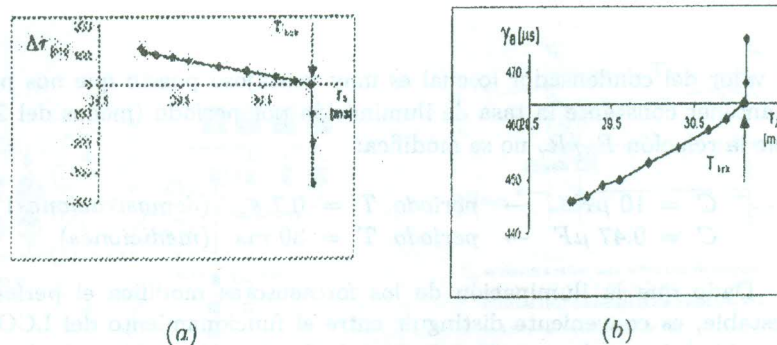


Figura 3: (a) Diferencia de fase en función del período del oscilador baja frecuencia. (b) Variación del ancho de la alternancia γ_B en función del período del oscilador "ciego".

3 Un LCO sometido a un generador de impulsos IR cortos

Con el fin de poner en evidencia el mecanismo de sincronización, dispusimos un LCO al que denominaremos LCO_B en interacción con el equivalente de un LCO en el cual todos los fotosensores están obturados y su alternancia corta que produce el flash está reducida a un cuarto de la del LCO_B , es decir, $\gamma_A = \gamma_B/4$. En los hechos, este LCO_A "ciego" es un generador baja frecuencia controlando un monoestable y produciendo un impulso γ_A suficientemente corto y de anchura constante.

Las mediciones de fases y períodos se hicieron utilizando un osciloscopio Tektronix TDS 3012 siguiendo procedimientos habituales teniendo una precisión del orden de 0.1% que es la correspondiente al equipo utilizado.

Las señales se tomaron en la salida a baja impedancia # 3 de los LM555. En aras de la coherencia con las mediciones presentadas en lo que sigue del presente artículo, tomaremos al LCO_A como el oscilador de referencia y el que asegura el proceso de trigger.

Desde las primeras observaciones, aparece con evidencia el hecho de que la sincronización implica una relación de fase entre los osciladores. La Fig. 3(a) muestra la posición de τ_B^o con respecto a τ_A^o ($\Delta\tau = \tau_B^o - \tau_A^o$) en función del período $T_A = T_s$ del LCO_A y la Fig. 3(b) indica la forma en la que se modifica la alternancia corta en función de esta misma magnitud. En estos gráficos, existen cinco situaciones interesantes en las cuales la sincronización se manifiesta y que mostramos en la Fig. 4.

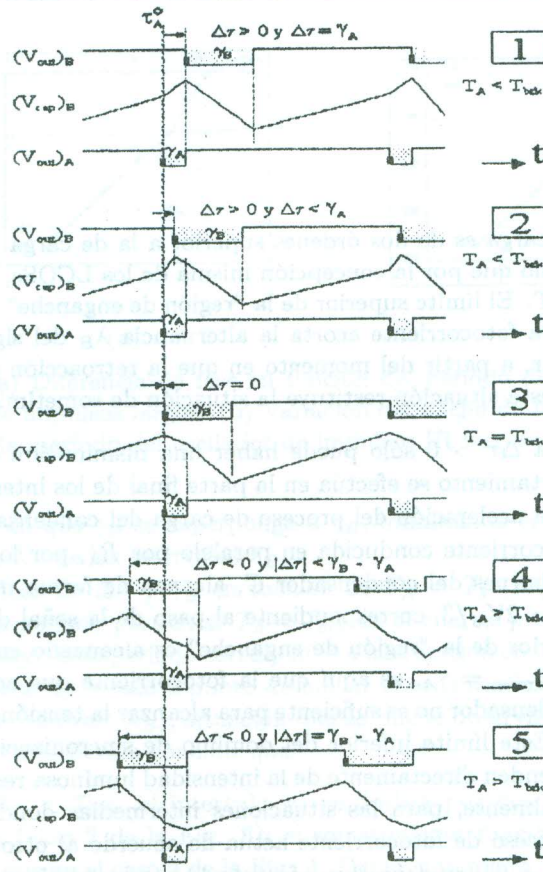


Figura 4: Formas posibles de “enganche de fase” cuando existe sincronización entre un generador baja frecuencia que somete a un LCO.

