

Identificación de elementos electrónicos: una aplicación de la teoría de identificación paramétrica de sistemas dinámicos

Jesús Aureliano Esquivel * Miguel Ángel Hernández **

* *Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Monclova, CP 257500 MEXICO (e-mail: jesus.esquivel@uadec.edu.mx).*

** *Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Monclova, CP 257500 MEXICO (e-mail: mahg85@gmail.com).*

Resumen: Este trabajo aplica la teoría de identificación paramétrica de sistemas dinámicos en la identificación de elementos electrónicos. Los problemas de ambigüedad de resultados se evitan mediante la técnica de proyección a espacio contenedor que restringe los valores posibles de los parámetros a buscar. Esto es, para hacer más eficiente la metodología propuesta se asume la aplicación del conocimiento apriori que se tenga de la planta o sistema electrónico: la estructura exacta, de ser posible, de la función de transferencia para fijar la dinámica de los parámetros conocidos. También se determina la relación entre los valores de los parámetros y los elementos para facilitar de esta manera el proceso de identificación.

Palabras Clave: identificación paramétrica, teoría de identificación, sistema electrónico, elementos electrónicos

1. INTRODUCCIÓN

La identificación paramétrica de sistemas lineales invariantes en el tiempo (LIT) una-entrada-una-salida (UEUS) es un área de estudio que tiene algunas décadas de madurez, ver Sastry *et.al.* (1989), Eykhoff (1974), Ioannou *et.al.* (1996) y Ljung *et.al.* (1983). Y ha estado a la par en otras áreas importantes de la teoría de sistemas o señales, como lo es el control adaptable y redes neuronales.

Cuando la estructura del modelo matemático de un sistema electrónico se conoce con exactitud el comportamiento dinámico del sistema real y el del modelo van de la mano. En este caso los coeficientes de los polinomios pueden tener una dependencia paramétrica muy bien definida. Al tener un circuito eléctrico pasivo los coeficientes de los polinomios pueden estar directamente relacionados con parámetros que pueden ser los valores de resistencias, bobinas o capacitores.

Cualquier circuito electrónico está sometido a fallas desde el momento de la manufactura por lo que el tema de identificación es de gran ayuda para verificar los valores de los componentes en base al comportamiento dinámico durante su funcionamiento.

En los sistemas eléctricos de potencia la identificación de parámetros en las líneas de transmisión: resistencias y reactancias, en serie y sus derivaciones, son fundamentales para el análisis, operación y control de los sistemas eléctricos de potencia, Yuly V. García (2017). Para encontrarlos las técnicas comúnmente usadas son: la aproximación asintótica de los diagramas de Bode, mínimos cuadrados, mínimos cuadrados iterativamente repondera-

dos, etc, Salvador *et.al.* (2015). Otras técnicas, como las estadísticas, son exploradas en Juan J. Guerrero (1989) donde se analizan los parámetros obtenidos en los modelos con las mediciones actuales para obtener una solución confiable; se describen problemas en los algoritmos de estimación que dificultan la estimación: niveles en los flujo de potencia, factores de ponderación, etc.

En otros campos de la ingeniería, como el de los motores eléctricos, el proceso de identificación de parámetros (resistencias, reactancias) es utilizado para el diseño de las estrategias de control, por ejemplo, en Gazdac, *et.al.* (2013) se realiza este proceso para una máquina de inducción de imán permanente.

El enfoque común de la identificación paramétrica en la ingeniería de control es hacia los parámetros en los modelos matemáticos. La determinación de sus valores durante, o antes, del control es importante para su buen funcionamiento. Sin embargo, una ventaja adicional es recordar que tienen una relación directa con los valores de algunos, o todos, los componentes o elementos del sistema y cuyo conocimiento puede ayuda a diseñar estrategias alternativas o complementarias al control implementado: condiciones de seguridad, de falla, de calidad, etc. En este sentido no se ha encontrado literatura relacionada en las diferentes bibliotecas digitales, *i.e.*, Scopus, lo cual fue la motivación principal para la investigación presentada en este trabajo, que aunque el enfoque pudiera aplicarse a diferentes sistemas dinámicos el presentado aquí es el de los circuitos eléctricos/electrónicos.

A continuación el artículo se divide en las siguientes partes. En la Sección 2 se presenta, con fines complementarios,

el tema de identificación paramétrica. En la Sección 3 la aportación principal de este trabajo. Y finalmente en la Sección 4 las conclusiones.

2. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA

En este trabajo se utiliza una técnica básica de identificación paramétrica de sistemas dinámicos, ver Sastry *et.al.* (1989), con el objetivo de identificar elementos electrónicos en un circuito. Este tipo de identificación es recursiva, esto es se utiliza una dinámica para la actualización de parámetros actuales que dan forma al sistema. Esta cambia recursivamente en base a su estado actual y valores pasados.

El concepto básico en la identificación paramétrica es que aunque el sistema original no se conozca su estructura sí, lo que se aprovecha para determinar los valores de los elementos en un circuito que satisfaga ciertas características; la principal es que sea un sistema lineal invariante en el tiempo de una entrada y una salida.

Antes de iniciar estableceremos algunas definiciones que serán importantes más adelante. Un polinomio es *mónico* si el coeficiente en la potencia mayor es 1 y es *Hurwitz* si sus raíces están sobre el semiplano izquierdo. Las funciones de transferencia racionales son *estables* si su denominador es Hurwitz, y es de *fase mínima* si el polinomio numerador es Hurwitz. El *grado relativo* de la función de transferencia es por definición la diferencia entre los grados de los polinomios numerador y denominador. Una función de transferencia es llamada *propia* si su grado relativo es al menos 0 y es estrictamente propia si su grado relativo es al menos 1.

La planta se describe por la siguiente función de transferencia

$$\frac{\hat{y}_p(s)}{\hat{r}(s)} = \hat{P}(s) = k_p \frac{\hat{n}_p(s)}{\hat{d}_p(s)} \quad (1)$$

donde $\hat{r}(s)$ y $\hat{y}_p(s)$ son las transformadas de Laplace de la entrada y la salida de la planta respectivamente, y $\hat{n}_p(s)$ y $\hat{d}_p(s)$ son polinomios coprimos, mónicos de grados m y n respectivamente. La planta se considera estrictamente propia, $m \leq n - 1$. La entrada $r(\cdot)$ se considera continua por pedazos y acotada en \mathbb{R}_+ .

El objetivo del identificador es obtener estimados de k_p y de todos los coeficientes de los polinomios $\hat{n}_p(s)$ y $\hat{d}_p(s)$ a partir de las mediciones de la entrada $r(t)$ y la salida $y_p(t)$. Note que no se asume que \hat{P} sea estable. La función de transferencia de la planta se puede expresar más detalladamente por

$$\frac{\hat{y}_p(s)}{\hat{r}(s)} = \hat{P}(s) = \frac{\alpha_n s^{n-1} + \dots + \alpha_1}{s^n + \beta_n s^{n-1} + \dots + \beta_1} \quad (2)$$

donde los $2n$ coeficientes $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ y β_1, \dots, β_n son desconocidos. Esta expresión es una parametrización de la planta desconocida. Este es un modelo en el cual solamente un número finito de parámetros necesita ser determinado. Para propósitos de identificación es conveniente encontrar una expresión la cual depende linealmente de los parámetros desconocidos. Por ejemplo la expresión

$$s^n \hat{y}_p(s) = (\alpha_n s^{n-1} + \dots + \alpha_1) \hat{r}(s) - (\beta_n s^{n-1} + \dots + \beta_1) \hat{y}_p(s)$$

es lineal en los parámetros α_i y β_i . Sin embargo, esto requeriría la implementación de derivadores. Para evitar el problema se introduce un polinomio mónico de orden n denotado por $\hat{\lambda}(s) = s^n + \lambda_n s^{n-1} + \dots + \lambda_1$. Este polinomio aunque arbitrario se asume Hurwitz. Con este polinomio es fácil encontrar que

$$\hat{y}_p(s) = \frac{\alpha_n s^{n-1} + \dots + \alpha_1}{\hat{\lambda}(s)} \hat{r}(s) + \frac{(\lambda_n - \beta_n) s^{n-1} + \dots + (\lambda_1 - \beta_1)}{\hat{\lambda}(s)} \hat{y}_p(s)$$

Esta es una expresión que parametriza la planta. Sea

$$\hat{a}^*(s) = \alpha_n s^{n-1} + \dots + \alpha_1 = k_p \hat{n}_p(s) \quad (5)$$

$$\hat{b}^*(s) = (\lambda_n - \beta_n) s^{n-1} + \dots + (\lambda_1 - \beta_1) = \hat{\lambda}(s) - \hat{d}_p(s) \quad (6)$$

de tal forma que la nueva representación de la planta puede ser reescrita

$$\hat{y}_p(s) = \frac{\hat{a}^*(s)}{\hat{\lambda}(s)} \hat{r}(s) + \frac{\hat{b}^*(s)}{\hat{\lambda}(s)} \hat{y}_p(s) \quad (7)$$

es fácil verificar que esta función de transferencia es $\hat{P}(s)$ cuando $\hat{a}^*(s)$ y $\hat{b}^*(s)$ son dados por las ecuaciones (5) y (6). Además esta selección es única cuando $\hat{n}_p(s)$ y $\hat{d}_p(s)$ son coprimos.

