

LAZOS DE AMARRE DE FASE

Marco Antonio Pérez Cisneros*, y Mark Readman⁺

*División de Electrónica y Computación, CUCEI, Universidad de Guadalajara, México.

⁺Consultor “Control Systems Principles”

RESUMEN: Este artículo pertenece a la serie de notas de aplicación en modelado y control de sistemas que han sido creadas por “Control Systems Principles” para ilustrar los principios básicos de la teoría de control. Dichos fundamentos incluyen algunos sistemas genéricos y métodos que son comunes en muchas áreas del desarrollo tecnológico y la industria. Estas notas de aplicación buscan explicar dichos sistemas y sus principios de una manera clara y fácil de entender. Por tanto las notas describen primero las características más importantes de un sistema, como funciona y finalmente como puede ser controlado. Diferentes sistemas en tiempo real son utilizados para demostrar la viabilidad de los algoritmos de control. Dichos sistemas han sido diseñados por nuestro fundador Prof. Peter Wellstead y son manufacturados por “TQ Education & Training Ltd” bajo la línea CE. Cuando es posible, las notas de aplicación incluyen también los resultados de los experimentos utilizando estos sistemas. En particular esta nota describe la herramienta de simulación CE2000 y el control por computadora que se utilizan para explicar uno de los más usados circuitos de retroalimentación en el mundo: los lazos de amarre de fase.

1. ¿Que es un lazo de amarre de fase y por que es tan importante?

El lazo de amarre de fase (PLL, por sus siglas en ingles) es un sistema de retroalimentación. Es un sistema básico entre los bloques de construcción usados en sistemas de comunicaciones como por ejemplo teléfonos celulares, que llegan a requerir hasta 5 circuitos de amarre de fase. Otra importante aplicación esta en el control de la velocidad de un motor, por ejemplo en los discos de almacenamiento ópticos (ODD, por sus siglas en ingles) o DVD y CD's. El circuito de amarre de fase puede ser definido en tiempo discreto o en tiempo continuo. Una buena revisión de PLL desde una perspectiva de la ingeniería puede ser encontrada en la referencia [1]. En particular, estas notas de aplicación describen los componentes básicos de un PLL y muestran como analizar, diseñar y construir un PLL simple utilizando el software de simulación y control en tiempo real CE2000 [1].

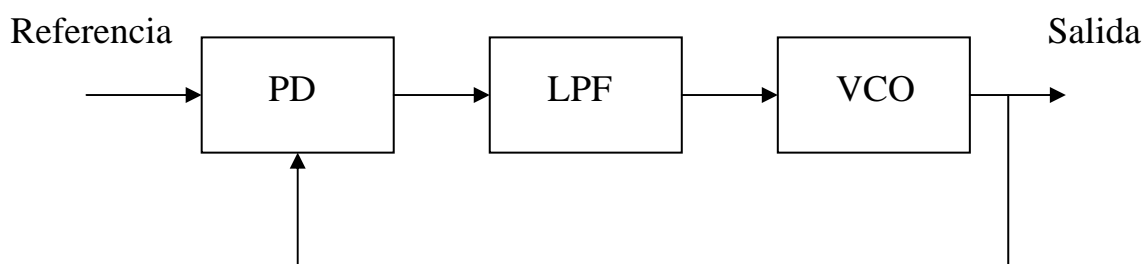


Figura 1. Lazo de amarre de fase básico.

Los componentes básicos de un PLL son:

- El detector de fase (PD, de sus siglas en ingles).
- El filtro pasa-bajas (LPF, de sus siglas en ingles).
- El oscilador de voltaje controlador (VCO, de sus siglas en ingles).

