



*Universidad Nacional Experimental  
Rafael María Baralt  
Vicerrectorado Académico  
Programa Investigación – CDCHT*

# *Revista Investigaciones Científicas*

*Nueva Época*



Enero – Diciembre  
2010  
VOL. 1. N° 1 y N° 2  
Cabimas - Venezuela

ISSN: 1315-8694  
Depósito Legal: pp. 95-0019  
Código REVENCYT: INCIEN, RVI 007

República Bolivariana de Venezuela  
 Universidad Nacional Experimental  
 "Rafael María Baralt"  
 Vicerrectorado Académico  
 Programa Investigación – CDCHT



*Revista Investigaciones Científicas*  
 Nueva Época  
 UNERMB  
 ISSN: 1315-8694  
 Depósito Legal: pp. 95-0019  
 Código REVENCYT: INCIEN, RVI 007  
 © Universidad Nacional Experimental  
 "Rafael María Baralt", 2010.  
 Cabimas, Venezuela.

Fondo Editorial UNERMB  
 Coordinador: MSc. Jorge Luis Barboza  
 Portada y diagramación interna: Fondo Editorial UNERMB  
 Impreso en: Imprenta de la UNERMB  
 Tlf.: 0264 934 2900  
 Santa Rita, Edo. Zulia, Venezuela.  
 Correo electrónico: fondoeditorialunermb@gmail.com



## ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| <i>Presentación</i>  | 5  |
| <i>Editorial</i>   | 7  |
| <hr/>  |    |
| <i>Artículos</i>   | 9  |
| <b>Análisis de indicadores para la selección de estructuras de modelos no lineales en la identificación de sistemas.</b>     | 11 |
| <i>Analysis of Indicators for the selection of Nonlinear Model Structures in System Identification.</i>                      |    |
| <b>Ailyn Dirinot y Sergio de Pool.</b>   |    |
| <b>Síntesis de un controlador LQR difuso.</b>  | 27 |
| <i>Synthesis of a fuzzy controller LQR.</i>  |    |
| <b>Hanna Aboukheir.</b>  |    |
| <b>Aplicación del método de diagrama de coeficientes al levitador magnético.</b>   | 40 |
| <i>Application of coefficient diagram method to magnetic levitator.</i>  |    |
| <b>Luis Colmenares y Pedro Teppa.</b>  |    |
| <b>Sistema de control óptimo para un separador gas-líquido bajo condiciones de flujo intermitente.</b>                       | 52 |
| <i>Optimal control system for a gas-liquid separator under intermittent flow conditions.</i>                                 |    |
| <b>César Eizaga, Hanna Aboukheir y Leonardo Cáliz.</b>   |    |
| <b>DVS en control MIMO: respuestas en frecuencia y desacople.</b>  | 71 |
| <i>SVD in MIMO Control: Frequency Response and Decoupling.</i>   |    |
| <b>Pedro A. Teppa G. y Juan B. Acosta A.</b>   |    |
| <b>Diversidad de lepidópteros en bosques aprovechados: variación en el corto plazo por aplicación de retención variable.</b> | 89 |
| <i>Lepidoptera diversity in harvested forests: short term variation due to variable retention application.</i>               |    |

**María Vanessa Lencinas, Guillermo Martínez Pastur, Juan Manuel Cellini, Emilce Gallo y Carlos Alberto Busso.**

**La productividad investigativa de los docentes del Programa Ingeniería y Tecnología de la Universidad Nacional Experimental Rafael María Baralt.** 103

*The research productivity of teachers of Engineering and Technologyh Program of the National Experimental University Rafael María Baralt.*

**Yamelis Pérez Colmenares.**

---

|  |     |
|--|-----|
| <i>Política Editorial</i>                    | 119 |
| <i>Instrucciones para los autores</i>        | 120 |
| <i>Modelo de autorización de publicación</i> | 125 |
| <i>Instrucciones para los árbitros</i>       | 126 |
| <i>Planilla para arbitraje de artículos</i>  | 128 |
| <i>Suscripción</i>                           | 129 |



## PRESENTACIÓN

---

La Investigación Científica representa una de las actividades más exigentes que tiene el docente universitario, no solo por el compromiso que implica la creación de nuevos conocimientos, si no por la responsabilidad de transmitir dichos conocimientos a los educandos. La divulgación de esos conocimientos implica otra tarea importante, ya que existen limitaciones para hacérselos llegar al público.

Las revistas arbitradas se pueden considerar el gran fenómeno académico literario del siglo XX y continúan proyectándose cada vez más en el XXI. La aceptación casi total de las revistas arbitradas electrónicas han ampliado aún más las posibilidades que se le brinda a los escritores para ofrecer a la comunidad los resultados de sus investigaciones. La publicación es uno de los métodos inherentes al trabajo científico, con lo cual se asegura la difusión de los resultados obtenidos y su proyección entre sus pares.

En nuestra Institución hemos decidido relanzar la Revista “Investigaciones Científicas” con el objetivo de cumplir con una de las obligaciones de la Universidad. Este medio divulgativo se inicio en el año 1995, con un comité editorial comprometido con la ciencia y estuvo durante ocho (8) años ininterrumpidos cumpliendo esa misión. Sin embargo, por razones de diversa índole fue interrumpida la su edición. En estos momentos estamos seguros de poder cumplir con este compromiso, ya que las circunstancias así lo exigen. Se tiene previsto ofrecer dos ediciones por año para garantizar a los

*Presentación*

investigadores de nuestra institución y de otras nacionales e internacionales, la divulgación de sus artículos.

**Carlos Sangronis**

**Dir. Programa Investigación-CDCHT**



***EDITORIAL***

---

Presentamos a la comunidad universitaria, científica, académica, nacional e internacional, la Revista Investigaciones Científicas de la Universidad Nacional Experimental Rafael María Baralt (UNERMB), la cual está iniciando una Nueva Época en virtud de su relanzamiento en el ámbito de la producción intelectual, tanto de los investigadores de la nuestra Universidad, como de aquellos investigadores que forman parte del universo académico y que han generado conocimiento en las áreas de las ciencias aplicadas, específicamente en temas de ingeniería, biología, química, ciencias de la salud, matemática, ecología, ciencias ambientales, ciencias agrícolas, veterinaria. Es un esfuerzo del Programa Investigación de la UNERMB con el deseo de impulsar la difusión del conocimiento científico.

Nuestro agradecimiento a los miembros del Comité Asesor y del Comité Editorial, a los árbitros e investigadores que publican en este número. En especial, deseamos agradecer a la Profesora Gertrudis Sirit, por impulsar la Nueva Época de la revista; al Doctor Dionisio Brito, consecuente en el apoyo académico; al Profesor Hanna Aboukheir, por la revisión y acceso a temas e investigadores de Ingeniería. A la Profesora Marisel Núñez, por las revisiones; al Doctor Edgar Córdova, por las recomendaciones generales. De igual manera, al Profesor Eddy Mogollón, a Diannelis Urbano del INIA Mérida, al Profesor Tyrone Clavero de LUZ, a la Profesora Rebeca Sánchez, de la Revista de Ingeniería de la UCV y al Profesor Miguel Sánchez, de la Revista Técnica de Ingeniería de LUZ. Por último, al Fondo Editorial de la UNERMB, en la persona de su Coordinador MSc. Jorge Luis Barboza.

*Editorial*

Esperamos recibir los artículos que tengan a bien enviarnos, comentarios, siempre en función de mejorar, crecer en calidad para la difusión de las temáticas propuestas.

**Prof. Cesar Timaure**  
**Director**



***ARTÍCULOS***

## **Análisis de indicadores para la selección de estructuras de modelos no lineales en la identificación de sistemas**

Analysis of Indicators for the selection of Nonlinear Model Structures in System Identification

*Ailyn Dirinot\* y Sergio de Pool\*\**

### **Resumen**

Este artículo muestra que al estudiar ciertos indicadores, previa realización de la fase de selección de una estructura de modelos, es posible determinar si el sistema a identificar es lineal o no, de igual forma, la mejor familia puede ser establecida antes de iniciar el proceso de selección de órdenes, reduciendo el tiempo invertido en la etapa de ensayo y error común en la metodología empleada actualmente en la identificación de sistemas.

**Palabras clave:** identificación de sistemas, sistemas no lineales, redes neurales.

Recibido el 25/02/09. Aceptado el 15/07/09  
Autor para correspondencia: e-mail: ad283m@yahoo.com, sergiodepool@gmail

\* Universidad "Dr. Rafael Beloso Chacín".  
\*\* IUT "Pedro Emilio Coll". Zulia, Venezuela.

## Abstract

This paper shows that if certain indicators are studied after completion of the phase of selecting a model structure, then it is possible to determine if the system is to identify linear or not, equally, the best family can be established before starting the selection process orders, reducing time spent on the stage of trial and error common in the current methodology in system identification.

**Key words:** System Identification, non linear systems, neural networks

## INTRODUCCIÓN

El diseño de un controlador, continuo o discreto, usando técnicas clásicas o modernas, requiere del modelo de la planta, mediante el uso de simulaciones, los ajustes necesarios a los parámetros serán realizados para obtener respuestas dentro de criterios de comportamiento especificados.

Existen diferentes formas de obtener el modelo de una planta, una de éstas es mediante el uso de leyes físicas para obtener las ecuaciones que representan al sistema, sin embargo, actualmente los procesos son complejos, por lo que el modelado de un sistema usando esa metodología es extremadamente complejo, por lo que, diferentes técnicas, basadas en métodos estadísticos, han sido desarrolladas para obtener el modelo matemático de un sistema, lo cual es conocido como la Identificación de Sistemas.

En el proceso de identificación de sistemas, existen varias fases, sin embargo, el criterio TSTF

debe ser usado, lo cual significa Try Simple Things First, o intente primero los métodos sencillos (1).

Sin embargo, debe ser indicado que en ocasiones, aún si las partes no lineales del sistema son incluidas en el modelo, en la forma de una entrada extra o usando transformaciones de la data, las expresiones lineales no logran representar el sistema razonablemente bien, en esos casos, los modelos no lineales deberán ser usados.

En esta investigación, un análisis previo de indicadores es realizado para determinar si una estructura de modelo en particular debería ser utilizada, también, la revisión de los indicadores será usada para tratar de establecer cuando el proceso de identificación de sistemas tiene que iniciar usando estructuras no lineales debido a que la data experimental no podrá ser reproducida de forma aceptable por una expresión lineal o cuando las estructuras lineales serán suficientes para explicar el com-

portamiento del sistema.

## BASES

### A. Correlación Lineal

Es definida como una medida de la intensidad de la relación lineal entre dos variables (2).

El objetivo principal es establecer si existe una correlación lineal entre la variable dependiente e independiente. Usando en [1] las medias de la variable de entrada  $x$  y salida  $y$ ,  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  respectivamente, así como también el número de muestras  $n$  y las desviaciones estándar para  $x$  e  $y$ , expresadas respectivamente por  $s_x$  and  $s_y$ , el coeficiente de correlación lineal puede ser calculado.

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{(n - 1) s_x s_y} \quad [1]$$

El valor del coeficiente de correlación varía entre -1 a 1, y éste depende si se tiene una correlación positiva o negativa.

Si el valor de la variable independiente aumenta y la variable dependiente tiene una tendencia creciente, entonces se tiene una correlación positiva. En concordancia, en una correlación negativa, cuando la variable independiente crece, la variable dependiente disminuirá su intensidad.

Dependiendo del valor de  $r$ , la distribución de los puntos,

cuando la entrada y la salida son graficadas, asemejará a una línea. Debido a lo cual, si el coeficiente de correlación es cercano a 1, entonces los puntos no tendrán un alto grado de dispersión, por lo que la figura parecerá ser una recta con una pendiente positiva.

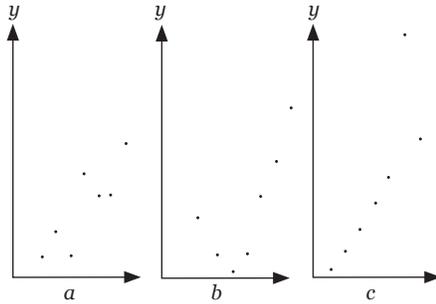
Consecuentemente, un set de datos con un coeficiente de correlación cercano a 1, su gráfico de dispersión asemejará una línea con una pendiente negativa.

Sin embargo, cuando un análisis de regresión y/o correlación se lleva a cabo, es importante observar el gráfico de dispersión, esto es, un plano en un sistema de coordenadas donde todos los pares de puntos son representados (2).

Si la gráfica  $x$  vs  $y$  tiene la forma de una línea recta, entonces, se tiene una correlación lineal. Algunas veces no existen relaciones no lineales entre las variables donde existe un patrón de dispersión bien definido, pero la entrada y la salida no están relacionadas en una forma lineal, por lo que no existe correlación lineal (2).

Existen varios riesgos cuando el coeficiente de correlación es interpretado, pues es considerado que  $r$  solo mide la intensidad de relaciones lineales, sin embargo, un valor elevado de  $r$  no implica una relación causa/efecto (3).

Para aclarar la aseveración previa, en la Figura 1 tres set de



**Figura 1.** Tres sets de datos con el mismo valor en el coeficiente de correlación. En la figura a, el valor de  $r$  puede ser interpretado como una medida significativa de la intensidad de la relación. En el segundo caso, existe una relación curvilínea entre las variables, por último, en el tercer caso, todos los puntos, a excepción de uno, se encuentran en una línea recta, y se encuentra tan alejado que probablemente es un outlier o un error durante la medición de las señales.

datos diferentes son considerados, todos éstos con el mismo valor en el coeficiente de correlación, es claro que solamente en el primer arreglo el valor de  $r$  puede ser visto como una medida significativa de la intensidad de la relación.

Como punto final, es importante enfatizar que, si bien la correlación indica la intensidad de una relación lineal, no proporciona la asociación numérica exacta, lo cual implica que no será posible determinar un valor de  $y$ , dada  $x$ , para ese propósito, es utilizado un análisis de regresión.

### B. Identificación de sistemas para sistemas lineales

La identificación de sistemas como técnicas usadas para cons-

truir y complementar modelos a partir de medidas (1).