La realización en espacio de estado de la ecuación (7) puede ser de la forma canónica controlable seleccionando $\Lambda \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $b_\lambda \in \mathbb{R}^n$ de la siguiente forma

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 1 \\ -\lambda_1 & \dots & \dots & \dots & -\lambda_n \end{bmatrix} \quad b_\lambda = \begin{bmatrix} 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

lo cual genera

$$(sI - \Lambda)^{-1} b_\lambda = \frac{1}{\hat{\lambda}(s)} \begin{bmatrix} 1 \\ s \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ s^{n-1} \end{bmatrix}$$

En analogía con las ecuaciones (5) y (6) definimos

$$a^{*T} := (\alpha_1, \dots, \alpha_n) \quad b^{*T} := (\lambda_1 - \beta_1, \dots, \lambda_n - \beta_n)$$

y los vectores

$$w_p^{(1)} = \Lambda w_p^{(1)} + b_\lambda r$$

$$w_p^{(2)} = \Lambda w_p^{(2)} + b_\lambda y_p$$

con condiciones iniciales $w_p^{(1)}(0), w_p^{(2)}(0)$. En transformada de Laplace

$$\hat{w}_p^{(1)}(s) = (sI - \Lambda)^{-1} b_\lambda \hat{r}(s) + (sI - \Lambda)^{-1} w_p^{(1)}(0)$$

$$\hat{w}_p^{(2)}(s) = (sI - \Lambda)^{-1} b_\lambda \hat{y}_p(s) + (sI - \Lambda)^{-1} w_p^{(2)}(0)$$

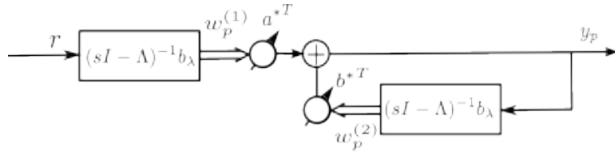


Fig. 1. Parametrización de la planta

con esta notación, la descripción de la planta es dada por

$$\hat{y}_p(s) = a^{*T} \hat{w}_p^{(1)}(s) + b^{*T} \hat{w}_p^{(2)}(s)$$

y como los parámetros de la planta a^* y b^* son constantes, la misma expresión es válida en el dominio del tiempo.

$$y_p(t) = a^{*T} w_p^{(1)}(t) + b^{*T} w_p^{(2)}(t) := \theta^{*T} w_p(t)$$

donde $\theta^{*T} := (a^{*T}, b^{*T}) \in \mathbb{R}^{2n}$ y $w_p(t)^T := (w_p^{(1)T}, w_p^{(2)T}) \in \mathbb{R}^{2n}$. Todas estas ecuaciones definen una realización en la nueva parametrización. El vector w_p es el estado generalizado de la planta y tiene dimensión $2n$. Por lo tanto, la realización de $\hat{P}(s)$ no es mínima, sin embargo todos los modos no observables de $\hat{\lambda}(s)$ son estables.

2.1 Estructura del Identificador

El propósito del identificador es producir un estimado recursivo $\theta(t)$ del *parámetro nominal* θ^* . Como r y y_p están disponibles, se define el siguiente *observador*

$$\begin{aligned} \dot{w}^{(1)} &= \Lambda w^{(1)} + b_\lambda r \\ \dot{w}^{(2)} &= \Lambda w^{(2)} + b_\lambda y_p \end{aligned}$$

para reconstruir los estados de la planta. Las condiciones iniciales son arbitrarias. Se definen las señales del identificador

$$\begin{aligned} \theta^T(t) &:= (a^T(t), b^T(t)) \in \mathbb{R}^{2n} \\ w^T(t) &:= (w^{(1)T}(t), w^{(2)T}(t)) \in \mathbb{R}^{2n} \end{aligned}$$