Estos tres componentes son conectados siguiendo la estructura de retroalimentación que se muestra en la figura 1. La señal de referencia es periódica, similar a una señal senoidal (o cuadrada) que es comparada con la salida del oscilador de voltaje controlado utilizando el detector de fase. La salida del detector se pasa por el filtro pasabajas y se usa como señal de control para manejar el oscilador de voltaje controlado. La idea es que el oscilador de voltaje controlado se asegure o se amarre con respecto de la señal de referencia y por lo tanto pueda ser usado para seguir una señal periódica mediante la variación de su fase y frecuencia. Los PLLs son inherentemente no lineales. La fuente mas importante de no linealidades es el detector de fase. Sin embargo, asumiendo señales pequeñas y que el operador de multiplicación es continuo, el PLL básico puede ser aproximado por un sistema lineal de segundo orden similar al servo mecanismo de posición estudiado en esta serie de notas de aplicación.

2. Análisis lineal del PLL

Si la entrada del PLL es una señal senoidal de la forma:

$$r(t) = A \sin(\omega_r t + \theta_r)$$

La señal de salida en el oscilador de voltaje controlado se asume como:

$$y(t) = \cos(\omega_y t + \theta_y).$$

El detector de fase es un multiplicador de manera que la salida del detector de fase es el producto de la señal de referencia y la señal del oscilador de voltaje controlado.

$$e(t) = K A \sin(\omega_r t + \theta_r) \cos(\omega_y t + \theta_y).$$

Esto puede ser expandido, lo que resulta:

$$e(t) = \frac{K A}{2} \left[\sin((\omega_r + \omega_y)t + \theta_r + \theta_y) + \sin((\omega_r - \omega_y)t + \theta_r - \theta_y) \right].$$

El primer término de la derecha en la expresión anterior es un término de alta frecuencia que debe ser cancelado por el filtro pasa-bajas. Si asumimos también que $\omega_y \approx \omega_r$, entonces la salida del multiplicador puede ser aproximada por:

$$e(t) = K_m \left[\theta_r - \theta_y \right].$$

La señal de error es una ganancia multiplicada por la diferencia de fase entre la señal de referencia y la señal del oscilador de voltaje controlado. Típicamente, el filtro pasa-bajas o LPF es un filtro de primer orden.

$$F(s) = \frac{K_f}{\tau_f s + 1}$$

Ya que la fase es la integral de la velocidad angular, el oscilador de voltaje controlado o VCO puede ser modelado como:

$$VCO(s) = \frac{K_0}{s}.$$

Combinando estas funciones de transferencia podemos calcular la ganancia del lazo como sigue:

$$L(s) = \frac{K_1}{s(\tau_f s + 1)} \quad K_1 = K_m K_f K_o$$

que será identificada como la función de transferencia de un servo mecanismo de posición [2]. De esta manera, la dinámica de lazo cerrado es:

$$T(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad \text{where } \omega_n = \sqrt{\frac{K_1}{\tau}} \quad \text{and } \zeta = \frac{1}{2\sqrt{\tau K_1}}$$

Esta es una función de transferencia estándar de segundo orden con una frecuencia natural ω_n y un factor de amortiguamiento ζ . El diagrama de bloques de la aproximación lineal del PLL se muestra en la figura 2. Aquí θ_r y θ_y son la señal de referencia y la fase del oscilador de voltaje controlado respectivamente.

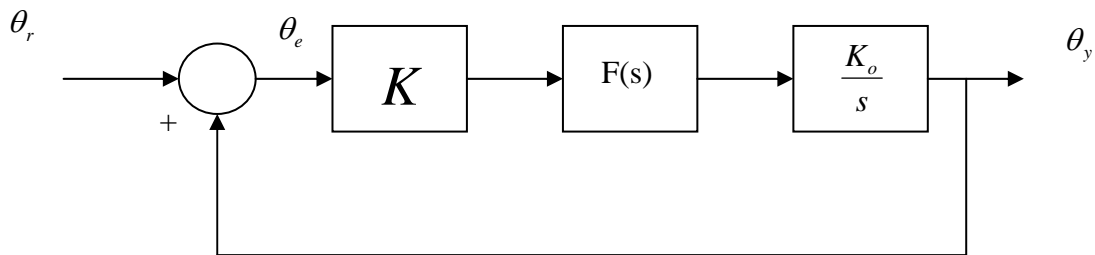


Figura 2. Aproximación lineal del lazo de amarre de fase.