Debido a lo anterior, la identificación de sistemas puede ser vista como una serie de técnicas utilizadas para determinar el modelo matemático que mejor se adapte a la data medida en un proceso.

En el proceso de identificación de sistema existen ciertas etapas, en [1] los pasos a seguir puede ser resumidos en las siguientes fases:

Diseño de experimento, donde la data de entrada/salida del sistema es grabada.

Revisión de la data, asimismo, debe ser preprocesada, lo cual implica la eliminación de tendencias y outliers; de igual forma, un filtro puede ser aplicado para mejorar los rangos de frecuencia importantes.

Seleccionar y definir una estructura de modelo.

Estimar el mejor modelo en la familia seleccionada, de acuerdo a la data de entrada – salida y según el criterio dado para el ajuste.

Examine las propiedades del modelo.

Si el modelo es lo suficientemente bueno, detenga la iteración, de lo contrario, seleccione una nueva estructura y continúe a partir de allí.

En la identificación de sistemas, la tarea principal del usuario es seleccionar la estructura y el orden del modelo, también deberá establecer, luego que el modelo es estimado, si éste es lo suficientemente bueno para ser usado, de acuerdo con su aplicación, es decir, si será usado para predicción, simulación o control.

Tal como fue explicado anteriormente, la identificación de sistemas trata de obtener una expresión matemática explícita del proceso, debido a lo cual, el problema fundamental cuando la estimación paramétrica es usada, es el de encontrar la estructura de modelo y los valores numéricos de sus parámetros, lo cual será explicado en el próximo punto.

### 1. Estimación Paramétrica

Cuando un proceso no puede ser determinado usando leyes físicas, porque su construcción es desconocida o es muy complejo

para establecer las relaciones físicas, entonces, los modelos estandarizados deberán ser usados.

Esos modelos pueden ser vistos como “Ready – Made” o listos para usar, debido a que el usuario solo debe indicar el orden para encontrar una expresión que ajuste la data (1).

Modelos paramétricos describen el sistema en términos de ecuaciones en diferencia y funciones de transferencia.

Un modelo lineal en tiempo discreto es descrito usando [2], donde  $H(q, \theta)$  es una función de transferencia que representa la perturbación del sistema,  $G(q, \theta)$  también es una función racional, pero representa la salida libre de ruido,  $u(t)$  y  $e(t)$  son la entrada y ruido blanco, respectivamente, finalmente,  $\theta$  es el vector de parámetros el cual contiene los coeficientes para el modelo.

$$y(t) = G(q, \theta)u(t) + H(q, \theta)e(t) \quad [2]$$

La ecuación [3] es usada para expresar la función de transferencia de la salida libre de ruido,  $G(q, \theta)$  es la función racional que usa el operador  $q$ , también, existe un atraso de  $nk$  muestras que representan el atraso desde la entrada a la salida. Los coeficientes  $b_i$  y  $f_i$  están contenidos en el vector de parámetros. El orden del sistema está definido

por  $nb$  y  $nf$ .

$$G(q, \emptyset) = \frac{B(q)}{F(q)} = \frac{b_1 q^{-nk} + \dots + b_{nb} q^{-nk-nb+1}}{1 + f_1 q^{-1} + \dots + f_{nf} q^{-nf}} \quad [3]$$

Mediante el uso de [4], la función racional para la perturbación del sistema es expresada.  $H(q, \emptyset)$  es un polinomio que utiliza el operador  $q$ . Los coeficientes  $c_i$  y  $d_i$  se encuentran en el vector de parámetros. El orden del sistema está definido por  $nc$  y  $nd$ .

$$H(q, \emptyset) = \frac{C(q)}{D(q)} = \frac{1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{nc} q^{-nc}}{1 + d_1 q^{-1} + \dots + d_{nd} q^{-nd}} \quad [4]$$

La ecuación [5] define la estructura general para un modelo paramétrico, donde  $A(q)$ ,  $B(q)$ ,  $C(q)$ ,  $D(q)$  y  $F(q)$  son polinomios usando el operador  $q^{-1}$ .

$$A(q)y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} u(t-nk) \frac{C(q)}{D(q)} e(t) \quad [5]$$

Los polinomios  $A(q)$ ,  $B(q)$ ,  $C(q)$ ,  $D(q)$  y  $F(q)$  son expresados usando (6), (7), (8), (9) y (10) respectivamente. El vector de parámetros  $\emptyset$  contiene los coeficientes  $b_i$ ,  $c_i$ ,  $d_i$  y  $f_i$ . Finalmente, es importante destacar que el orden del sistema está definido por  $na$ ,  $nb$ ,  $nc$ ,  $nd$  y  $nf$ .

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na} \quad [6]$$

$$B(q) = b_1 + b_2 q^{-1} + \dots + b_{nb} q^{-nb+1} \quad [7]$$

$$C(q) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{nc} q^{-nc} \quad [8]$$

$$D(q) = 1 + d_1 q^{-1} + \dots + d_{nd} q^{-nd} \quad [9]$$

$$F(q) = 1 + f_1 q^{-1} + \dots + f_{nf} q^{-nf} \quad [10]$$

El número de parámetros en cada polinomio es definido por el orden del sistema, los valores numéricos son establecidos usando métodos de estimación los cuales seleccionan las cantidades numéricas que proporcionan el mejor ajuste entre la salida simulada y la medida.

Las diferentes familias o estructuras son obtenidas usando la variación de los órdenes en los polinomios  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ , y  $F$ .

## 2. Estructuras paramétricas

Cada estructura tiene sus ventajas propias, las cuales serán analizadas.

### Auto Regressive Exogenous (ARX)

También conocida como el modelo ARX. La estructura es determinada usando  $nc = nd = nf = 0$  para el orden del sistema en [5].

La expresión matemática que define esta estructura es la siguiente:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t-nk) + e(t) \quad [11]$$

La estructura ARX es considerada como la más simple, por lo que se recomienda iniciar la fase de estimación seleccionado esta familia, sin embargo, también es indicado que los órdenes de los polinomios  $A$  y  $B$  requeridos para modelar el sistema pueden ser elevados (1).

Esta estructura es conveniente cuando el ruido de señal a ruido es bueno, también, en aquellos casos donde las perturbaciones principales entran al proceso desde una etapa temprana como a la entrada, lo cual es razonable, considerando que la entrada y la salida están sometidas a los mismos polos.

### Modelo Auto Regressive Moving Average (ARMAX)

Esta estructura resulta si el

orden del sistema en [5] es seleccionado  $nf = nd = 0$ .

La ecuación (12) define la familia ARMAX.

$$A(q)y(t) = B(q)u(t-nk) + C(t)e(t) \quad [12]$$

El nombre del modelo está basado en el hecho que el polinomio  $A(q)$  representa la auto regresión,  $C(q)$  es el promedio móvil del ruido blanco y  $B(q)$  corresponde a la entrada extra o exógena (1).

Similar al caso ARX, en la estructura ARMAX el ruido y la señal de entrada comparten la misma dinámica (polos), debido a lo anterior, cuando las perturbaciones entran en una etapa temprana, esta familia es la recomendada.

La diferencia principal entre la familia ARX y la ARMAX reside que el polinomio  $C(q)$  ofrece una mayor flexibilidad cuando las perturbaciones deben ser modeladas, por lo cual, es una estructura comúnmente usada (1).

### Output Error (OE)

Es un caso especial en las estructuras, en Ref. [1] es explicado que las propiedades de las señales de perturbación no son modeladas, por lo que  $H(q)$  es igual a uno.

La estructura es obtenida cuando en [5] los órdenes son elegidos de la siguiente forma  $na = nb = nd = 0$ . En [13] la familia OE es definida.

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} u(t-nk) + e(t) \quad [13]$$

En esta estructura el ruido será la diferencia entre la salida actual y la salida libre de ruido. Este modelo tiene como ventaja que la dinámica del sistema es calculada de forma separada a las perturbaciones, es decir, no comparten los polos.

Box – Jenkins (BJ)

Esta estructura se deriva de [5] cuando  $na = 0$ . La ecuación matemática que define la familia BJ es expresada en [14]

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} u(t-nk) \frac{C(q)}{D(q)} e(t) \quad [14]$$

La estructura BJ es considerada como el modelo completo, debido a que la dinámica del sistema y las perturbaciones son modeladas de forma separada.

Si bien las estructuras BJ y OE son capaces de dar una correcta descripción de la dinámica del sistema, aún si las propiedades de las perturbaciones no son modeladas de forma correcta, en los casos donde existe retroalimentación, lo expresado anteriormente ya no es válido, en concordancia, la etapa de modelado debe ser realizada de forma cuidadosa (4).

La familia BJ es conveniente en aquellos procesos donde las perturbaciones entran al siste-

ma en una etapa tardía, como en medidas con un alto nivel de ruido a la salida.

**C. Identificación de sistemas para sistemas no lineales**

Cuando un sistema tiene que ser identificado, el procedimiento propuesto por Lennart Ljung es usualmente utilizado, lo cual indica intente primero los métodos sencillos, sin embargo, algunas veces, debido a la no linealidad de la data, ninguna de las estructuras lineales son capaces de proveer resultados satisfactorios, por lo que técnicas no lineales deben ser usadas.

Los modelos no lineales de tipo caja negra, son preparados para describir, virtualmente, cualquier sistema no lineal. Algunas de las estructuras más comúnmente usadas son los wavelets, redes de bases radiales, redes neurales, entre otras (5).

Dado cualquier experimento y su correspondiente set de datos, la salida y entrada observada,  $y(t)$  y  $u(t)$ , respectivamente, son organizadas en el vector de regresión  $\varphi(t)$ , como en [15]

$$\varphi(t) = [y(t-1) \dots y(t-na) \ u(t-nb)]^T \quad [15]$$

Sin embargo, de acuerdo a la estructura usada, el vector de regresión definido en [15] tiene otros componentes, los cuales se

denominan regresores.

Para establecer la relación entre la salida  $y(t)$  y la entrada  $u(t)$ , un set de entrenamiento debe ser construido como se muestra en [16].

$$Z^N = \{y(t)\varphi(t)\} \quad [16]$$

En general, todo el set de datos disponible puede ser usado para entrenar una red neural, sin embargo, usualmente solamente una pequeña parte será necesaria, por lo que el resto puede ser usada para validar el modelo obtenido (6).

El set de datos usado para entrenar la red debe cubrir todo el espacio de entrada esperado, usando el diseño de experimentos (6). Lo anterior indica que la señal excitadora debe ser tal, que parte de ella pertenezca al punto de operación deseado, una discusión detallada puede ser leída en (1)

Para identificar un sistema no lineal, usualmente las funciones de expansión son usadas, como en (17) donde  $g_k(\varphi)$  es el mapeo no lineal de  $R^d$  a  $R$  y  $\vartheta(k)$  representa las componentes de  $\vartheta$  (7).

$$g(\varphi, \vartheta) = \sum_k \vartheta(k) g_k(\varphi) \quad [17]$$

La mayoría de los modelos no lineales caja negra,  $g_k(\varphi)$  es obtenida a través de la parametrización de una función base (5), denotada por  $K(x)$ , como se muestra en [18].

$$g_k(\varphi) = K(\varphi, \beta_k, \gamma_k) = K(\beta_k(\varphi - \gamma_k)) \quad [18]$$

Las funciones base más usadas en modelos no lineales son la campana de Gauss, la sigmoide y la tangente hiperbólica, tal como se explica en [5].

Las redes neurales han sido usadas en varias aplicaciones, incluyendo la identificación de sistemas no lineales, éstas se obtienen usando una sigmoide o una tangente hiperbólica como función base.

Las redes feedforward y recurrentes son usadas comúnmente en la identificación de sistemas, en la primera, no existe un lazo cerrado entre la salida de la red y su entrada, en la segunda, algunas de las entradas para la red están conformadas de salidas pasadas de la red o un estado interno atrasado (7, 8).

Una red puede ser construida usando varias capas, en ese caso, la salida para la función base en [18], son colocadas en un vector, luego, las componentes serán tratadas como nuevos regresores e insertadas en otra capa de funciones base, formando una segunda expansión, tal como se explica en [5].

La determinación de cuantas capas usar, no es sencilla, sin embargo, se considera, explicado en [5] que una capa oculta es suficiente para modelar la mayoría de los sistemas.

Las estructuras lineales poseen una nomenclatura que asocia sus nombres con los regresores usados, entonces, es natural colocar nombres similares para el caso no lineal, debido a lo anterior, las siguientes familias de modelos se obtienen (5).

- Modelos NFIR: Usa solo entradas pasadas,  $u(t-k)$ , como regresores.

- Modelos NARX: los regresores usados son las entradas pasadas y las salidas pasadas,  $u(t-k)$  e  $y(t-k)$  respectivamente. Esta familia también se conoce como el modelo serie paralelo.

- Modelos NOE: Usa entradas pasadas y salidas predichas usando solamente entradas pasadas y la salida actual del modelo,  $u(t-k)$  e respectivamente, como regresores. También se conoce como el modelo paralelo.

- Modelo NARMAX: Emplea  $u(t-k)$ ,  $y(t-k)$  y  $\varepsilon(t-k) = y(t-k) - \hat{y}_u(t-k|\emptyset)$ , como regresores.  $\varepsilon_u(t-k)$  es también conocido como errores de predicción.

- Modelos NBJ: Usan  $u(t-k)$ ,  $\hat{y}(t-k|\emptyset)$ ,  $\varepsilon(t-k)$  y  $\varepsilon_u(t-k) = y(t-k) - \hat{y}_u(t-k|\emptyset)$  como regresores. El regresor  $\varepsilon_u(t-k)$  se conoce también como errores de simulación

- Modelos Espacio – Estado No lineal: Usa componentes pasadas como entradas virtuales, es decir, valores de las señales de los nodos internos de la red que no corresponden a la variable de salida. La diferencia principal entre éstos y los modelos

entrada – salida, es que los últimos contienen bloques del mismo regresor, desplazados en el tiempo. Los regresores espacio estado están menos restringidos en su estructura interna, lo cual implica que es posible obtener un modelo más eficiente con un menor número de regresores usando un modelo espacio estado (5).