Debido a la condición Hurwitz de $\lambda(s)$ el *error de observación* $w(t) - w_p(t)$ decae exponencialmente a cero, *aún cuando la planta sea inestable*. Note que el estado generalizado de la planta $w_p(t)$ es tal que puede ser reconstruido de las señales disponibles aún sin el conocimiento de los parámetros de la planta. De acuerdo a la parametrización de la planta su salida puede reescribirse como

$$y_p(t) = \theta^{*T} w(t) + \epsilon(t)$$

donde la señal $\epsilon(t)$ es un indicador de la presencia de un término exponencial estable dado por

$$\epsilon(t) = \theta^{*T} (w_p(t) - w(t))$$

el término es debido a las condiciones iniciales en el observador; lo cual será negado debido a que no afecta a las propiedades del identificador. La salida del identificador será denotada por $y_i(t)$ y se define como $y_i(t) = \theta^T(t)w(t) \in \mathbb{R}$.

El *error paramétrico* se define como $\phi(t) := \theta(t) - \theta^* \in \mathbb{R}^{2n}$, y el *error de identificación* como

$$e_1(t) := y_i(t) - y_p(t) = \phi^T(t)w(t) + \epsilon(t)$$

Estas señales serán usadas en el algoritmo de identificación y son representadas en la Fig. 2

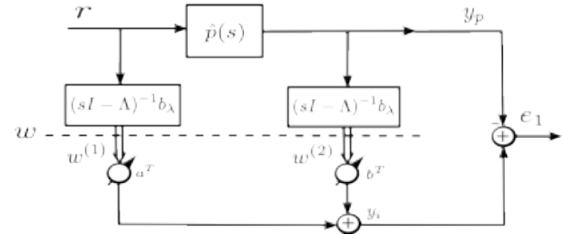


Fig. 2. Estructura del Identificador

Algunos algoritmos de identificación, ver Eykhoff (1974), y Ljung *et.al.* (1983), se basan en el sistema anterior, *i.e.*, $y_p(t) = \theta^{*T} w(t)$ donde $y_p(t)$ y $w(t)$ son señales conocidas y θ^* es desconocida. El vector $w(t)$ es llamado normalmente el *vector regresor*. Con la expresión de $y_p(t)$ está asociada la ecuación de error lineal estándar $e_1(t) = \phi^T(t)w(t)$.

Ahora, solo resta definir el algoritmo de identificación definido por una ecuación diferencial llamada *ley de actualización* de la forma

$$\dot{\theta} = \dot{\phi} = F(y_p, e_1, \theta, w)$$

donde F es un operador causal explícitamente independiente de θ^* y el cual define la evolución del parámetro θ .

2.2 Algoritmos de identificación

Una de las leyes de actualización básicas popular en el área de optimización es la del *algoritmo del gradiente descendiente*, y se define como

$$\dot{\theta} = -g e_1 w, \quad g > 0$$

El lado derecho es proporcional al gradiente del error cuadrático en la salida del identificador, visto como una función se define como

$$\frac{\partial}{\partial \theta} (e_1^2(\theta)) = 2e_1 w$$

Esta ley de actualización se puede considerar como el *método del descenso acelerado*. El parámetro es una ganancia fija y positiva, llamada la ganancia de adaptación, y nos permite variar la razón de adaptación de los parámetros. La condición inicial es arbitraria, pero puede ser escogida de acuerdo a algún conocimiento apriori que se tenga de la planta.

Una alternativa a este algoritmo es el algoritmo del *gradiente normalizado*

$$\dot{\theta} = -g \frac{e_1 w}{1 + \gamma w^T w}, \quad g, \gamma > 0 \quad (8)$$

donde g y γ son constantes. Esta ley de actualización es equivalente a la anterior, con w reemplazada por $w/\sqrt{1 + \gamma w^T w}$ en $\dot{\theta} = -g w w^T \phi$ lo cual es una forma normalizada de w . El lado derecho de la Ec. (8) es globalmente Lipschitz en ϕ , aún cuando w no esté acotada.