3. Implementación del lazo de amarre de fase en CE2000.

El software CE2000 puede ser utilizado para implementar el lazo de amarre de fase o PLL. Primero, el lazo se expresa en forma digital como se muestra en la figura 3. De aquí, cada bloque en la figura 2 es reemplazado por su equivalente en tiempo discreto.

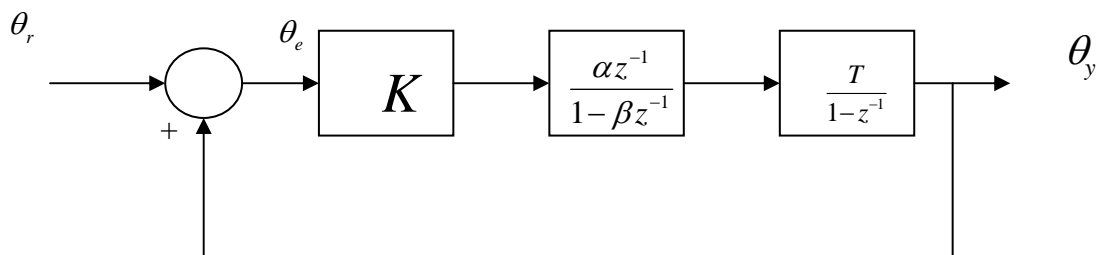


Figura 3. Simulación digital del lazo de amarre de fase.

Ahora la ganancia del lazo es:

$$L(z^{-1}) = \frac{\alpha K z^{-1}}{(1 - \beta z^{-1})(1 - z^{-1})}$$

y la función de transferencia de lazo cerrado queda como:

$$T(z^{-1}) = \frac{\alpha K z^{-1}}{\beta z^{-2} + (\alpha K - \beta - 1)z^{-1} + 1}, \quad T(z^{-1}) = 1$$

Inicialmente usamos $K = 1$, $\beta = 0.95$ y $\alpha = 1 - \beta$ para ejecutar la simulación en el programa CE2000. Un ejemplo de implementación del PLL en el CE2000 se muestra en la figura 4. En dicha figura, el oscilador de referencia es inicializado a 1.5 Hz usando una entrada constante. El PLL genera como respuesta una señal de retroalimentación de tal forma que el oscilador de voltaje controlador se asegura en la señal de referencia por medio de generar una señal de la misma frecuencia pero desplazada en fase por 90° o $1/4\pi$ radianes. Un bloque de visualización se usa para general una figura de Lissajous utilizando la referencia y el oscilador de voltaje controlado. Cuando dicho oscilador se amarra a la referencia, la figura Lissajous deberá ser un círculo. La frecuencia de la señal de referencia puede ser incrementada un poco y el PLL amarra de nuevo la señal de referencia y el oscilador. Solamente pequeños incrementos en la frecuencia puede aplicarse o de lo contrario el oscilador de voltaje controlado fallara en amarrar la referencia. Es interesante observar que este simple PLL puede amarrar señales de referencia con diferentes formas, por ejemplo una señal cuadrada o una señal triangular. Esto demuestra como un PLL puede ser usado como filtro si se amarra a las armónicas de una señal periódica compleja.