Cada uno de los regresores tiene características que son transferidas a la red en la cual éstos son empleados.

Si  $u(t-k)$  son los únicos regresores usados, entonces, la respuesta dinámica debe ser cubierta usando exclusivamente entradas pasadas, por lo que el orden del modelo puede ser alta. La ventaja de este modelo es que no pueden ser inestables en simulación (5).

Añadir salidas pasadas a la lista de regresores, entonces, será posible cubrir respuestas lentas del sistema con un modelo de menor orden. Una desventaja es que la salida medida pasada introducirá perturbaciones al modelo. Un modelo basado en salidas pasadas puede ser inestable en la simulación solo desde la entrada, ya que la salida medida pasada será reemplazada por las salidas pasadas del modelo.

Como punto final, si las salidas simuladas o predichas son usadas, entonces la flexibilidad del modelo es aumentada, sin embargo, la red será recurrente, por lo que las siguientes situa-

ciones deberán ser tomadas en consideración:

1) La red puede ser inestable y por ser un modelo no lineal este problema no es fácil de monitorear.

2) El segundo problema reside en el algoritmo de estimación. La salida simulada/predicha, depende de  $\emptyset$ . Para actualizar los parámetros en la verdadera dirección del gradiente, la dependencia mencionada debe ser considerada, lo cual no es realizado de forma directa. Si la dependencia es ignorada, la convergencia al mínimo local de la función no puede ser garantizada.

Tomando en cuenta todos los ítems en referencia la selección de regresores, los modelos NARX deberían ser los primeros a ser probados (5).

## RESULTADOS

Con el propósito de establecer una relación causa – efecto entre el coeficiente de correlación, la gráfica de dispersión y la cantidad de ruido en la data con una estructura específica, lineal o no, tres set de datos fueron usados, los cuales son los siguientes:

- 1) Planta petroquímica Venezolana
- 2) Planta piloto de la Universidad de Montreal
- 3) Horno para procesos metal - mecánicos

En la Figura 2 las gráficas de la entrada – salida medida y el gráfico de dispersión para la planta petroquímica venezolana es mostrada.

En la Figura 3, la gráfica para las señales de entrada – salida y la dispersión de la planta piloto de la universidad de Montreal es

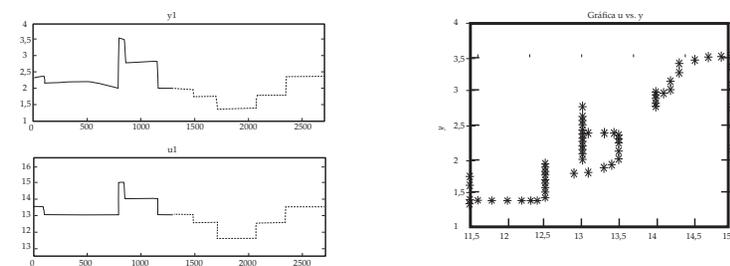


Figura 2. Planta petroquímica venezolana. En la figura izquierda se observan las señales de entrada – salida, la data de estimación en azul y la usada para validación en rojo. En la derecha la gráfica de dispersión. Una correlación positiva es observada, sin embargo, la forma en la figura es alejada de una línea recta, por lo que una correlación lineal no está presente, en su lugar, se tiene una figura similar a una función sigmoideal.

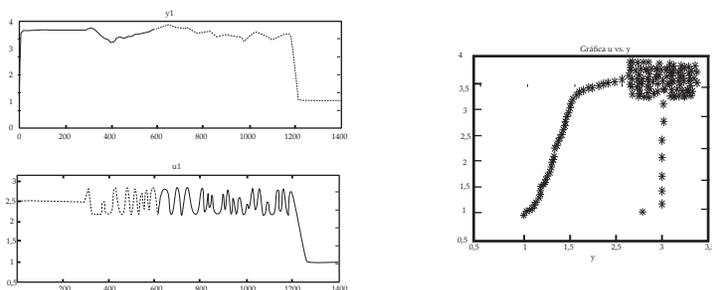


Figura 3. Planta piloto de la Universidad de Montreal. En la figura izquierda las señales de entrada – salida se observan, la data de estimación en azul y la de validación en rojo. En la derecha, el gráfico de dispersión. Una correlación positiva es observada, sin embargo, la forma es similar a una sigmoide por lo que, por lo que una correlación lineal no está presente.

mostrada.

Finalmente, en la Figura 4, la data de entrada – salida y la gráfica de dispersión para el horno de procesos metal – mecánicos es observado.

Dado el hecho que para la planta piloto y la petroquímica venezolana se tiene claramente una forma definida en la gráfica

de dispersión, es lógico asumir que la relación entre la entrada y la salida no es lineal, sin embargo, en el horno industrial, la figura no está definida. Al observar ésta data claramente se observa que el problema reside en el diseño de experimentos porque en los dos casos previos, la fase dinámica y estacionaria

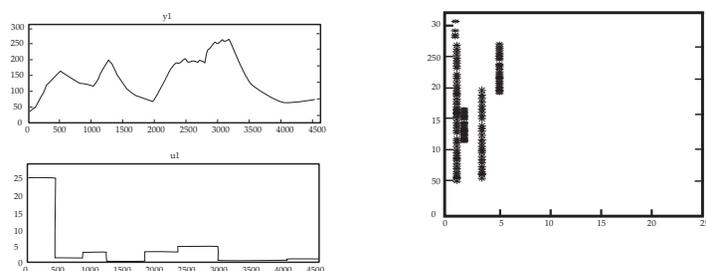


Figura 4. Horno Industrial para procesos metal mecánicos. En la izquierda, las señales de entrada – salida se observan, la data de estimación en azul y la validación en rojo. En la derecha la gráfica de dispersión. Contrario a las figuras previas, no existe una forma definida, por lo que una conclusión no pudo ser construida usando solamente la data disponible, por lo que un conocimiento previo del proceso deberá ser aplicado.

era diferenciada fácilmente, sin embargo, en el tercer caso, esa separación no se observa.

Las características de la data pueden ser resumidas en términos de ruido, coeficiente de correlación y gráfica de dispersión (Cuadro I)

Debe ser tomado en cuenta que para el horno industrial, para los modelos lineales, todo el set de datos fue usado para estimar el modelo, sin embargo, para el caso no lineal, la data se dividió en las porciones usuales de estimación y validación

Luego de estimar los modelos lineales y no lineales, los resultados pueden ser resumidos usando el orden del modelo, FPE y ajuste obtenido para la data de validación y estimación (Cuadro II).

Para los modelos no lineales mostrados en el Cuadro II, en

la planta petroquímica, una red neural de con dos unidades escondidas y función de activación lineal fue usada. En la planta piloto, la red tenía cuatro unidades ocultas con una función de activación de tipo tangente hiperbólica. Finalmente, para el horno industrial, la red tenía dos unidades ocultas con una función de activación lineal. En los tres casos, una función de activación lineal a la salida fue usada.

Si los resultados obtenidos en el II son tomados en cuenta, entonces para sistemas con poco ruido en su entrada o salida, entonces la estructura NARX debería ser usada, lo cual está en concordancia con lo indicado por Ljung.

De igual forma, en la fase del diseño de experimentos, es importante que el sistema llegue a

CUADRO I

CARACTERÍSTICAS DE LOS SETS DE DATOS USADOS

| Proceso  | Número de Muestras |      |      | Data Experimental |        |                         |      | Gráfico Dispersión |
|--|--------------------|------|------|-------------------|--------|-------------------------|------|--------------------|
|  | Total              | Est  | Val  | Input             | Output | Coeficiente Correlación |      |                    |
|  |                    |      |      |                   |        | Est                     | Val  |                    |
| Planta petroquímica Venezolana                 | 2700               | 1300 | 1400 | Poco              | Poco   | 0,96                    | 0,98 | Sigmoide           |
| Planta piloto de la Universidad de Montreal    | 1395               | 786  | 609  | Poco              | Poco   | 0,92                    | 0,16 | Sigmoide           |
| Horno industrial para procesos metal mecánicos | 4400               | 4400 | 4400 | Poco              | Poco   | -0,2                    | 0,53 | N/A                |
|  |                    | 2720 | 1600 |                   |        |                         |      |                    |

**CUADRO II**  
AJUSTE DE MODELOS LINEALES Y NO LINEALES

| Proceso  | Modelo Estimado |       |    |    |    |    |    |         |          |      |
|--|-----------------|-------|----|----|----|----|----|---------|----------|------|
|  | Estructura      | Orden |    |    |    |    |    | FPE     | Data Fit |      |
|  |                 | na    | nb | nc | nd | nf | nk |         | Est      | Val  |
| Planta petroquímica Venezolana                 | ARX             | 4     | 4  | -  | -  | -  | 3  | 4,1E-05 | 52,93    | 78,8 |
|  | ARMAX           | 1     | 5  | 1  | -  | -  | 3  | 1,0E-04 | 55,5     | 78,7 |
|  | OE              | -     | 1  | -  | -  | 1  | 3  | 5,9E-03 | 79,5     | 56   |
|  | BJ              | -     | 1  | 2  | 1  | 4  | 3  | 6,7E-05 | 59       | 82,2 |
|  | NARX            | 1     | 2  | -  | -  | -  | 3  | 9,6E-05 | 92,7     | 96,2 |
| Planta piloto de la Universidad de Montreal    | ARX             | 1     | 6  | -  | -  | -  | 0  | 3,2E-04 | 63,4     | 48,6 |
|  | ARMAX           | 1     | 10 | 3  | -  | -  | 0  | 2,2E-05 | 55,7     | 73,9 |
|  | OE              | -     | 1  | -  | -  | 6  | 0  | 6,8E-02 | 79,2     | 33,3 |
|  | BJ              | -     | 1  | 3  | 5  | 6  | 0  | 6,9E-06 | 69,55    | 66,4 |
|  | NARX            | 1     | 3  | -  | -  | -  | 0  | 1,4E-05 | 99,4     | 76,6 |
| Horno industrial para procesos metal mecánicos | ARX             | 4     | 4  | -  | -  | -  | 1  | 3,9E-04 | 64,83    |      |
|  | ARMAX           | 2     | 2  | 2  | -  | -  | 1  | 8,7E-04 | 69,78    |      |
|  | OE              | -     | 2  | -  | -  | 2  | 1  | 2,7E+03 | 71,83    |      |
|  | BJ              | -     | 2  | 2  | 2  | 2  | 0  | 7,6E-04 | 72,99    |      |
|  | NARX            | 1     | 2  | -  | -  | -  | 0  | 5,2E-01 | 97,5     | 98,7 |

su estado estacionario, debido a que es en ese punto en donde la medida permitirá establecer si el proceso tiene o no un comportamiento no lineal, y la forma de éste.

**CONCLUSIONES**

De acuerdo con los resultados obtenidos, es posible determinar las siguientes conclusiones basándose en los objetivos de la investigación.

El coeficiente de correlación lineal no es capaz de establecer el verdadero grado de relación entre las variables, por lo que el

gráfico de dispersión debe ser usado como complemento, asimismo, éste puede ser empleado para ver la forma de la no linealidad del proceso.

En concordancia, la forma observada en el gráfico de dispersión puede ser usada para establecer si el tipo de estructura a usar será lineal o no. En los primeros dos set de datos analizados, se observó una figura sigmoideal, en ambos casos, una red neural tuvo que ser usada para modelar el sistema debido a que las estructuras lineales no entregaron un resultado aceptable, por lo que si una línea recta

se obtiene, modelos lineales deberán ser usados.

Como resultado, cuando un gráfico de dispersión es usado, la selección del tipo de modelo a aplicar puede ser realizada en una forma más exacta y directa. En concordancia, cuando la figura observada difiera de una línea recta, es poco probable que una estructura de modelo lineal represente el sistema apropiadamente.

Sin embargo, debe ser indicado que el gráfico de dispersión es útil solamente si la variable es rápida o si el sistema ha llegado al punto de estabilización, por lo que cuando se diseñe un experimento, es conveniente que el sistema llegue al estado estacionario. Esto puede observarse en la data que pertenece al horno, donde la figura del la gráfica no indica que el sistema puede ser modelado usando redes neurales, como resultado, conocimiento previo del proceso tuvo que ser empleado, en este caso, un dispositivo que no permite la temperatura del horno elevarse mas allá de un valor específico. Por esa razón, toda la información del sistema que pueda ser obtenida tiene una gran importancia durante la etapa de mo-

delado.

Como punto final, es importante indicar que los regresores usados están relacionados, tal como en el caso lineal, con la cantidad de ruido en la data, por lo que es lógico que los tres sets de datos pudiesen ser modelados con una estructura NARX, dado el hecho que las perturbaciones en las señales de entrada – salida eran pequeñas.

De acuerdo a los criterios establecidos (1), estructuras como ARX o ARMAX deberían ser empleadas cuando la data tiene poco ruido o cuando éstas ingresan en una etapa temprana, la primera indica una buena relación señal – ruido, mientras que la segunda implica el origen de la perturbación a la entrada.

En concordancia, las estructuras OE y Box Jenkins deberían ser usadas en aquellos casos donde el ruido entra en el proceso en una etapa tardía, como perturbaciones en la salida.

Considerando que el modelo solamente indicará parte de la realidad, el diseñador debe tener un punto de vista crítico, porque las expresiones matemáticas nunca serán verdaderas o correctas, solamente pueden ser una aproximación del sistema.

**LITERATURA CITADA**

- (1) Ljung L. y T. Glad. 1994. Modeling of Dynamic Systems. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- (2) Jonson R., Elemental Statistic. 1990. Iberoamerica, Federal District, Mexico, pp. 456-485.

- (3) Freund J. y G. Simon, Elemental Statistic. Prentice Hall, Mexico, 1994, pp. 458-514.
- (4) Ljung L. 2005. System Identification Toolbox: User's Guide. The Mathworks, Inc. 7th Ed., Natick, MA
- (5) Sjöberg J., Q. Zhang, L. Ljung, A. Benveniste, B. Deylon, P. Glorennec, H. Hjalmarsson, A. Juditsky. 1995. Nonlinear Black-box Modeling in System Identification: A Unified Overview. Automatica, vol. 31 n° 12, pp 1691-1724.
- (6) Freeman J. 1993. Neural Networks: Algorithms, applications, and programming techniques. Addison-Wesley Iberoamericana, USA. pp. 93-131.
- (7) Sjöberg J., H. Hjalmarsson y L. Ljung. 1994. Neural Networks in System Identification. Proc. 10th IFAC Symposium on System Identification (SYSID'94), pp. 49-72.
- (8) Norgaard M. 1997. Neural Network Based System Identification Toolbox. Tech. Report. 97-E-851, Department of Automation, Technical University of Denmark.