La forma de $\Delta\tau$ en función de $T_A = T_s$ puede esquematizarse de forma adecuada por dos segmentos de recta que se cortan en $\Delta\tau = 0$ y en la abscisa $T_A = T_s = T_{brk}$ (ver Fig. 3(a)). Este gráfico sugiere dos regímenes de sometimiento que se distinguen por dos parámetros fáciles a determinar:

- La extensión de la “región de enganche”, vale decir, el dominio de períodos en el cual existe la sincronización.
- La pendiente de las rectas definidas arriba que representa en cierta manera una ganancia de sometimiento (phase-locking gain).

Estos dos regímenes corresponden a mecanismos de sometimiento diferentes:

- Para $\Delta\tau < 0$ sólo puede haber alargamiento de γ_B puesto que la iluminación y por tanto la fotocorriente están enteramente comprendidas en el intervalo γ_B ; en estas condiciones, la fotocorriente se adiciona a la corriente de descarga de C a través de R_γ , por lo tanto, este alargamiento de γ_B corresponde a un aumento del período. Sin embargo, la influencia de la fotocorriente sobre el aumento del período no es importante ya que por un lado, la magnitud de la corriente de

descarga es de dos órdenes superior a la de carga y por otro lado, al hecho que por la concepción misma de los LCOs, γ es inferior al 2% de T . El límite superior de la "región de enganche" es alcanzado cuando la fotocorriente acorta la alternancia λ_B del siguiente período, es decir, a partir del momento en que la retroacción positiva resultante de esta situación restituye la situación de sometimiento inestable.

- Para $\Delta\tau > 0$ sólo puede haber una disminución del período. Este acortamiento se efectúa en la parte final de los intervalos λ por medio de la aceleración del proceso de carga del condensador C debido a la fotocorriente conducida en paralelo por R_λ , por lo que la tensión en los bornes del condensador C , alcanza de forma más rápida el valor $V_C = 2V_M/3$, correspondiente al paso de la señal de λ a γ . El límite inferior de la "región de enganche" es alcanzado cuando la diferencia $(\Delta\tau)_{min} = \gamma_A$, es aquí que la fotocorriente que acelera la carga del condensador no es suficiente para alcanzar la tensión de paso de λ hacia γ . Este límite inferior del dominio de sincronización y su extensión dependen directamente de la intensidad luminosa recibida por el LCO. Finalmente, para las situaciones intermedias donde $0 < \Delta\tau < \gamma_A$, el exceso de fotocorriente actúa de acuerdo al otro régimen, es decir " $\Delta\tau < 0$ "; en definitiva, efectuando un acortamiento de la alternancia λ seguido de un aumento de la alternancia γ .

En síntesis, cuando $\Delta\tau > 0$, (caso 2), el sometimiento de LCO_A sobre LCO_B está asegurado con una cómoda estabilidad, lo que permite la fácil medición de T_s . Por el contrario, cuando $\Delta\tau < 0$ (casos 3 y 4 en la Fig. 4), la estabilidad es precaria aunque no por ello se pierda la sincronización. Se debe notar también que los casos 1 y 5 en la Fig. 4 correspondientes a los límites de la "región de enganche" son situaciones inestables de sincronización.

4 Un LCO sometido a un generador de impulsos IR largos

El dispositivo experimental en este caso no difiere del presentado en §3 mas que en la relación de los anchos de las alternancias cortas que en este caso es de $\gamma_A/\gamma_B = 2$ que es una situación más próxima a las que se presentan habitualmente cuando un grupo de LCOs están en interacción.