Cuando se conozca algunas características del parámetro nominal, por ejemplo algún conjunto que lo contenga, *e.g.*, $\Theta \in \mathbb{R}^{2n}$, el cual se asume cerrado, acotado y delimitado por una frontera suave, es útil modificar la ley de actualización para que tenga en cuenta esta información. Por ejemplo, el algoritmo normalizado modificado con una proyección se puede definir como

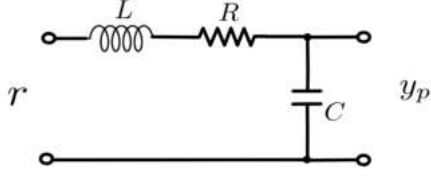


Fig. 3. Circuito Eléctrico

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= -g \frac{e_1 w}{1 + \gamma w^T w} & \theta &\in \text{int}(\Theta) \\ &= \Pr \left(-g \frac{e_1 w}{1 + \gamma w^T w} \right) & \text{si } \theta &\in \partial\Theta \text{ y } e_1 w^T \theta_{\text{perp}} < 0 \end{aligned}$$

donde $\text{int}\Theta$ y $\delta\Theta$ denotan el interior y frontera de Θ , $\Pr(z)$ denota la proyección del vector z sobre el hiperplano tangente a la frontera apuntando hacia adentro.

3. APORTACIÓN PRINCIPAL

3.1 La motivación

Siempre existe un balance entre la exactitud del modelo matemático y su viabilidad. En ese balance se ignoran características que en ocasiones resultan peligros latentes en el funcionamiento de los procesos, *e.g.*, la temperatura, por lo que es importante la vigilancia permanente de los valores de los diferentes componentes utilizados en la modelación matemática de los sistemas de control. Una variación de estos pudiera no pesar, a corto plazo, en el desempeño del sistema por la implementación de alguna técnica avanzada de control: robusto, adaptable, LQR, H^∞ , etc., sin embargo, una permanencia de esta situación pudiera tener efectos indeseables a largo plazo: fallas en el mismo control, daños en los equipos, accidentes laborales, etc. La aplicación de los conceptos de identificación de la sección anterior para vigilar los valores de los componentes de los procesos de control, sobre todo los que puedan ser más críticos ayudaría a minimizar estos riesgos.

3.2 La Propuesta

Dado el vector de parámetros desconocidos en una planta $[\alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta_1, \dots, \beta_n]$ al cual denotaremos simplemente por θ , existen un conjunto de elementos del proceso con valores $[x_1, \dots, x_q]$ al que llamaremos simplemente como x . Entonces, en la modelación del proceso se define inherentemente la relación $\theta = f(x)$. Donde $f: \mathbb{R}^q \rightarrow \mathbb{R}^{2n}$ y el rango de f^{-1} , *i.e.*, $\rho(f^{-1})$, es parte fundamental en nuestra propuesta, lo cual divide en tres casos las posibilidades en la solución de la relación; la mismas que para el caso de un mapeo lineal: solución única, sin solución o solución múltiple.

3.3 Un Ejemplo

Sea el circuito de la Fig. 3 el cual será excitado con una señal senoidal. Esta, y su salida, se emplearán para determinar los valores de la inductancia, resistencia y capacitor.

La función de transferencia es dada por

$$\hat{p}(s) = \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}}$$

Asumiendo que no se conocen los valores de L , R y C el objetivo es determinar estos valores a partir de la identificación paramétrica de la sección anterior. En este caso se tendrían los siguientes valores óptimos $\beta_2 = R/L$, $\beta_1 = 1/(LC)$, $\alpha_2 = 0$ y $\alpha_1 = 1/(LC)$. Note que la estructura de identificación para este caso tendría los parámetros $\theta^{*T} = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \lambda_1 - \beta_1 \ \lambda_2 - \beta_2]$ y que estos deben converger a los valores óptimos. Para continuar establecemos las siguientes definiciones: $x^{*T} = [L^*, R^*, C^*]$ para denotar los valores reales del circuito, $\theta^* = f(x^*)$ donde $f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^4$, en este ejemplo, para la relación entre estos valores reales y el vector óptimo del algoritmo de identificación. Por lo tanto en la evolución del proceso de identificación tendríamos la relación $x = f^{-1}(\theta)$ por lo que el rango de $f^{-1}(\cdot)$, *i.e.*, $\rho(f^{-1})$, debe ser igual a la dimensión del vector x , *i.e.*, $\dim x$, para determinar en forma única los valores de todos sus elementos; en caso de que sea menor, el número de elementos a encontrar será igual a su rango y la solución no será única. En esta situación el conocimiento de $(\dim x - \rho(f^{-1}))$ elementos ayudaría a determinar el resto. En el ejemplo se tiene

$$\begin{bmatrix} \beta_2 \\ \beta_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R/L \\ 1/LC \\ 0 \\ 1/LC \end{bmatrix} = f(L, R, C)$$