## Síntesis de un controlador LQR difuso

Synthesis of a fuzzy controller LQR

*Hanna Aboukheir\**

### Resumen

Desde hace algunos años la creciente complejidad de los procesos industriales requiere de un avance en las técnicas de control hasta ahora utilizadas, diferentes propuestas han sido hechas, pero en el área de procesos el control óptimo es la punta de lanza en técnicas avanzadas de control. En este trabajo se realiza el estudio de un controlador LQR sintonizado mediante el uso de la lógica difusa y su aplicación sobre una planta real ubicada en un parque industrial, resaltando su efectividad sobre las estrategias de control hasta ahora utilizadas sobre este proceso.

**Palabras Clave:** control óptimo, lógica difusa, columna destiladora.

Recibido el 16/02/09. Aceptado el 10/07/09  
Autor para correspondencia: e-mail: hanna2k2@hotmail.com

\*\* Universidad "Rafael María Baralt", Programa Ingeniería y Tecnología UNERMB. Ciudad Ojeda.

## Abstract

Since few years ago, the growing complexity of industrial process requires an advance on the control techniques previously used, different approximations have been made, but in process control, the optimal control its above other methodologies, in this work, an LQR controller is tuned using Fuzzy Logic, evaluating the proposed strategy on a real plant located on one industrial field, revealing its effectiveness over the control strategies used on the process before.

**Key words:** optimal control, fuzzy logic, distillation column.

## INTRODUCCIÓN

Con el uso creciente de la informática, visión, robótica, los sistemas distribuidos para procesamiento de la información, las redes de sensores virtuales, se ha incentivado el estudio y diseño de sistemas complejos de producción como son los procesos de manufactura. Esto ha planteado un conflicto de paradigmas en el modelado, así como el control de sistemas industriales, específicamente en el uso de técnicas basadas en modelos matemáticos, al igual que los métodos basados en inteligencia artificial.

El objetivo de este trabajo consiste en desarrollar una arquitectura de control LQR Difuso en el cual se mezclan las metodologías de diseño de un controlador LQR basado en Programación Dinámica y la Lógica Difusa. De esta manera la ley de control óptima de la planta, no necesariamente lineal y estable, se realiza en dos etapas:

- Partiendo de un modelo Li-

neal (o linealizado) se construye el controlador LQR nominal que estabilice el lazo retroalimentado.

- Se emplea una red difusa para construir el controlador partiendo de los parámetros obtenidos por el LQR nominal.

## Formulación del problema de control óptimo

Primeramente, se considera una planta SISO lineal, invariante en el tiempo, descrita por la siguiente representación en el espacio de estados:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du\end{aligned}$$

Dicha representación se discretiza utilizando un período de muestreo  $T$  no patológico, convirtiendo la representación en:

$$\begin{aligned}x(kT + 1) &= \Phi x(kT) + \Gamma u(kT) \\ y(kT) &= Cx(kT)\end{aligned}$$

Considerando los pares  $(\Phi, \Gamma)$  controlable y  $(\Phi, C)$  observable; se desea construir un controlador óptimo para la planta SISO

anteriormente descrita.

El criterio de diseño a utilizar es una manera de medir la magnitud de los estados y de las señales de control. Una manera es evaluando la potencia de los estados:

$$E_{tot} = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt$$

Al discretizar se tiene la energía total del equivalente discreto:

$$E_{tot} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x(kT)|^2$$

Cuyos valores deben ser finitos; se sabe que una norma cuadrática puede descomponerse en las siguientes matrices hermiticas:

$$E_{tot} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(kT)^T Q x(kT)$$

Por razones de conveniencia, de aquí en adelante se omiten los subíndices asumiendo, que se trabajará en el dominio discreto, según (1) es posible que los vectores  $x$  necesiten un ajuste, a través de una  $Q$  que se considera definida positiva (2):

$$E_{tot} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(kT)^T Q x(kT)$$

Pero no solamente interesa penalizar los estados, sino también la señal de entrada  $u$ , entonces la ecuación de la energía se transforma en:

$$E_{tot} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (x^T Q x + u^T R u)$$

Donde  $R$  al igual que  $Q$  son factores de ajuste seleccionados por el diseñador.

Se desea que el controlador

óptimo logre proporcionar estabilidad asintótica mediante la regulación de la energía en el sistema, por lo que se procede a construir una función de Lyapunov a partir de la señal de la energía:

$$V(x) = x(kT)^T P x(kT)$$

$$x(kT + 1) = \Phi(xT)$$

$$\Delta V = x(kT + 1)^T P x(kT + 1) - x(kT)^T P x(kT)$$

Se selecciona una funcional de costo  $J$  con una  $Q$  definida positiva:

$$J = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(kT)^T Q x(kT)$$

Y se iguala a la función de Lyapunov que se ha seleccionado:

$$-x(kT)^T Q x(kT) = x(kT)^T \Phi^T P \Phi x(kT) - x(kT)^T P x(kT)$$

La función de Lyapunov será entonces:

$$\Phi^T P \Phi - P + Q = 0$$

**Teorema 1:** Un sistema  $G(z)$  descrito en variables de estado según:

$$x(kT + 1) = \Phi x(kT) + \Gamma u(kT)$$

$$y(kT + 1) = Cx(kT)$$

Y cuya entrada es una señal impulso, será estable en el sentido de Lyapunov si y solo si, para una  $Q$  definida positiva existe una  $P$  única y definida positiva que se encuentra descrita por:

$$\Phi^T P \Phi - P + Q = 0$$

La función de Lyapunov pre-

sentada anteriormente permite evaluar la estabilidad de un sistema cuando su entrada es una señal impulso, esto es, evaluar la respuesta natural del sistema, pero es evidente, que los sistemas en la realidad no se encuentren sometidos a señales impulso solamente, y este planteamiento es posible traducirlo a señales de entrada distintas a la señal impulso.

Primeramente se considera la funcional de costo donde se penalizan los estados:

$$J = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (x^T Qx + u^T Ru)$$

Igualmente se plantea una función de Lyapunov del sistema:

$$V(x) = x(kT)^T P x(kT) + x(kT + 1)^T \Phi x(kT)$$

$$\Delta V(x) = x(kT + 1)^T P x(kT + 1) - x(kT)^T P x(kT)$$

Se sustituyen ambos términos por la funcional de costo y el modelo en variables de estado:

$$-x(kT)^T Q x(kT) - u(kT)^T R u(kT) = [\Phi x(kT) + \Gamma u(kT)]^T P [\Phi x(kT) + \Gamma u(kT)] - x(kT)^T P x(kT)$$

A partir de este momento se eliminan los subíndices porque es evidente que se trabaja en el dominio discreto:

$$-x^T Qx - u^T Ru = x^T \Phi^T P \Phi x + x^T \Phi^T P \Gamma u + u^T \Gamma^T P \Phi x + u^T P \Gamma u - x^T P x$$

Luego, reorganizando:

$$-x^T (-Q + P - \Phi^T P \Phi) x = u^T (R +$$

$$\Gamma^T P \Gamma) u + u^T \Gamma^T P \Phi x + x^T \Phi^T P \Gamma u$$

Es evidente, que por el Teorema # 1, el término a la izquierda de la igualdad es exactamente igual a cero (Función de Lyapunov), luego queda:

$$u^T (R + \Gamma^T P \Gamma) u + u^T \Gamma^T P \Phi x + x^T \Phi^T P \Gamma u = 0$$

Si ahora, esta expresión se deriva en forma parcial por los elementos  $u, x$  los siguientes resultados son válidos:

$$\frac{\partial}{\partial x} = \Phi^T P \Gamma u + \Phi^T P \Gamma u = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial u} = 2(R + \Gamma^T P \Gamma) u + 2\Gamma^T P \Phi x = 0$$

De donde, al despejar  $u$ , es posible obtener la ley de control óptima por realimentación de las variables de estado:

$$u = (R + \Gamma^T P \Gamma)^{-1} \Gamma^T P \Phi x$$

Donde  $P$  es una matriz definida positiva, resultado de la solución de la ecuación de Ricatti:

$$P = Q + \Phi^T P \Phi - \Phi^T P \Gamma (R + \Gamma^T)^{-1} \Gamma^T P \Phi$$

**Teorema 2:** Un sistema  $G(z)$  descrito en variables de estado según:

$$x(kT + 1) = \Phi x(kT) + \Gamma u(kT) \\ y(kT) = Cx(kT)$$

Y cuya entrada es una señal distinta al impulso, será estabilizada en el sentido de Lyapunov si y solo si, para una  $Q$  y  $R$  definida positiva existe una  $P$  única y definida positiva que se

encuentra descrita por:

$$P = Q + \Phi^T P \Phi - \Phi^T P \Gamma (R + \Gamma^T)^{-1} \Gamma^T P \Phi$$

Y en cuyo caso genere una ley de control óptima por realimentación de las variables de estado descrita por:

$$u = -(R + \Gamma^T P \Gamma)^{-1} \Gamma^T P \Phi x$$

En la deducción de la ley de control se utiliza el principio de optimalidad y programa-

ción dinámica. El principio de optimalidad establece que una estrategia óptima tiene la propiedad de que indiferentemente el estado inicial y la decisión inicial se mantengan, entonces las decisiones siguientes deben ser óptimas con respecto al estado resultante de la primera decisión (3).

Con esto en mente se considera la siguiente escala de tiempo:

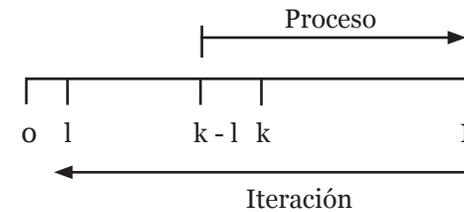


Figura 1. Obtención de la Ley de Control Óptimo.

Con base a esto se parte de un tiempo  $N$  y se retrocede en el tiempo, es posible determinar la mejor ley de control para el paso  $N$  independientemente de cómo el estado  $N-1$  fue alcanzado, iterando de esta manera se puede obtener la ley de control óptima formalizada en el teorema anterior.

### 1. Subproblemas de control óptimo.

La ley de control óptimo basado en la solución de una ecuación de Ricatti permite resolver una diversidad de problemas de control, entre los que destaca, el

problema de regulación, el problema de seguimiento al estado y el problema de rechazo a perturbaciones los cuales se enumeran a continuación:

- **Problema de Regulación:** El problema de regulación consiste en generar una ley de control que lleve el estado a cero óptimamente cuando su entrada es un impulso de Dirac (Figura 2).

Donde la ley de control es

$$L = (R + \Gamma^T P \Gamma)^{-1} \Gamma^T P \Phi$$

- **Problema de Seguimiento al Estado:** El problema de seguimiento al estado consiste en parametrizar un estado deseado

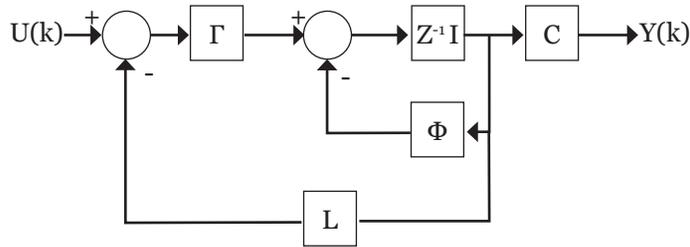


Figura 2. Esquema del Problema de Regulación

el cual la ley de control óptima debe seguir asintóticamente, para ello considera la siguiente representación en variables de estado donde es incluido el estado deseado, esto es:

$$x_d(kT + 1) = \Phi x_d(kT)$$

El cual se incluye en el modelo de la planta original:

$$x(kT + 1) - x_d(kT + 1) = \Phi[x_d(kT) - x(kT)]$$

Y en la funcional de costo:

$$J = \sum_{n=-\infty}^{\infty} ([x - x_d]^T Q [x - x_d] + u^T R u)$$

Ahora, para resolver este problema se transforma en un problema de regulación a través de la sustitución:

blema de regulación a través de la sustitución:

$$\xi(kT + 1) = x(kT + 1) - x_d(kT + 1)$$

$$\xi(kT) = x(kT) - x_d(kT)$$

Donde el modelo de la planta estaría descrito por:

$$\xi(kT + 1) = \Phi \xi(kT) - \Gamma u(kT)$$

Y la funcional de costo por:

$$J = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (\xi^T Q \xi + u^T R u)$$

La solución de la ecuación de Ricatti sería exactamente igual a la ley de control es:

$$u = -L \xi(k) = -R + \Gamma^T P \Gamma^T P \Phi \xi(k)$$

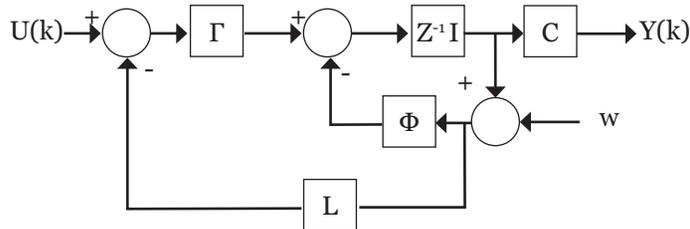


Figura 3. Esquema del Problema de Seguimiento al Estado.