Cuando trabajábamos con impulsos cortos, habíamos determinado 5 situaciones posibles de sometimiento. En cambio ahora, como la alternancia γ_A es significativamente más ancha que γ_B (Fig. 6), se hace posible

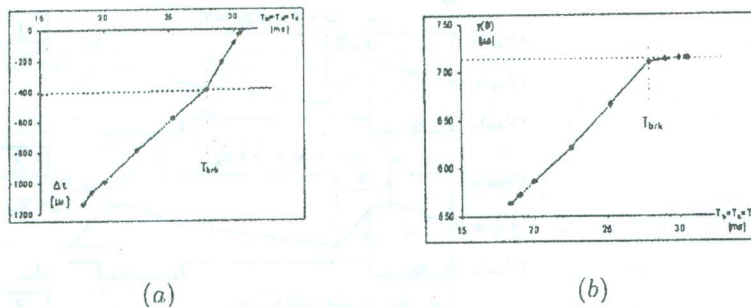


Figura 5: (a) Diferencia de fase en función del período del oscilador baja frecuencia de impulsos largos. (b) Variación del ancho de la alternancia γ_B en función del período del oscilador de impulsos IR largos.

la situación en que γ_A se superponga a γ_B , iluminando el final de λ^+ y el comienzo de λ^- de los intervalos λ_B .

Los gráficos de $\Delta\tau$ y γ_B en función de $T_A = T_s$ (Fig. 5(a) y 5(b)), muestran un período particular $T_A = T_{brk}$ en el cual se produce un cambio en la pendiente. Este período corresponde a la situación en la que γ_A recubre completamente γ_B y está a punto de iniciar el recubrimiento de λ_B^- (inicio del siguiente intervalo λ_B), situación que se puede observar en el caso 3 de la Fig. 6 que nos lleva a concluir que:

- a) Para $T_A < T_{brk}$, el intervalo γ_A se desliza por dos alternancias del LCO_B (caso 2 de la Fig. 6); el sometimiento funciona de la misma forma que en el caso 2 de la Fig. 4. Del mismo modo, el límite inferior del dominio de sincronización depende del ancho de γ_A .
- b) Para $T_A > T_{brk}$, el intervalo γ_A se desliza por tres alternancias del LCO_B (caso 4 de la Fig. 6). En este caso, el sometimiento funciona de una manera diferente: γ_B toma un valor constante (ver Fig. 5(b)) ya que está totalmente recubierta por γ_A , sin embargo, esta última es lo suficientemente amplia para iluminar por ambas partes a γ_B , es decir, de asegurar el sometimiento truncando λ^+ (la parte final de una alternancia λ_B) y haciendo lo mismo para el inicio de la siguiente alternancia λ_B^- . Asimismo, en la Fig. 5(a) se observa que T_A varía de forma más lenta indicando un cambio de régimen en el sometimiento, en efecto, el aumento en el período resulta de la acumulación del aumento constante de γ_B y de las disminuciones en las alternancias λ_B^- y λ_B^+ .

Los dos gráficos muestran que el límite superior de T_A es alcanzado cuando $\Delta\tau = 0$ (caso 5 de la Fig. 6). En otras palabras, se llega al límite superior del dominio de sincronización cuando los "instantes de referencia" se solapan. Esta observación es muy importante para el análisis de la sincronización mutua entre dos LCOs en interacción. Así, la sincronización desaparece cuando $\Delta\tau < 0$ teniendo esto como significado que el acortamiento en el inicio de