lo cual implica que $\alpha_1 = \beta_1$ por lo que la imagen de $f^{-1}(\cdot)$ es dada prácticamente con el siguiente conjunto de ecuaciones

$$C = \frac{1}{\beta_1 L}, \quad R = \beta_2 L$$

donde evidente el rango es dos por lo que es necesario tener el conocimiento de al menos uno de los elementos para encontrar los otros dos. En este caso asumiremos que se conocen dos parámetros, *e.g.*, $L = 1\text{H}$ y $C = 0.1\text{F}$, por lo que podemos aplicar el algoritmo con proyección. En este caso, al desconocer R la única incógnita del sistema es el parámetro β_2 .

El algoritmo de proyección, en este caso, es hacer $\theta_1^* = \alpha_1 = 1/(LC) = 10$, $\theta_2^* = \alpha_2 = 0$, $\theta_3^* = \lambda_1 - \beta_1 = 100 - 1/(RC) = 100 - 10 = 90$ y θ_4 es la única variable 'libre' en el algoritmo de adaptación definida como

$$\dot{\theta}_4 = -g \frac{e_1}{1 + \gamma w^T w} w_2^{(2)} \quad (9)$$

la cual debe converger a su valor óptimo, *i.e.*, $\theta_4^* = \lambda_2 - \beta_2 = 20 - R/L = 20 - 15 = 5$.

En la Figura 4 se muestra el diagrama del circuito eléctrico y el esquema de identificación implementado en Simulink del Matlab,

El bloque definido como Espacio Generalizado se le asignaron los siguiente valores:

- A = $[[0 \ 1; -100 \ -20]$ zeros(2,2); zeros(2,2) $[0 \ 1; -100 \ -20]]$
- B = $[0 \ 0; 1 \ 0; 0 \ 0; 0 \ 1]$
- C = eye(4,4)
- D = zeros(4,2)

el cual tiene como entrada a $[r, y_p]$ y salida

$$\begin{bmatrix} w_1^{(1)}, w_2^{(1)}, w_1^{(2)}, w_2^{(2)} \end{bmatrix}$$

la cual evoluciona libremente. El polinomio utilizado para esta dinámica fue $\lambda(s) = (s + 10)^2 = s^2 + 20s + 100$, por lo que $\lambda_1 = 100$ y $\lambda_2 = 20$.