• *Rechazo a Perturbaciones* res tipo PI en la industria lleva o *PI-Óptimo*: El uso universalmente aceptado de controlado-

res tipo PI en la industria lleva a construir una representación equivalente de este esquema de

control utilizando la teoría de control óptimo, con el fin de seleccionar las ganancias del controlador óptimas se considera la siguiente equivalente en el espacio de estados

$$\begin{aligned} x(kT + 1) &= \Phi_E x(kT) + \Gamma_E u(kT) \\ y(kT) &= C_E x(kT) \end{aligned}$$

Donde:

$$\Phi_E = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C^* A & 1 \end{bmatrix}$$

$$\Gamma_E = \begin{bmatrix} \Gamma \\ -C^* \Gamma \end{bmatrix}$$

Estos parámetros en el espacio de estados equivalentes son obtenidos a partir de la Perturbaciones original. Partiendo de esto y basados en el Teorema 1 y 2 se construye una nueva ecuación de Ricatti para el problema de Rechazo a Perturbaciones:

$$P_E = Q_E + \Phi_E^T P_E \Phi_E - \Phi_E^T P_E \Gamma_E (R_E + \Gamma_E^T P_E \Gamma_E)^{-1} \Gamma_E^T P_E \Phi_E$$

$$+ \Gamma_E^T P_E \Gamma_E)^{-1} \Gamma_E^T P_E \Phi_E$$

De donde es posible obtener la siguiente ley de control óptima para el caso de Rechazo a Perturbaciones:

$$u = -Lx$$

Donde:

$$L = (R_E + \Gamma_E^T P_E \Gamma_E)^{-1} \Gamma_E^T P_E \Phi_E$$

Donde la ley de control óptima  $L$  obtenida se divide en lo siguiente:

• La ley de control óptima de Realimentación de Variables de Estado:

$$Lr = [L_1 \dots L_{n-1}]$$

• La ley de control óptima del integrador

$$Li = -L_n$$

Siendo  $n$  la longitud del vector de control  $L$ , visto en forma esquemática el esquema de control es el siguiente:

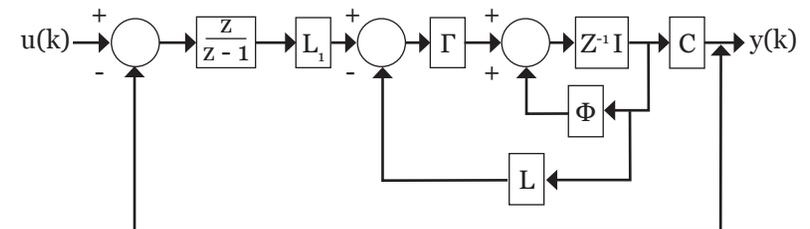


Figura 4. Esquema del Problema de Rechazo a Perturbaciones.

**2. Control LQR difuso**

EL caso particular de estudio se concentra en el controlador LQR para el subproblema de rechazo a perturbaciones, ya que este caso es el mas cercano a las aplicaciones utilizadas en la industria, sin embargo, proveer de una ley de control óptima a veces requiere de señales de control extremadamente fuertes que la dinámica de los actuadores por lo general no pueden seguir, se plantea entonces el uso de un controlador difuso integrado a la estructura del LQR para no solamente proveer señales de control físicamente realizables sino también de generalizar la aplicación de este esquema de control cuando la planta es no lineal.

La idea de acoplar el controlador difuso al LQR es que por su parte este no puede trabajar cuando la dinámica inversa de la planta es inestable (5), por lo que el LQR se encargaría de estabilizar la planta a lazo cerrado y el esquema difuso cumpliría los objetivos óptimos propuestos para el control.

Se toma como punto de partida una metodología (4), donde se propone una técnica para entonar controladores PID Difusos a partir de la entonación del controlador PID nominal, en este caso partiendo del LQR Nominal para el caso de rechazo a perturbaciones, la ganancia de retroalimentación  $L$  se man-

tiene exactamente igual puesto es la encargada de estabilizar la planta por la realimentación de las variables de estado, en cambio, la Ganancia Integral  $L_i$  del controlador LQR puede expresarse en términos difusos como:

$$u_n = [u_{ij} - u_{(i+1)j} - u_{i(j+1)} + u_{(i+1)(j+1)}] \mu_A \mu_B + [u_{(i+1)} - u_{(i+1)(j+1)}] \mu_A + [u_{(i+1)j} - u_{(i+1)(j+1)}] \mu_B + u_{(i+1)(j+1)}$$

donde:

$$\mu_A = 1 - \frac{e(k) - e_i}{\Delta_j}$$

Siendo  $e_j$  el centro del conjunto difuso  $A$  de la variable de entrada normalizada  $e(k)$  y  $e_j$  el centro del conjunto difuso  $B$  de la variable de entrada normalizada  $e(k - 1)$ , es la diferencia resultante del intervalo  $[e(k), e(k) \pm \varepsilon]$  con  $\varepsilon$  cualquier valor menor al soporte especificado de la entrada  $e(k)$ ,  $\Delta_j$  corresponde al intervalo  $[e(k - 1), e(k - 1) \pm \lambda]$  con  $\lambda$  cualquier valor menor al soporte de  $e(k - 1)$ . Las funciones de membresía aquí planteadas pueden apreciarse en la Figura 5.

Con todo esto en mente, la expresión que representa al controlador LQR difuso será entonces:

$$u(k) = -Lx(kT) + f_{ld} \left[ M_i e(kT) + \sum_{n=-\infty}^{\infty} M_n e(kT - 1) \right]$$

es de hacer notar que si el sistema es multivariable como es el caso aquí planteado, existirán

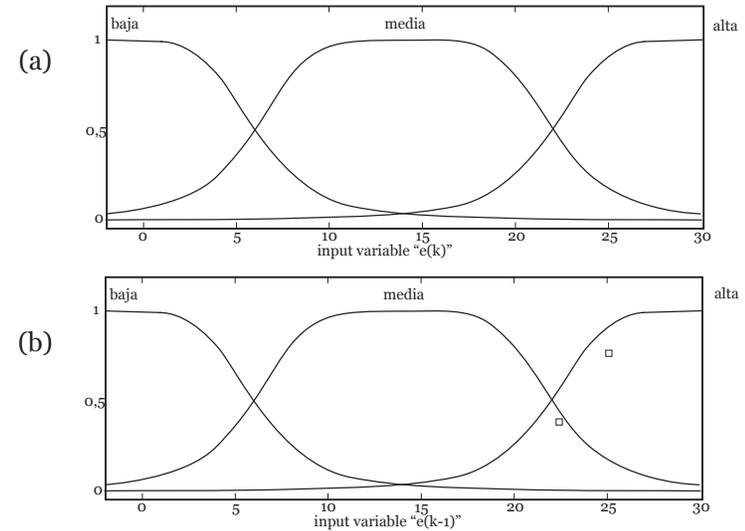


Figura 5. Funciones de membresía (a)  $e(k)$  (b)  $e(k-1)$ .

tantas señales de control  $u(kT)$  como estados controlables/observables existan en el sistema.

El siguiente paso consiste en declarar las reglas que permitirán al controlador difuso realizar la inferencia de la ley de control

sujeta a las señales de error y a los pesos de ajuste previamente presentados. La superficie solución producto de las inferencias dicha superficie es presentada a continuación:

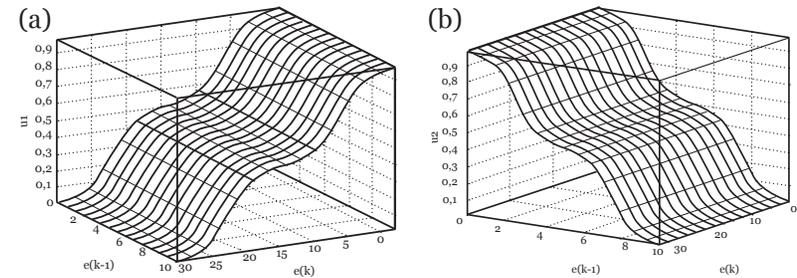


Figura 6. Superficie de Solución (a) Salida  $u_1$  (b) Salida  $u_2$ .

Siendo las reglas de inferencia que permiten generar esta superficie basadas en el conjunto

de reglas presentadas por (4) y la cual se muestran a continuación, esta tabla es construida

para cada estado observable/controlable:

**CUADRO I**  
REGLAS DE INFERENCIA

| e(kT) | e(kT-1) | U <sub>n</sub> (kT) |
|-------|---------|---------------------|
| baja  | baja    | Alta                |
| baja  | media   | Alta                |
| baja  | alta    | alta                |
| media | baja    | media               |
| media | media   | media               |
| media | alta    | media               |
| alta  | baja    | baja                |
| alta  | media   | baja                |
| alta  | alta    | baja                |

El esquema de implementación de un controlador LQR difuso para el rechazo de perturbaciones se puede visualizar a continuación en la Figura 7.

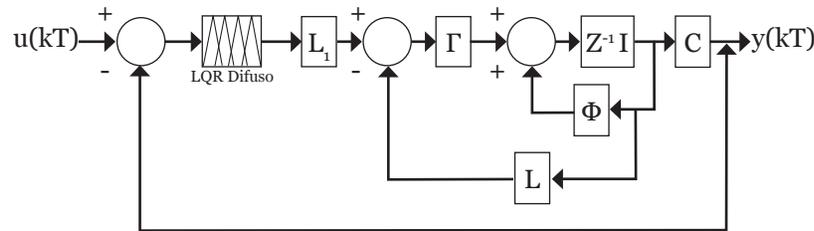


Figura 7. LQR difuso.

3. Aplicación de la metodología sobre la planta de estudio

La planta a estudiar es una columna de destilación binaria de la cual posee 2 entradas (reflujo  $u_1$  y tasa de cocción  $u_2$ ) y 2 salidas (Impurezas de tope  $y_1$  y fondo  $y_2$ ). (Figura 8)

A lazo abierto la planta estabiliza en 150 lb y 40 lb de oxígeno respectivamente, resultados que pueden ser obtenidos a través de un modelo lineal identificado

experimentalmente a partir de los datos medidos directamente del proceso especificando el rango óptimo de operación de la planta entre 30 lb y 10 lb.

Mediante el uso de la técnica de identificación de subespacios se obtiene un modelo de la planta multivariable a lazo abierto con una cota de error máxima de  $10^{-2}$  el cual se encuentra descrito por la siguiente representación en espacios de estado con

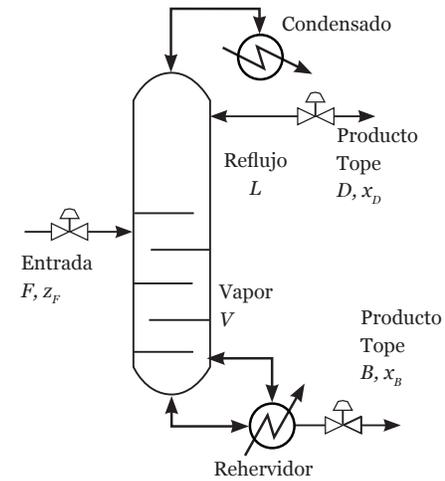


Figura 8. Columna de Destilación.

un período de muestreo igual a 1 seg:

$$x(kT + 1) = \begin{bmatrix} 0,02 & 0,54 & -0,24 \\ -0,17 & -0,34 & 0,47 \\ -0,37 & -0,46 & 0,48 \end{bmatrix} x(kT) + \begin{bmatrix} -1,90 & -0,05 \\ -11,07 & -0,01 \\ -2,56 & 0,0092 \end{bmatrix} u(kT)$$

$$y(kT) = \begin{bmatrix} -0,6905 & -0,3099 & -0,4643 \\ -0,2460 & 0,0535 & 0,0086 \end{bmatrix} x(kT)$$

Se procede a diseñar el controlador LQR correspondiente a un subproblema de rechazo a perturbaciones, partiendo de la ecuación de estado auxiliar la cual posee la forma siguiente:

$$\xi(kT + 1) = \begin{bmatrix} \Phi & 0 \\ -C\Phi & 1 \end{bmatrix} \xi(kT) + \begin{bmatrix} \Gamma \\ -C\Gamma \end{bmatrix} w(kT)$$

Esto sería: para el caso particular de estudio

$$\xi(kT + 1) = \begin{bmatrix} 0,02 & 0,54 & 0,24 & 0 & 0 \\ -0,17 & -0,34 & 0,47 & 0 & 0 \\ -0,37 & -0,46 & 0,48 & 0 & 0 \\ -0,21 & 0,054 & -0,2432 & 1 & 0 \\ 0,0171 & 0,1548 & -0,0798 & 0 & 1 \end{bmatrix} \xi(kT) + \begin{bmatrix} -1,90 & -0,05 \\ -11,07 & -0,01 \\ -0,56 & 0,0092 \\ -5,92 & -0,02 \\ 0,14 & -0,012 \end{bmatrix} w(kT)$$

De donde se obtiene a través del LQR nominal las ganancias del controlador por rechazo a perturbaciones:

$$L = \begin{bmatrix} 0,02337 & 0,0128 & 0,0069 \\ -0,0652 & -0,2920 & 0,0473 \end{bmatrix}$$

$$Li = \begin{bmatrix} -0,0520 & -0,0049 \\ -0,2165 & -0,5489 \end{bmatrix}$$

La respuesta ante la referencia de 30 lb y 10 lb respectivamente del LQR nominal se presenta a continuación:

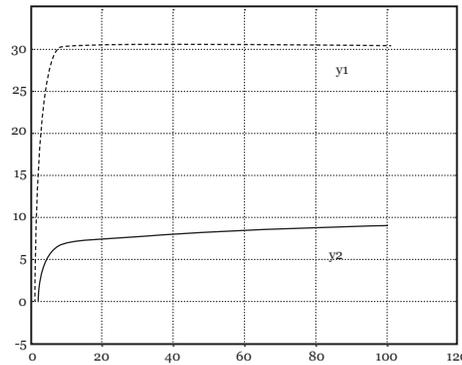


Figura 9. Respuesta al escalón del controlador nominal.

Donde es posible apreciar que el controlador óptimo consigue regular la planta y llevarla a la referencia luego de 100 segundos de la simulación para el caso de la salida  $y_2$ , se plantea entonces mejorar este desempeño al incluir el controlador difuso dentro del esquema de control LQR.