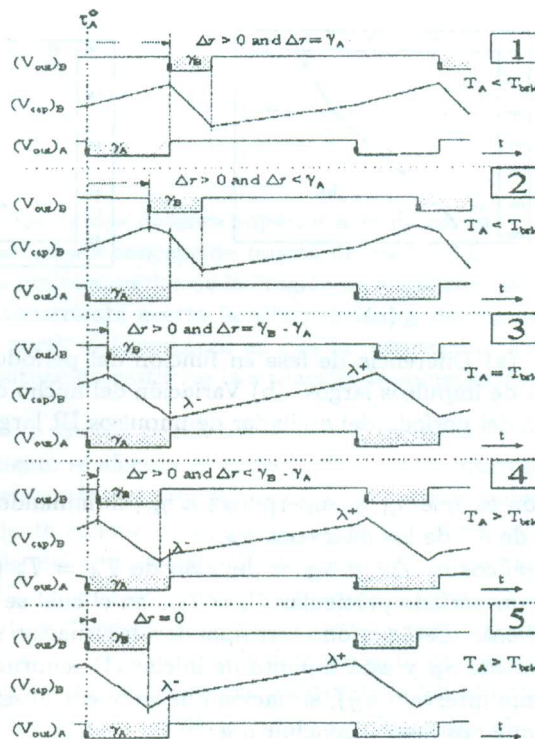


Figura 6: Formas posibles de “enganche de fase” cuando existe sincronización entre un generador baja frecuencia de impulsos IR largos que somete a un LCO.

la alternancia λ_B^- no es suficiente para mantener el sometimiento y que éste sólo funciona cuando la alternancia λ_B^+ es truncada.

5 Sincronización entre dos LCOs, mediciones e interpretación

Cuando se produce la sincronización entre dos LCOs en interacción, sus alternancias cortas (γ_A y γ_B) se superponen y cada una incluye el “instante de referencia” τ^0 del oscilador vecino. Podemos decir entonces que en esta situación, las fracciones de los intervalos γ que no se superponen, iluminan las λ^+ (final de las alternancias λ) que las preceden o el inicio (λ^-) de las alternancias λ que les siguen (caso 2 de la Fig. 7(c) y su simétrico). Esta situación es análoga a la descrita al final de §4 (casos 4 y 5 de la Fig. 6); esto nos permite deducir que de las dos porciones de alternancias λ^+ y λ^- iluminadas simultáneamente, es únicamente λ^+ que contribuye de una forma decisiva a que el sistema se sincronice. Recordemos que en el caso 5 de la Fig. 6, la sincronización se pierde cuando la porción λ^+ ya no es recubierta por la alternancia γ del LCO vecino.

El sometimiento mutuo de dos LCOs se puede analizar fácilmente cuando

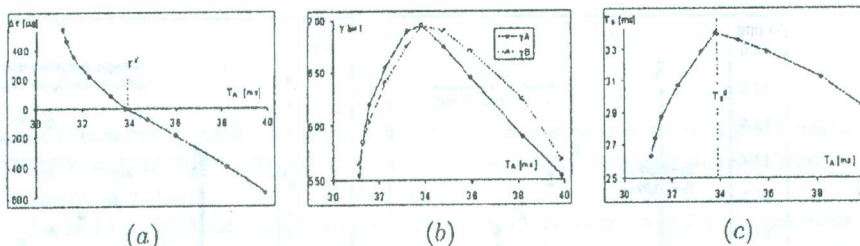


Figura 7: (a) Variación del período de sincronización en función del período del LCO_A. (b) Variación de γ_A y γ_B en función del período del LCO de referencia. (c) Período de sincronización en función del período del LCO_A

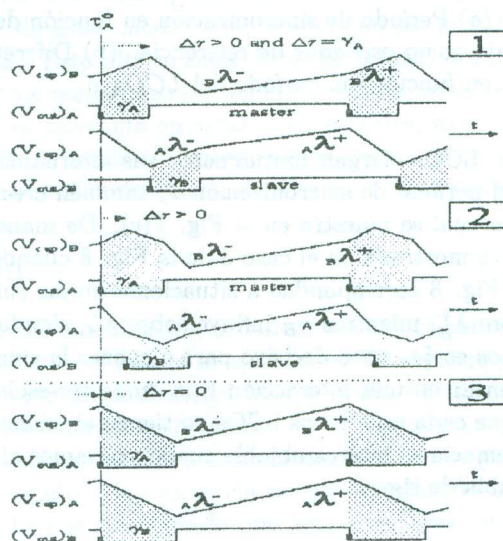


Figura 8: Formas posibles de “enganche de fase” cuando existe sincronización entre dos LCOs en interacción.

se tiene una situación experimental casi simétrica para la observación.

$$\Delta\tau = 0 \quad \text{con} \quad \gamma_A = \gamma_B$$

Es posible obtener una configuración experimental adecuada teniendo en cuenta algunas precauciones al momento de realizar las mediciones (ver en el Apéndice A).