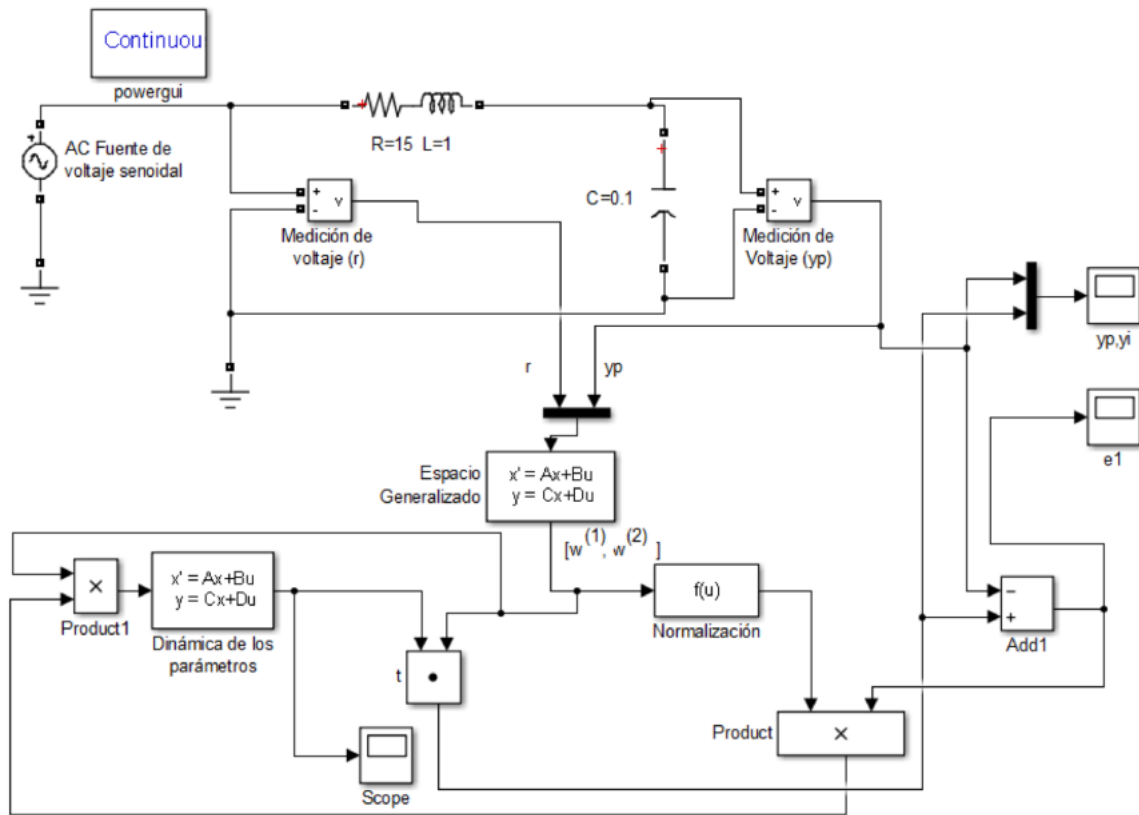


Fig. 4. Diagrama de bloques en Simulink del Identificador del sistema eléctrico

En la Dinámica del Identificador se consideran los siguientes valores en las propiedades del bloque

- $A = \text{zeros}(4,4)$
- $B = [0 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1]$
- $C = \text{eye}(4,4)$
- $D = \text{zeros}(4,4)$
- condiciones iniciales : $[10;0;90;20]$

lo cual se utiliza simplemente para integración del algoritmo de identificación donde solo se hace la integración definida en la Ec.(8). Las condiciones iniciales fueron asignadas así debido a que se conoce parte de la planta, *i.e.*, $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \lambda_1$ y λ_2 . El resultado obtenido en la simulación, con $g = 2$ y $\gamma = 3$ en la normalización del vector generalizado, se muestra en la Fig 5,

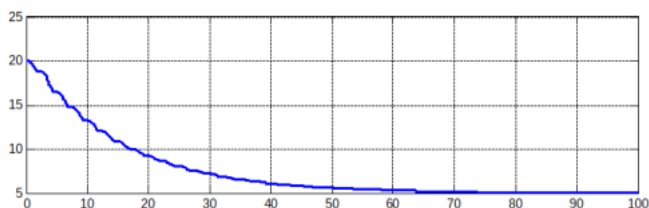


Fig. 5. Convergencia del parámetro θ_4 a su valor óptimo θ_4^*

La convergencia es hacia el cinco, lo cual tiene sentido porque $\theta_4^* = \lambda_2 - \beta_2 = 20 - 15 = 5$.

En caso de que se busquen los tres parámetros; es decir, que se conozca solamente $\alpha_2 = 0$. Entonces en el algoritmo de identificación se deja evolucionar la dinámica de θ_1, θ_3 y θ_4 . Solo θ_2 , es decir α_2 , se le asigna el cero y se aplica la condición $\dot{\theta}_2 = 0$; es a lo que llamamos en el Resumen 'fijar la dinámica', lo cual es otro caso de algoritmo de identificación con proyección. Para este caso los resultados en la simulación se muestran en la Fig. 6

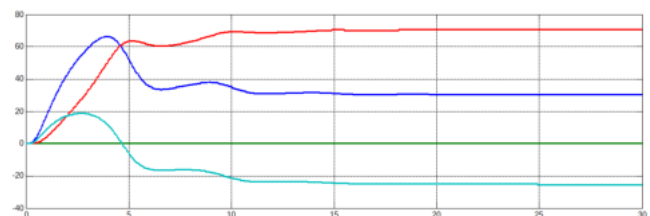


Fig. 6. Convergencia de parámetros

los cuales no converge a los valores esperados, *i.e.*, $[10, 0, 90, 5]$. Sin embargo los valores sí son válidos debido a la convergencia a cero del error e_1

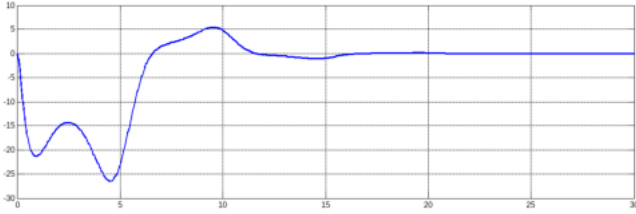


Fig. 7. Señal de error, i.e., e_1 , de la convergencia no esperada

lo cual se visualiza mejor en las salidas y_p y y_i ,

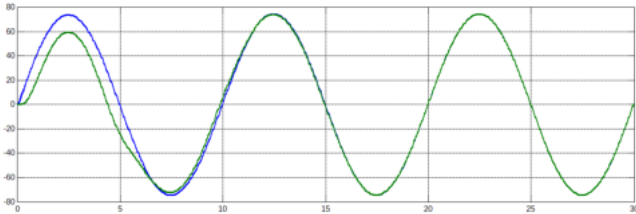


Fig. 8. Convergencia no esperada de y_i a y_p

esto es una muestra de la no unicidad en la solución.