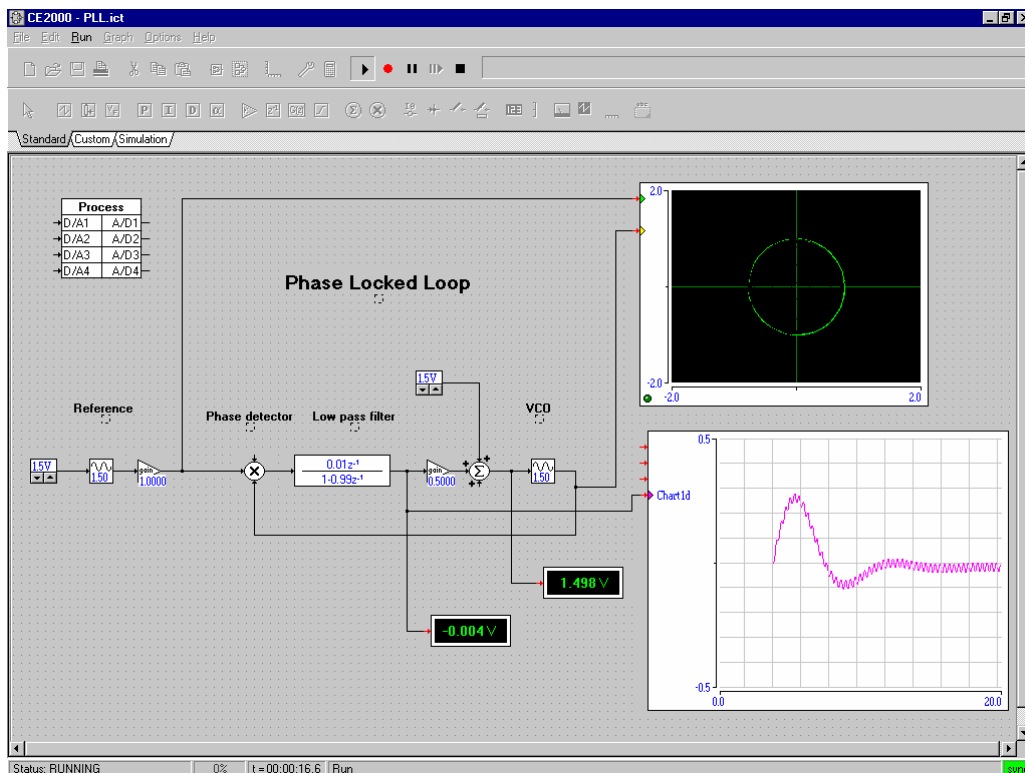


Figura 4. Implementación del PLL en CE2000.

4. Rendimiento practico de lazo de amarre de fase.

Para hacer el experimento más realista, la implementación en la figura 4 es manejada por una señal externa de referencia. Cuando empieza la simulación, el PLL amarra la señal de entrada que recibe en ese momento. Cuando el sistema alcanza el estado estable, la frecuencia de referencia del oscilador se incrementa y el PLL amarra una nueva frecuencia de referencia. En este programa para el CE2000, el bloque de conversión analógica-digital AD/DA es configurado para tener solamente una entrada y una salida. El tiempo de muestreo puede ser fijado en 15ms. El arreglo experimental y la implementación en el CE2000 se muestran en la figura 5 adelante.