Los gráficos de T_s , $\Delta\tau$, γ_A et γ_B en función de T_A en las Figs. 7(a), 7(b), 7(c) permiten apreciar la aparición de la estructura binaria de la interacción entre dos LCOs. Así, en la Fig. 7(a), vemos que $\Delta\tau$ puede tomar dos polaridades y en proporciones comparables la una de la otra, lo que muestra que los LCOs son intercambiables. En la Fig. 7(b), se muestra que el ancho de los intervalos γ_A y γ_B varía a medida que los mismos se interpenetran y se rebasan. Cuando γ_A y γ_B se superponen exactamente (caso 3 de la Fig.

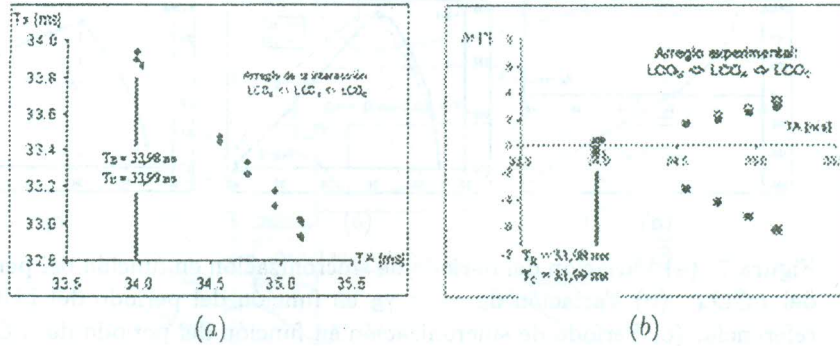


Figura 9: (a) Período de sincronización en función del período del (LCO_A) considerado como oscilador de referencia. (b) Diferencia de fase expresada en grados en función del período del LCO_A .

8), los dos LCOs alargan mutuamente sus alternancias γ al máximo y por lo tanto el período de sincronización T_s también crece, alcanzando su valor máximo lo cual se muestra en la Fig. 7(c). De manera más explícita, esta situación es mostrada en el caso 3 de la Fig. 8 cuando $\Delta\tau = 0$. Los casos 1 y 2 en la Fig. 8 corresponden a situaciones en las cuales, la alternancia γ_A actúa sobre λ_B^+ , mientras γ_B influye sobre λ_A^- , siendo éste último proceso - como vimos en §4- poco decisivo para alcanzar la sincronización; lo que nos lleva a pensar en una interacción tipo “maestro-esclavo” (master-slave) en vista de que cada uno de los LCOs no tienen el mismo status. Sin embargo, esta supremacía es intercambiable cuando pasamos al otro lado del máximo y $\Delta\tau$ cambia de signo.

6 Sincronización entre varios LCOs

Cuando trabajábamos con dos LCOs, la simetría del sistema era evidente y nos permitía escoger cualquiera de los dos osciladores como LCO de referencia sin que esto tenga incidencia práctica en nuestras mediciones de sincronización: el LCO de referencia era simplemente aquél del cual modificábamos su “período en oscuridad” manualmente. Por el contrario, para los sistemas de más de dos LCOs es indispensable especificar la posición relativa del LCO de referencia con respecto a los otros osciladores.

Pudimos observar el “enganche” en fase, es decir, la sincronización en conjuntos de hasta cinco LCOs, utilizando para ello dos osciloscopios Tektronix TDS 3012 activados simultáneamente por la señal de salida del LCO de referencia.

La Fig. 9(a) fue obtenida aplicando el procedimiento descrito anteriormente a un conjunto de tres LCOs. LCO_A es considerado como oscilador de referencia y se encuentra en medio de los otros LCOs. Los valores extremos del “período en oscuridad” delimitan una “región de enganche” comprendi-

da en el intervalo $[33.8, 35.2]ms$. Éste gráfico muestra que en una gran parte del dominio de sincronización, el sistema se sincroniza según dos modos, revelados por dos valores diferentes de T_s .