Ahora introduciendo el Controlador Difuso y tomando como punto de partida los valores obtenidos de  $Li$  se procede a seleccionar los nuevos valores del controlador difuso obteniendo los siguientes:

$$Lfi = \begin{bmatrix} 0,4 & 0 \\ 0 & 97 \end{bmatrix}$$

La respuesta a la referencia previamente presentada del sistema a lazo cerrado con el LQR difuso puede visualizarse en la Figura 10, donde son alcanzados los criterios de desempeño requeridos previamente en un tiempo muy inferior al obtenido con el LQR nominal, ofreciendo una respuesta al régimen permanente en un tiempo mínimo garantizando la mejor ley de control posible ante una entrada dada y garantizando la estabi-

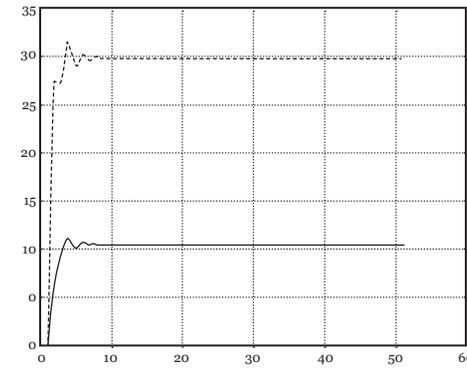


Figura 10. Planta con LQR Difuso.

lidad asintótica del proceso en todos los instantes de su funcionamiento.

### CONCLUSIONES

Se ha presentado una metodología para el diseño de controladores LQR Difusos aplicados

a Procesos Multivariables, los cuales logran generar secuencias de control estabilizantes que pueden ser seguidas por los actuadores encontrados en la industria, a juicio del autor se estudia la mejora de esta metodología mediante el uso de un controlador  $H_\infty$ .

### LITERATURA CITADA

- (1) Wittenmark A. 1997. Computer Controlled Systems Prentice Hall.
- (2) Moore A. 1970. Optimal Control. Linear Quadratic Methods, Prentice Hall.
- (3) Doyle, J., G. Keith, K. Pramod, F. Bruce A. 1989. State Space Solutions to Standard  $H_2$  and  $H_\infty$  control problems. IEEE Transactions on Automatic control. 34 (8) pp. 831-847.
- (4) Jantzen. 1998. Tuning on Fuzzy PID Controllers. Technical University of Denmark, Department of Automation, Bldg 326, DK-2800 Lyngby, Denmark. Tech. report no 98-H 871 (fpid).
- (5) Abonyi J. 2003. Fuzzy Model Identification for Control. Edit. Birkhauser, Boston.

## Aplicación del método de diagrama de coeficientes al levitador magnético

Application of coefficient diagram method to magnetic levitator

Luis Colmenares\*, Pedro Teppa\*\*

### Resumen

En este trabajo se diseña un sistema de control basado en el Método del Diagrama de Coeficientes para un sistema de levitación magnética, partiendo de su modelo continuo, empleando el enfoque de Ajuste de Modelos. Se estudia el comportamiento del control implementado, y se evalúa su desempeño en la solución del problema de seguimiento y de rechazo simultáneo, por medio de una estructura de control con dos grados de libertad.

**Palabras clave:** método del diagrama de coeficientes, ajuste de modelos, levitador magnético, control algebraico.

Recibido el 20/02/09. Aceptado el 10/07/09  
Autor para correspondencia: e-mail: pteppa@usb.edu.ve

\* Departamento de Ingeniería, EDELCA.

\*\* Departamento de Procesos y Sistemas, Universidad Simón Bolívar.

### Abstract

In this paper we design a control system based on Coefficient Diagram Method for a magnetic levitation system, based on their continuum model, using the model matching approach. We study the behavior of the control implemented, and evaluated its performance in solving the problem of monitoring and simultaneous rejection, through a control structure with two degrees of freedom.

**Key words:** coefficient diagram method, fitting models, magnetic levitator, algebraic control.

### INTRODUCCIÓN

La respuesta temporal de un sistema esta determinado principalmente por sus polos, por ello en la literatura se describen distintos métodos para asignar en posiciones convenientes los polos a lazo cerrado de los sistemas. Sin embargo, algo que se omite frecuentemente en esos métodos es cómo encontrar esas "posiciones convenientes" de los polos para el sistema en lazo cerrado. El Método del Diagrama de Coeficientes (MDC) afronta este problema determinando directamente un polinomio característico para el sistema a lazo cerrado, después de seleccionar algunos parámetros de diseño (11,12)

El MDC ha sido usado exitosamente en muchas aplicaciones. Se propuso un diseño de MDC para lograr una buena respuesta al escalón en un cambio de referencia de un proceso con gran tiempo muerto (4). Se ha desarrollado un controlador MDC para un sistema caó-

tico (5). También presentaron un procedimiento para diseñar controladores de ciertos tipos de sistemas no lineales empleando el MDC (6). Sistemas con gran incertidumbre han sido estudiados también en el contexto del MDC (7), desarrollaron un MDC basado en modelos y Ócal y se ha extendido el MDC para manejar sistemas haciendo una asignación robusta de sus polos (13).

El MDC es básicamente un método de asignación de polos. Cuando se habla de asignación de polos tradicionalmente solo se especifican los polos, con lo cual se introducirán ceros sobre los cuales no se tiene ningún control.

En la perspectiva de igualación de modelos, (1, 2), se necesita encontrar una configuración de realimentación y compensación tal que la función de transferencia desde la entrada de referencia hasta la salida controlada iguale una función de transferencia deseada. En la igualación de modelos, no solo

se especifican los polos, sino también los ceros. Por ello, la igualación de modelos debe considerarse como una estrategia de asignación de polos y ceros y debe, por tanto, conducir a un mejor diseño.

El propósito de este trabajo es usar el MDC y la igualación de modelos como método de diseño para implementar una adecuada función de transferencia en un sistema no lineal (Diseño lineal – Simulación no lineal), y luego implementarla mediante la asignación simultánea de polos y ceros.

El artículo se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se describe el sistema de levitación magnética a emplear en el estudio. La sección 3 describe las nociones básicas del MDC. En la sección 4 se trata sobre la igualación de modelos y las condiciones necesarias para su realización. Finalmente, en la

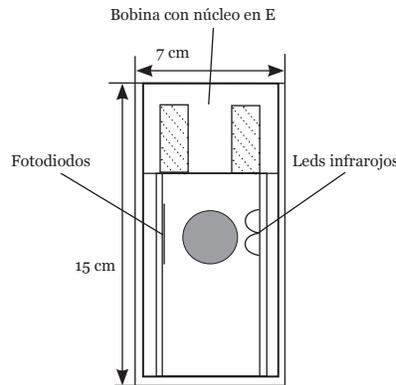
sección 5 se trata de las simulaciones y resultados obtenidos.

**Descripción del sistema**

El modelo estudiado representa un aparato de levitación magnética (Figura 1), y lo que se busca es controlar la altura de una bola metálica ( $h$ ), suspendida por medio de un campo magnético variable generado por medio de una bobina por la cual circula una corriente  $i$  (3). La posición de la esfera se mide por medios ópticos (9). La aceleración de la esfera es la suma de la gravedad y de la aceleración producida por la fuerza magnética.

$$a = a_m g \quad [1]$$

Analizando el sistema físico se puede demostrar que la aceleración magnética,  $a_m$  es proporcional al cuadrado de la corriente de la bobina. Con lo cual  $a_m$



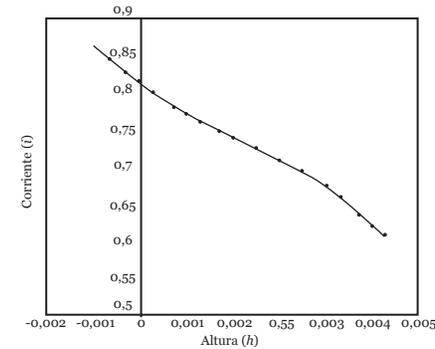
**Figura 1. Representación esquemática del Levitador.**

queda como,

$$a_m = i^2 F(h) \quad [2]$$

Con  $F(h)$  se identifica el efecto de la distancia sobre la aceleración, se le considera una función dependiente de  $h$  que describe el efecto de la corriente  $i$  que cir-

cula por la bobina. Para obtener dicha función, se mide la corriente necesaria para mantener estable a la esfera ( $a = 0$ ) para alturas diferentes, y por métodos numéricos se aproxima la expresión de la curva generada (Figura 2).



**Figura 2. curva de influencia de la relación entre la altura  $h$  y la corriente  $i$ .**

La expresión que se obtiene (2) es:

$$F(h) = \frac{g}{(-1e^3 h^3 + 6700 h^2 - 44,4 + 0,81)} \quad [3]$$

Obtenida la relación entre la altura  $h$  y la corriente  $i$ , se procede a la linealización de la misma:

$$h = (h_o)\Delta h + 2i_o F(h_o)\Delta i \quad [4]$$

donde  $\Delta h = h - h_o$  y  $\Delta i = i - i_o$ .

Tomando como punto de operación  $h_o = 2\text{mm}$  e  $i_o = 0,74\text{A}$ , tenemos

$$h = 784\Delta h + 26,5\Delta i \quad [5]$$

Tras lo cual es posible transformar y obtener la función de transferencia continua que relaciona la corriente  $i$  con la altura  $h$ :

$$G_{p_{con}}(s) = \frac{26,5}{s^2 - 784} \quad [6]$$

**Método del diagrama de coeficientes**

*Modelo matemático*

El diagrama de bloques estándar del MDC es la configuración de dos grados de libertad que se expone en la Figura 3. Allí  $y$  es la salida controlada,  $r$  es la en-

trada de referencia,  $u$  es la señal de control y  $d$  es una perturbación exterior.  $N(s)$  y  $D(s)$  son los polinomios numerador y denominador de la función de trans-

ferencia de la planta, respectivamente.  $A(s)$ ,  $B(s)$  y  $F(s)$  son los polinomios que constituyen el controlador.

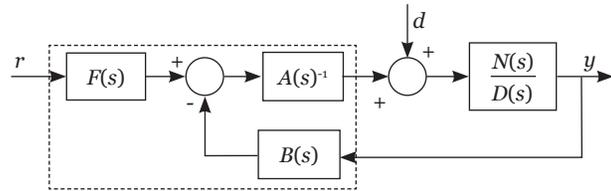


Figura 3. Diagrama de bloques estándar del MDC.

La salida controlada tiene la siguiente expresión:

$$Y(s) = \frac{N(s)F(s)}{P(s)}R(s) + \frac{A(s)N(s)}{P(s)}D(s) \quad [7]$$

Donde  $P(s)$  es el polinomio característico del sistema a lazo cerrado que esta dado por

$$P(s) = A(s)D(s) + B(s)N(s) = \sum_{i=0}^{n_c} a_i s^i \quad [8]$$

Parámetros de desempeño y el polinomio característico

El MDC emplea algunos parámetros de diseño para poder modelar el comportamiento del

sistema a controlar: el índice de estabilidad  $\gamma_i$ , la constante de tiempo equivalente  $\tau$  y los índices de límite de estabilidad  $\gamma_i^*$ . Ellos definen de la siguiente manera:

$$\gamma_i = \frac{a_i}{a_i + a_{i-1}} \quad 1, \dots, (n_c - 1) \quad [9a]$$

$$\tau = a_1 / a_0 \quad [9b]$$

$$\gamma_i^* = \frac{1}{\gamma_i} + \frac{1}{\gamma_{i-1}} \quad [9c]$$

En (9a)  $\gamma_0$  y  $\gamma_{n_c}$  se definen como  $\infty$ . Usando las relaciones descritas en la ecuación 9, es posible formular el polinomio característico en términos de los parámetros de diseño  $\tau_i$  y  $\gamma_i$  como:

$$P_T(s) = a_0 \left[ \sum_{i=2}^n \left( \prod_{j=1}^{i-1} 1/\gamma_{i-j}^j \right) (\tau s)^i + \tau s + 1 \right] \quad [10]$$

Polinomio llamado *polinomio característico objetivo*, cuyos coeficientes se calculan según la expresión:

$$a_i = \frac{\tau^i}{\prod_{j=1}^{i-1} \gamma_j^{i-j}} a_0 \quad [11]$$

### Diagrama de Coeficientes

El diagrama de coeficientes es un gráfico que muestra los coeficientes del polinomio característico, índices de estabilidad, límites de estabilidad, y la constante de tiempo equivalente. Este diagrama le da al diseñador la capacidad de ver y tomar decisiones acerca del desempeño del controlador en función de esos parámetros. Por medio de ese diagrama es posible determinar la estabilidad, robustez y velocidad del sistema. Se muestran algunos ejemplos de este diagrama (11,12).

### Condición de estabilidad

El criterio de Routh-Hurwitz establece las condiciones necesarias y suficientes para la estabilidad, sin embargo, los efectos que tienen las variaciones de los coeficientes sobre la estabilidad no pueden verse claramente para sistemas de órdenes altos. Se propusieron condiciones suficientes para estabilidad (10). Debido a su simplicidad, las relaciones entre inestabilidad en función de los coeficientes de los polinomios característicos

se hacen muy claras. El MDC emplea los criterios de Lipatov-Sokolov de la siguiente manera: Condiciones suficientes de inestabilidad:

$$a_{i-1} a_i \leq a_{i-2} a_{i+1} \quad [12a]$$

$$\gamma_{i-1} \gamma_i >, \text{ para algún } i=2, \dots, (n_c - 1). \quad [12b]$$

Condiciones suficientes de estabilidad:

$$a_i a_{i-1} > 2,1505 a_{i+1} a_{i-2} \text{ y } \quad [13a]$$

$$\gamma_i \gamma_{i-1} > 2,1505, \text{ para algún } i=2, \dots, (n_c - 1). \quad [13b]$$

Estas condiciones están integradas al procedimiento del MDC para poder encontrar polinomios característicos convenientes.

### Forma estándar de Manabe

Se recomienda emplear la forma estándar de Manabe en los diseños hecho en MDC. En esta forma los índices de estabilidad son escogidos como  $\gamma_i = [2,5; 2; \dots; 2]$  para  $i=1, \dots, (n_c - 1)$ . En el diseño siguiendo la forma de Manabe, el tiempo de asentamiento  $t_s = \kappa \tau$ , donde  $\kappa \in [2,5 \ 3]$ . La forma estándar de Manabe posee otras características favorables. El sobre pico es casi nulo, entre los sistemas que poseen la misma constante de tiempo equivalente la forma de Manabe posee el menor tiempo de establecimiento, la respuesta al escalón muestra perfiles casi idénticos independientemente del orden

del polinomio característico, y finalmente es fácil de memorizar y recordar.