En el caso de que el valor del capacitor sea la única incógnita la dinámica del identificador tendría dos variables estáticas, i.e., $\dot{\theta}_2 = 0$ y $\dot{\theta}_4 = 0$. El único objetivo sería encontrar las otras dos que debería converger a los óptimos $\theta_1 = \lambda_1 = 1/(LC) = 10$ y $\theta_3^* = \lambda_1 - 1/(LC) = 90$, lo cual tiene una única solución para C debido a que se conocen λ_1 y L . El resultado de la simulación se muestra en la Fig. 9

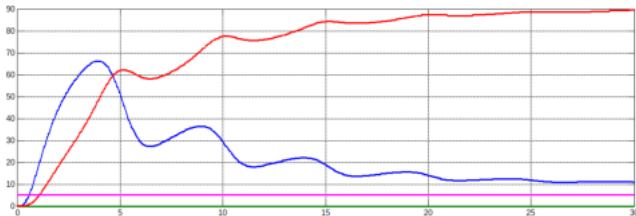


Fig. 9. Convergencia a los valores esperados de θ_1 a 10 y de θ_3 a 90

La convergencia en la Fig.9 es única en el sentido que si un parámetro converge a 10 el otro debe converger a 90. Sería una contradicción que no fuera así, el sistema tendría completamente otra dinámica.

La identificación paramétrica de sistemas lineales es una herramienta que ofrece sus ventajas en el estudio de sistemas dinámicos lineales e invariantes en el tiempo. En el caso de la manufactura o reparación de circuitos electrónicos con estructuras ‘parcialmente conocidas’ la aplicación de la teoría o estructuras de identificación puede ayudar a resolver problemas en forma sistemática, rápida y eficiente.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se exploró la teoría de identificación paramétrica de sistemas lineales invariantes en el tiempo para su aplicación en la identificación de valores de componentes electrónicos pasivos.

Se mostró que aunque la teoría puede resolver el problema en forma ambigua; es decir, apesar de no tener unicidad en la solución, es aún posible la aplicación de las técnicas de identificación utilizando herramientas como la proyección en espacios cerrados, acotados y convexos.

La teoría se aplicó a un sistema RLC pero es fácilmente extendible a cualquier sistema dinámico donde los coeficientes, o parámetros, a identificar están relacionados directamente con algún elemento o componente del proceso y cuyo valor es importante en otras funciones del sistema.

REFERENCIAS

- Eykhoff,P.(1974) *System Identification*, Wiley & Sons, New York.
- García-García, Yuly Viviana(2017). *Identificación de parámetros en sistemas eléctricos de distribución*. Tesis de Licenciatura del Programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira. Colombia.
- Gazdac,A.M., L. Di Leonardo, A. Mpanda Mabwe, F. Betin and M. Villani (2013), "Electric circuit parameters identification and control strategy of dual-rotor Permanent Magnet Induction Machine," 2013 International Electric Machines & Drives Conference, Chicago, IL, 2013, pp. 1102-1107.
- Guerrero Garza, Juan José (1989), "Análisis de desbalances e identificación de parámetros en líneas de transmisión." Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica. DIE FIME UANL. México.
- Ioannou, P.A., Sun,J. (1996) *Robust Adaptive Control*. Prentice-Hall.
- Ljung, I. and Soderstrom, T. (1983). *Theory and Practice of Recursive Identification*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Salvador, E., Bañuelos Cabral José A., Gutiérrez Robles, Jose Luis, Naredo Villagrán Julián, Sotelo Castañon, Verónica Adriana, Galván Sánchez, Jorge Luis. (2015) "Identificación de parámetros con métodos numéricos para el modelado de sistemas eléctricos con dependencia frecuencial." *Ingeniería Energética* Vol 36, pp.155-167, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Cuba.
- Sastry,S., and Bodson,M. (1989). *Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness*. Prentice-Hall.