En la Fig. 9(b), se muestran los "instantes de referencia" τ_B^o y τ_C^o medidos con respecto a nuestro referente τ_A^o en función del "período en oscuridad" T_A^d , en todo el dominio de sincronización. Se observa con evidencia la existencia de una especie de simetría en esta sincronización: las fases pueden tener indistintamente una u otra polaridad. Por otro lado, de acuerdo con los datos obtenidos de estas mediciones, vemos que las polaridades de los τ_B^o y τ_C^o son opuestas. Esto último sugiere que en la reacción frente al LCO de referencia, los otros osciladores son en cierta forma intercambiables. Finalmente, algo que es relevante en estas observaciones, es el hecho de que no es posible predecir, a partir del trabajo experimental, la polaridad lo que sugiere fuertemente el hecho de que existe un fenómeno de bifurcación.

7 Conclusión

De todas las observaciones realizadas, se deduce que las diferencias de período no impiden que se alcance el estado de sincronización siempre y cuando, las diferencias de fase resultantes sean del mismo orden de magnitud que las correspondientes a las alternancias cortas.

Por otra parte, cabe señalar que el funcionamiento en régimen síncrono está estrechamente ligado a la existencia de una "región de enganche", es por esta razón que hemos considerado que los osciladores están acoplados y sincronizados si existe una dependencia mensurable y en consecuencia estable entre las diferencias de fase y las desviaciones referentes a los períodos de los LCOs en interacción.

El criterio que asocia sincronización y "región de enganche" es un elemento que coadyuba la modelización numérica de la interacción entre LCOs. En una futura publicación se expondrán los detalles del modelo numérico que se elaboró en base a las observaciones y mediciones expuestas en el presente artículo.

A Observación y mediciones de la interacción entre dos LCOs

El procedimiento de medición de un dominio de sincronización comienza haciendo los siguientes ajustes:

1. Cubrir todos los fotosensores de manera a impedir que estos reciban alguna influencia luminosa externa.
2. Ajustar $R_{\gamma A}$ y $R_{\gamma B}$ de manera que se obtenga $\gamma_A^d \approx \gamma_B^d$.
3. Ajustar $R_{\lambda A}$ y $R_{\lambda B}$ de manera que se obtenga $T_A^d \approx T_B^d$.

Cuando se destapan los fotosensores para que los LCOs comiencen a interactuar, se constata que las γ_A y γ_B son notablemente más anchas que en la oscuridad; es en este momento en el que se pueden ajustar γ_A y γ_B con el fin de optimizar la igualdad y la superposición de los intervalos γ .

A manera de ejemplo, damos los valores iniciales que se utilizaron para la construcción de las Figs. 7(a), 7(b), 7(c):

$$\begin{aligned}\gamma_A^d &= \gamma_B^d = (567 \pm 5) \mu s \\ T_A^d &= T_B^d = (33.90 \pm 0.01) ms\end{aligned}$$

lo que -una vez adquirida la sincronización- nos conduce a los siguientes valores:

$$\begin{aligned}\gamma_A &= \gamma_B = (700 \pm 5) \mu s \\ T_s &= (34.05 \pm 0.01) ms\end{aligned}$$

El experimento se resume en las siguientes repeticiones:

1. Destapar los fotosensores que están involucrados en la interacción.
2. Ajustar el potenciómetro $R_{\lambda A}$ para modificar el "período en oscuridad" T_A^d con el fin de seleccionar un nuevo valor de $\Delta\tau = \tau_B^o - \tau_A^o$.
3. Medir $\Delta\tau$, γ_A , γ_B y T_s .
4. Cubrir nuevamente los fotosensores del LCO_A y medir T_A^d .

Repetir estos pasos hasta cubrir todo el dominio de sincronización.

Referencias

- [1] Garver W, Moss F, (1993), *Electronic fireflies*. Scientific American 269(6): 128-130.
- [2] Mirollo RE, Strogatz SH, (1990), *Synchronization of pulse-coupled biological oscillators*. SIAM Journal of Applied Mathematics 50: 1645-1662.
- [3] LINEAR Databook, (1982), *LM555/LM555C Timer*. National Semiconductor Corporation (9): 33-38.