La escogencia de los índices de estabilidad puede relajarse a  $\gamma_i > 1,5 \gamma_i^*$  con el objeto de obtener mas robustez sacrificando en menor grado la estabilidad del sistema y la calidad de su respuesta. No obstante, el procedimiento de diseño basado en la forma estándar de Manabe es en general suficientemente estable y robusto.

*Procedimiento de diseño*

Luego de escoger la constante de tiempo equivalente en función del tiempo de asentamiento deseado, y los índices de estabilidad mediante la forma de Manabe, se procede a calcular el polinomio característico del sistema realimentado objetivo (8) y el polinomio característico objetivo (10) se obtiene la siguiente ecuación diofantina:

$$A(s)D(s) + B(s)N(s) = a_0 \left\{ \sum_{i=2}^n \left( \prod_{j=1}^{i-1} 1/\gamma_{i-j}^j \right) (\tau s)^i \right\} + \tau s + 1 \quad [14]$$

Donde los polinomios  $A(s)$  y  $B(s)$  son de la forma

$$A(s) = \sum_{i=0}^p l_i s^i, \quad B(s) = \sum_{i=0}^q k_i s^i \quad [15]$$

A partir de (14) y (15) es posible construir un sistema de ecuaciones en la forma de Sylvester

$$[C]_{rxr} \begin{bmatrix} l_i \\ k_i \end{bmatrix}_{rx1} = [ai]_{rx1} \quad [16]$$

La matriz  $C$  y los coeficientes  $a_i$  son conocidos, por lo cual los coeficientes de los polinomios  $A(s)$  y  $B(s)$  se pueden calcular con facilidad. El polinomio  $F(s)$  puede ser obtenido de:

$$F(s) = \left. \frac{P(s)}{N(s)} \right|_{s=0} \quad [17]$$

Con este procedimiento, se garantiza que el error de estado

permanente se reduce a cero (8, 13).

**Igualación de modelos**

El problema general de igualación de modelos puede definirse de la siguiente manera: dada la función de transferencia de una planta, y una función de transferencia deseada, encuentre las redes de retroalimentación y compensación tales que, la función de transferencia desde la entrada de referencia, hasta la salida del sistema compensado, sea igual a la función de transferencia deseada (14).

La versión de la igualación de modelos del MDC es la siguiente: dada la función de transferencia de la planta,  $G(s) = N(s)/D(s)$ , la configuración de 2 grados de libertad de la Figura 3, y una fun-

ción de transferencia deseada  $T(s) = E(s)/P_T(s)$  (considerando a  $P_T(s)$  como polinomio deseado del MDC), encuentre los polinomios  $A(s)$ ,  $B(s)$  y  $F(s)$ , tales que la función de transferencia de  $r$  a  $y$  en la configuración de 2 grados de libertad, iguale a  $T(s)$ .

*Funciones de transferencia Implementables*

Para asegurar la realización de la igualación de modelos, algunas condiciones deben cumplirse:

- i. Todos los compensadores deben tener una función de transferencia propia.
- ii. El modelo resultante debe estar bien constituido, lo que se traduce en (siguiendo la topología de la Figura 1)  $G(\infty)[B(\infty)/A(\infty)] \neq -1$ .
- iii. El sistema resultante debe ser internamente estable.

Así mismo, para que  $T(s)$  sea implementable, debe cumplir con ciertas condiciones. Considérese una planta con la función de transferencia propia  $G(s) = N(s)/D(s)$ , luego la función de transferencia completa  $T(s) = N_T(s)/D_T(s)$  es implementable si y solo si:

- i.  $DT(s)$  cumple la condición de Hurwitz.
- ii.  $\psi(T) \geq \psi(G)^\dagger$ .
- iii. Todos los ceros de  $N(s)$  ubicados en el semiplano derecho son contenidos por  $NT(s)$ .

<sup>†</sup>  $\psi(\cdot)$  representa el grado relativo de una función racional, el exceso entre polos y ceros.

Es importante resaltar que bajo la condición de desigualdad de polos y ceros, todos los polos y ceros distintos a los de fase no minima de  $G(s)$  pueden ser asignados de forma arbitraria.

*Como escoger la función de transferencia objetivo*

Sea  $T(s)$  la función de transferencia objetivo

$$T(s) = \frac{N_T(s)}{D_T(s)} = \frac{\alpha_0 + \alpha_1 s + \alpha_2 s^2 + \dots}{\beta_0 + \beta_1 s + \beta_2 s^2 + \dots} \quad [18]$$

La escogencia de  $T(s)$  depende la función de transferencia de la planta y el criterio de desempeño que se tenga en consideración. Debe tomarse en cuenta que las raíces de  $D_T(s)$  determinan la respuesta transitoria y los coeficientes de  $N_T(s)$  determinan el comportamiento en estado permanente. En el caso particular de este trabajo, se iguala el denominador al polinomio característico objetivo del MDC expresado en la Ec. (10).

Al ser la topología de la Figura 4 (matemáticamente equivalente a la Figura 3) una de dos grados de libertad, es posible solucionar el problema de seguimiento y el de rechazo de forma simultánea. En ambos casos, se presentan condiciones que los polinomios  $N_T(s)$ ,  $D_T(s)$ ,  $A(s)$  y

$B(s)$  deben cumplir, para, por un lado lograr que la salida del sistema siga una determinada referencia (14) lo que se logra escogiendo apropiadamente los coeficientes  $\alpha_i$  y  $\beta_i$ , y por otro lado obtener un sistema capaz de rechazar perturbaciones de

determinado tipo, lo cual es posible calculado  $A(s)$  y  $B(s)$  con los grados apropiados (8).

*Método de cálculo de los controladores*

Para la Figura 4, la función de transferencia entre  $r$  y  $y$  es:

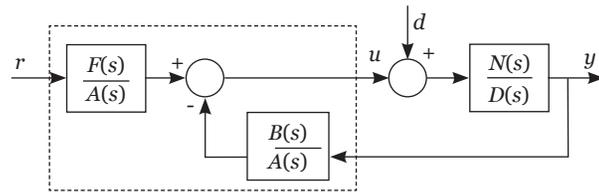


Figura 4. Diagrama de bloque del sistema con dos grados de libertad.

Con lo cual, el problema de igualación de modelos se traduce en encontrar  $F(s)$ ,  $A(s)$  y  $B(s)$  tales que la planta  $G(s) = N(s)/P_T(s)$ , tenga la respuesta objetivo deseada  $T(s) = E(s)/P_T(s)$ , vista como ecuación [19].

$P_T(s)$ , se usa como dato para hallar los valores de  $A(s)$  y  $B(s)$  por medio de la siguiente ecuación diofantina:

$$AD + BN = P_T \quad [20]$$

$F(s)$  se calcula según la ecuación (17).

**Simulaciones y resultados**

*Controladores Obtenidos*

El levitador magnético a controlar posee la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{26,5}{s^2 - 784} = \frac{D}{N(s)} \quad [21]$$

De esto se deduce que *grado* ( $P$ ) = 3

Se escoge un tiempo de establecimiento  $t_s = 50$  ms, con lo cual la constante de tiempo  $\tau = t_s/2,5 = 0,02$ .

Con  $\tau = 2$ , y con índices de estabilidad  $\gamma_i = [2,5 \ 2]$ ,  $i = 1,2$  el polinomio característico objetivo resultante es:

$$P_i(s) = 6,4 \cdot 10^{-7} s^3 + 1,6 \cdot 10^{-4} s^2 + 0,02s + 1$$

De resolver la ec. (21) para ese valor de  $P_T$ , se obtienen los siguientes polinomios:

$$A(s) = 6,4 \cdot 10^{-10} s + 1,6 \cdot 10^{-4} \quad [22]$$

$$B(s) = 8 \cdot 10^{-4} s + 0,0425 \quad [23]$$

$$F(s) = 0,038 \quad [24]$$

*Resultados de las simulaciones*

En la Figura 5, se muestra el desempeño del sistema controlado ante una entrada tipo escalón.

Se aprecia que el sistema tiene a la referencia en el tiempo diseñado, y se estabiliza en ese valor en el tiempo de diseño sin ningún sobrepico apreciable. El comportamiento se aproxima al

ideal.

En la Figura 6 se muestra el rechazo del sistema a perturbaciones de tipo escalón.

Este gráfico muestra que la topología de 2 grados de libertad es capaz de resolver simultáneamente el problema de rechazo y el problema de seguimiento. El comportamiento temporal es similar al caso sin perturbación.

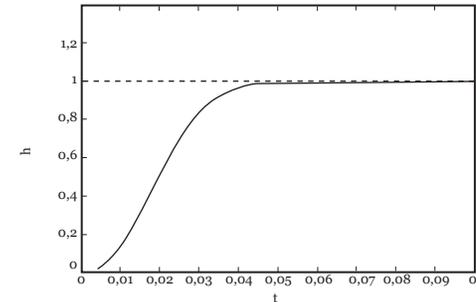


Figura 5. Respuesta obtenida por medio de los controladores ante una entrada de tipo escalón.

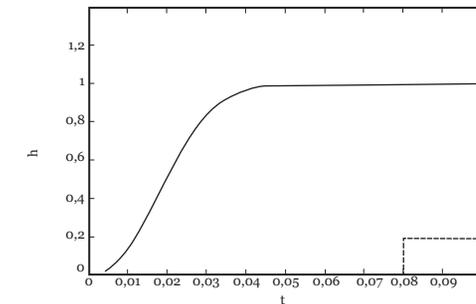


Figura 6. Respuesta del sistema ante el escalón, y su respuesta ante una perturbación del mismo tipo en  $t=0,08s$ .

Finalmente, la Figura 7 muestra como el sistema se comporta en condiciones más dinámicas de funcionamiento, se simula el sistema ante una referencia de tipo senoidal.

El ligero retardo en el seguimiento de la referencia obedece al tiempo de asentamiento de 50ms, se aprecia un seguimiento perfecto, tanto en magnitud como en fase.

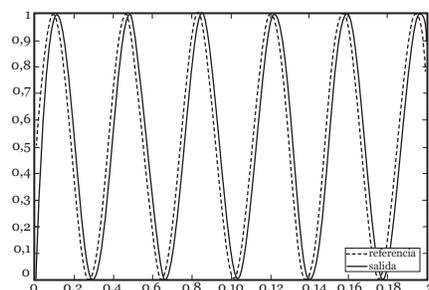


Figura 7. Respuesta del sistema ante una referencia senoidal.

## CONCLUSIONES

El Método del Diagrama de Coeficientes (MDC) se presenta como una herramienta que permite resolver problemas complejos en sistemas no lineales como un levitador magnético.

Las bondades del método no solo se restringen a situaciones de referencia estática, sino que permite diseñar funciones u

objetivos capaces de seguir dinámicamente referencias cambiantes como una señal senoidal.

Empleado en una topología de dos grados libertad, mediante la estrategia de igualación de modelos y la ecuación diofantina, el MDC permite además resolver el problema de seguimiento y de rechazo a perturbaciones de forma plenamente satisfactoria.

## LITERATURA CITADA

- (1) Åström, K.J. (1980). Robustness of a design based on assignment of poles and zeros. *IEEE Trans. On Auto. Control.*, 25, 588-591.
- (2) Chen, C.T. (1999). *Linear System Theory and Design*, 3rd edition, Oxford University Press, New York.
- (3) Espinosa, U., (2005). Sistema de Levitación Magnética controlado con lógica difusa y control clásico. Escuela Militar de ingenieros de México.
- (4) Hamanci, S., y Kaya, I., y Atherton, D.P. (2001). Smith predictor design

by CDM. European Control Conference (ECC01), Porto, Portugal.

- (5) Hamanci, S., y Koksai, M. (2002). Chaos control using the coefficient diagram method. 10th International workshop on Nonlinear Dynamics of Electronics systems. Izmir Turquía.
- (6) Hamanci, S., Koksai, M. y Manabe, S. (2002). On the control of some nonlinear systems with the coefficient diagram method. 4th Asian Control Conference, Singapur.
- (7) Hamanci, S., y Ucar, A. (2002). A robust model-based control for uncertain systems. *Transaction of the institute of Measurement and Control*, 24(4), 331-345.
- (8) Koksai, M., Hamamci, S., (2004). A program for the design of linear time invariant control systems: CDMCAD. *Computer Applications in Engineering Education*, 12(3), 165-174.
- (9) Lempel, A., Michel G., y Carbajales, R. (2004). Levitador magnético. *Revista Argentina de Trabajos Estudiantiles*, 1ra. edición.
- (10) Lipatov, A. y Sokolov N. (1979). Some sufficient conditions for stability and instability of continuous linear stationary systems. *Automatic Remote Control*, 39, 1285-1291.
- (11) Manabe., S. (1998). Coefficient diagram method. 14th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace. Seul, Corea pp 199-210.
- (12) Manabe., S. y Kim, Y.C. (2000). Recent development of coefficient diagram method. 3th Asian Control Conference. Shanghai China.
- (13) Öcal, Ö, Söylemez, M.T., y Bir, A. (2005). Robust pole assignment using coefficient diagram method. ACSE Conference. El Cairo, Egipto.
- (14) Teppa. P. 2007. A model matching implementation of the coefficient diagram method. Reporte interno. Universidad Simón Bolívar.

## **Sistema de control óptimo para un separador gas-líquido bajo condiciones de flujo intermitente**

Optimal control system for a gas-liquid separator under intermittent flow conditions

**César Eizaga\***, **Hanna Aboukheir\*\*** y **Leonardo Cáliz\*\*\***

### **Resumen**

El presente artículo tiene como objetivo presentar un sistema de control basado en la teoría de control moderna conocida como control óptimo, aplicada en separadores gas-líquido horizontales operando bajo condiciones de flujo intermitente, modelado a través de la técnica de identificación de sistemas en caja gris. La data experimental utilizada corresponde a la obtenida por el investigador Wilson F. Giozza en su trabajo titulado "Simulation of Gas-Oil Separator Behavior Under Slug Flow Conditions". Se lleva a cabo un estudio del proceso de separación y las variables que intervienen en él, así como las perturbaciones inherentes al sistema de control, con el propósito de determinar el funcionamiento del separador gas-líquido horizontal y el modelo teórico generalizado del mismo.