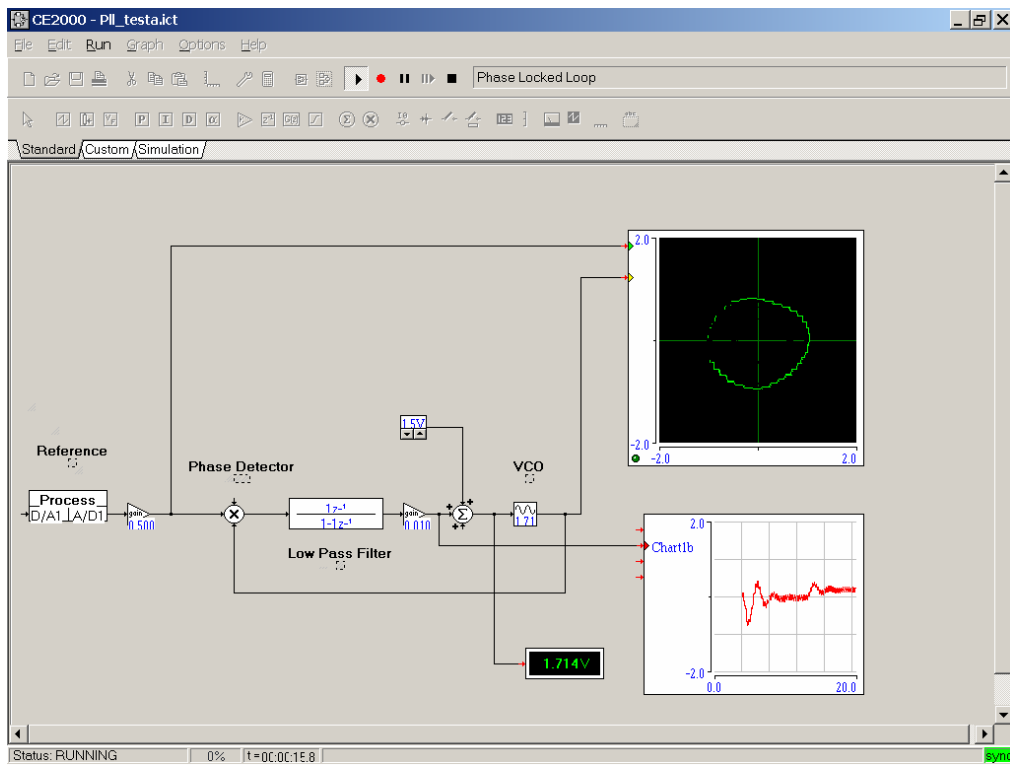
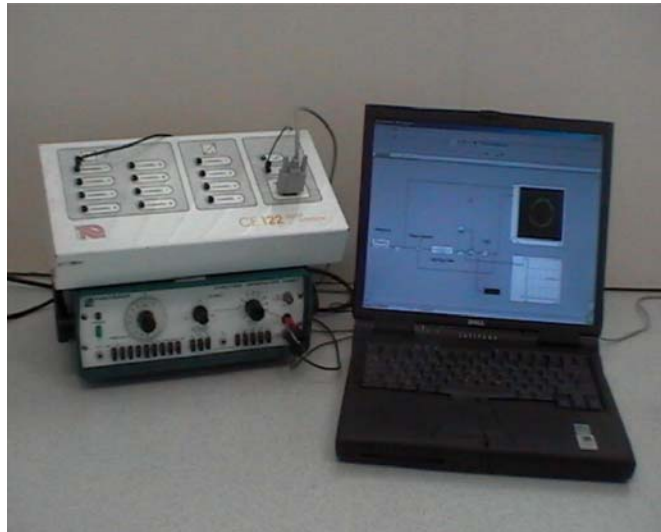


Figura 5. (Arriba) Arreglo experimental, (abajo) implementación del PLL en CE2000.

5. Palabras finales.

Esperamos que nuestra exposición acerca del lazo de amarre de fase haya sido clara y entendible. Pedimos disculpas por adelantado por que no podemos contestar tus preguntas o dudas sobre detalles en el contenido de estas notas, a menos de que tengamos un acuerdo con tu organización. Para más información sobre el lazo de amarre de fase, consulta la pagina de Internet de TQ, utiliza las ligas de interés en nuestro sitio Web www.control-systems-principles.co.uk, o escribe directamente a TQ en el correo electrónico: info@tq.com. Mas información sobre el CE2000 software para simulación y control consulta “Control and Simulation Software” en la pagina de Internet de TQ. Existen muchas referencias y libros y tutoriales que abordan el lazo de amarre de fase. Nosotros particularmente recomendamos las referencias en el siguiente apartado.

6. Referencias.

1. Daniel Abramovitch, Phase-locked loops: a control tutorial, Proc ACC, Anchorage, May 2002.
2. Dorf, R C and Bishop, R H, Modern Control Systems, (9th Ed) Prentice Hall 2000.
3. WWW. Existen muchos recursos en línea relacionados con el diseño de PLL. Muchos de ellos tienen que ver con aplicaciones relacionadas a radio frecuencia (RF).