Recibido el 04/03/09. Aceptado el 28/05/09  
Autor para correspondencia: e-mail: eizagac@pdvsa.com

\* PDVSA

\*\* Universidad Rafael María Baralt, Programa Ingeniería y Tecnología. Venezuela.

\*\*\* Universidad Rafael Belloso Chacín.

Se colocó la data experimental junto con el modelo teórico determinado en la herramienta de identificación de sistemas de Matlab® para obtener el modelo específico del separador y sus parámetros de funcionamiento, los cuales proporcionan ajustes exactos respecto del modelo original. Adicionalmente se determina el controlador óptimo para el proceso modelado, se construyen diferentes configuraciones de sistemas de control óptimo y se simulan las mismas para verificar su desempeño. Finalmente se compara el desempeño del sistema de control con control PID y PI - Óptimo.

**Palabras clave:** Sistema de Control Óptimo, separador gas-líquido, flujo intermitente.

### **Abstract**

This article aims to present a control system based on modern control theory known as optimal control, applied in horizontal gas-liquid separator operating under intermittent flow conditions, modeling through system identification technique in gray box. Experimental data used corresponds to that obtained by the investigator Wilson F. Giozza in his work entitled "Simulation of Gas-Oil Separator Slug Flow Behavior Under Slug Flow Conditions". It conducts a study of the separation process and the variables involved in it, or any disturbances inherent to the control system for the purpose of determining the operation of horizontal gas-liquid separator and the general theoretical model of it. He placed the experimental data with the theoretical model established in the system identification tool in Matlab® for your specific model of separator and its operating parameters, which provide exact settings on the original model. Additionally, determining the optimal controller for the process modeling, are built different configurations of optimal control systems are simulated in order to verify their performance. Finally compared the performance of the control system with PID control and PI - Optimal.

**Key words:** Optimal Control System, gas-liquid separator, intermittent flow.

## INTRODUCCIÓN

Los separadores gas-líquido son equipos que intervienen en la fase inicial dentro de las plantas de producción. A partir de ellos se alimentan sistemas dedicados a conducir, almacenar y transportar cantidades de gas y crudo para su comercialización.

La dinámica del separador es de alta complejidad, dadas las características del flujo de entrada. Uno de los regímenes de flujo más comunes es el flujo intermitente, caracterizado por eventuales olas de líquido, seguidas por burbujas de gas, este fluido produce serias fluctuaciones de presión, así como vibraciones en el separador y otros equipos asociados, generando dificultades en el control de nivel.

Se hace necesario lograr una eficaz regulación en el nivel del líquido en el recipiente, para evitar presencia de líquido en la corriente de gas y viceversa. Con el fin de cumplir con esta premisa, se debe lograr en primera instancia, un modelado del proceso de separación tomando en cuenta las necesidades de la operación, para luego diseñar el sistema de control, en este caso en particular de control óptimo, capaz de regular el comportamiento del separador horizontal gas-líquido operando bajo condiciones altamente exigentes de flujo intermitente (7, 8).

La selección del sistema de

control óptimo, vanguardia de las estrategias de control avanzado, radica en la complejidad del diseño de un sistema de control en separadores gas-líquido, condición acentuada aún más dado que el separador considerado se encuentra bajo condiciones de flujo intermitente (1, 3).

### Funcionamiento del Separador Gas-Líquido

Se estudió un separador gas-líquido de tipo horizontal con las características establecidas en la investigación de Giozza (4), entre la data calculada en dicho trabajo se encuentran: velocidades de tapones de líquido, distancia entre tapones, presión y nivel de líquido en el separador, posiciones de válvulas de control de líquido y gas así como tasas de flujo de líquido y gas saliendo del separador.

Para llevar a cabo los cálculos antes mencionados se realizaron las siguientes consideraciones:

- La caída de presión a lo largo de la tubería es una función lineal de su longitud.
- La caída de presión ocurre sólo en los tapones de líquido. La caída de presión en las burbujas de gas es despreciable en comparación con la de los tapones de líquido y por lo tanto no es considerada.
- La velocidad de estado estacionario del líquido en tapones es igual a la velocidad promedio de la mezcla.

• Las tasas promedio de flujo másico de entrada de líquido y gas y la presión promedio de entrada son constantes.

• La masa de una burbuja permanece sin modificaciones, a pesar de que el volumen de una burbuja aumenta mientras viaja a través de la tubería.

• Únicamente fluye líquido a través de la línea de descarga de líquido.

• Únicamente fluye gas a través de la línea de descarga de gas.

• La presión a la salida de de ambas líneas de descarga son constantes.

• Las temperaturas en la tubería y el separador son iguales y constantes.

Las ecuaciones que describen el comportamiento del separador (2) se muestran a continuación:

a. Cambio de la distancia del tapón al separador:

$$\frac{dx_i}{dt} = v_i$$

Donde

$v_i$  = Velocidad del tapón.

b. Cambio de presión en la burbuja con respecto al tiempo:

$$\frac{dpi}{dt} = \frac{(v_i + 1 - v_i)pi}{x_i + 1 - x_i - L_{si}}$$

Donde

$p_i$  = Presión en la burbuja.

$L_{si}$  = Líquido en el tapón.

c. Cambio de volumen de gas mientras un tapón entra en el separador:

$$\frac{dVG}{dt} = -\frac{dVL}{dt}$$

Donde

VG = Volumen de gas.

VL = Volumen de líquido.

d. Cambio de volumen de líquido mientras un tapón entra en el separador:

$$\frac{dVL}{dt} = A \frac{v_i}{C} R_{Ls} - Q_L$$

Donde

A = Área del separador.

C = Relación entre la velocidad de frente de la burbuja y la mezcla.

$R_{Ls}$  = Holdup de líquido en el tapón.

$Q_L$  = Caudal de líquido.

e. Cambio de presión mientras un tapón entra en el separador:

$$\frac{dP_{sp}}{dt} = \frac{P_{sp}}{V_g} \left( A \frac{v_i}{C} Q_G - Q_L \right)$$

Donde

$Q_G$  = Caudal de gas.

f. Cambio de volumen de gas mientras una burbuja entra en el separador:

$$\frac{dVG}{dt} = -\frac{dVL}{dt} - A(1 - R_{Lb}) v_i + 1$$

Donde

$R_{Lb}$  = Holdup de líquido en la burbuja.

g. Cambio de volumen de líquido mientras una burbuja entra en el separador:

$$\frac{P_{sp}}{V_t} = A v_i R_{Lb} - Q_L$$

h. Cambio de presión mien-

tras una burbuja entra en el separador:

$$\frac{dP_{sp}}{dt} = \frac{P_{sp}}{V_g} [A v_g(1 - H_{Lb}) - Q_G + A v_f R_{Lb} - Q_L]$$

i. Cambio de nivel en separador respecto al tiempo:

$$\frac{dh_L(t)}{dt} = \frac{dV_L}{dt} \frac{1}{2 L_{sp} (d_{sp} h_L(t) - h_L(t)^2)^{1/2}}$$

Donde  
d<sub>sp</sub> = Diámetro del separador.

cesaria, fue calculada ya sea a través de principios físicos fundamentales o a través de correlaciones empíricas (4).

Las características tanto del fluido como del separador se muestran en el Cuadro I.

### Propiedades Físicas de los Fluidos

Las propiedades físicas de los fluidos o data de laboratorio ne-

CUADRO I

CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO Y SEPARADOR GAS-LÍQUIDO HORIZONTAL

#### CARACTERÍSTICAS DEL SEPARADOR

|                     |            |
|---------------------|------------|
| Diámetro            | 12,00 ft   |
| Longitud            | 60,00 ft   |
| Presión (set point) | 34,00 psig |
| Nivel (set point)   | 6,00 ft    |
| Temperatura         | 134,00 °F  |

#### CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO

|                                       |                  |
|---------------------------------------|------------------|
| Tasa de flujo de crudo                | 164581,00 STBO/D |
| Tasa de flujo de agua                 | 6250,00 STW/D    |
| Razón crudo-gas                       | 637,80 SCF/ STBO |
| Grado API del crudo                   | 28,50 Grados     |
| Gravedad específica del agua          | 1,10             |
| Gravedad específica del gas producido | 0,78             |

#### CARACTERÍSTICAS DE LA LÍNEA DE DESCARGA DE LÍQUIDO

|                     |               |
|---------------------|---------------|
| Diámetro interno    | 24,00 in      |
| Longitud            | 1000,00 ft    |
| Presión de descarga | 120,0000 psig |

### (Continuación CUADRO I)

#### CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO INTERMITENTE

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| Holdup de líquido en el tapón    | 0,53       |
| Holdup de líquido en la burbuja  | 0,13       |
| Velocidad superficial de líquido | 4,04 ft/s  |
| Velocidad superficial de gas     | 16,43 ft/s |

#### CARACTERÍSTICAS DE LA TUBERÍA

|           |             |
|-----------|-------------|
| Diámetro  | 23,12 in    |
| Rugosidad | 0,000062 ft |

#### PROPIEDADES DEL FLUIDO DENTRO DEL SEPARADOR

|                        |                   |
|------------------------|-------------------|
| Densidad de líquido    | 53,2639 LBM/Cu.ft |
| Densidad del gas       | 1,2801 LBM/Cu.ft  |
| Viscosidad del líquido | 4,5529 CP         |
| Viscosidad del gas     | 0,012 CP          |

#### CARACTERÍSTICAS DE LA LÍNEA DE DESCARGA DE GAS

|                     |             |
|---------------------|-------------|
| Diámetro interno    | 28,00 in    |
| Longitud            | 1000,00 ft  |
| Presión de descarga | 120,00 psig |

### Lazos de Control

En este estudio consideraron dos lazos de control, el lazo de control de nivel ubicado en la descarga de líquido del separador; se puede apreciar que la variable de entrada en este lazo es el nivel de líquido dentro del separador y la de salida la posición de la válvula de control de líquido. Del mismo modo se puede apreciar el lazo de presión, ubicado en la descarga de gas, con la presión del gas la posición de la válvula de control de gas como variables de entrada y salida respectivamente. Dichos lazos se representan en la Figura 1.

El primer objetivo de la presente investigación persigue desarrollar el modelo físico – matemático del separador en caja gris, esto debido a que se tiene un entendimiento de la física del sistema y el mismo puede ser representado mediante ecuaciones diferenciales ordinarias. El modelo en caja gris desarrollado a continuación recoge la estructura matemática del modelo, y a partir de los objetos, métodos y funciones del Toolbox de Identificación de Sistemas de MATLAB® se estiman los parámetros del modelo.

### Lazo de Nivel

Considerando el balance de masa de líquido en el separador se tiene

Donde

### Modelo Teórico Generalizado del Separador Gas-Líquido Horizontal

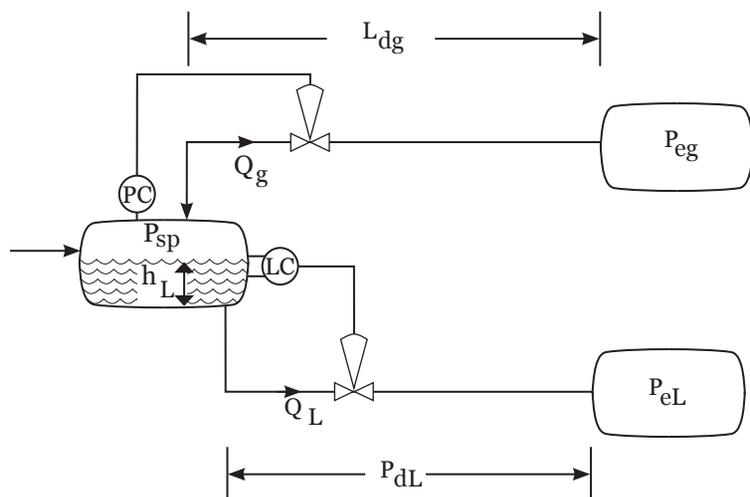


Figura 1 Lazos de Control.

$$A \frac{dh_L(t)}{dt} = Q_{Le}(t) - Q_{Ls}(t)$$

$dh_L(t)$  = Diferencial de nivel de líquido en el separador.

$A$  = Área del separador.

$Q_{Le}$  = Caudal de líquido entrando al separador.

$Q_{Ls}$  = Caudal de líquido saliendo del separador.

El caudal de salida de líquido viene dado por la siguiente relación

$$Q_{Ls}(t) = C_{vL} V_{pL}(t) \sqrt{\frac{\Delta P_{VL}(t)}{G_L}}$$

Donde

$C_{vL}$  = Coeficiente de la válvula de control de líquido.

$V_{pL}$  = Posición de la válvula de control de líquido (porcentaje de apertura).

$\Delta P_{VL}$  = Caída de presión a través de la válvula de control de

líquido.

$G_L$  = Gravedad específica del líquido que fluye a través de la válvula.

La dinámica de la válvula es de altísima rapidez en comparación con los otros componentes del sistema, la posición de la válvula de control de líquido se convierte en la acción de control del sistema, con lo cual se tiene el siguiente balance de masa

$$A \frac{dh_L(t)}{dt} = Q_{Le}(t) - C_{vL} V_{pL}(t)$$

Si adicionalmente se considera que la tasa de flujo de salida es la tasa promedio del flujo de entrada (6), y calculando la misma a lo largo del período de la perturbación, se tiene la siguiente ecuación

$$C_{vL} V_{pL}(t) \cong \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \left( C_{vL} V_{pL}(t) + A \frac{dh_L(t)}{dt} \right) dt$$

Aplicando la Transformada de Laplace se tiene

$$V_{pL}(s) = \frac{(1 - e^{-Ts})}{Ts} V_{pL}(s) + K H_L(s)$$

El parámetro  $K$  está dado por

$$K = \frac{-\lambda A}{T C_{vL}}$$

Donde

$\lambda$  = Parámetro de entonamiento fino.

Aplicando la siguiente aproximación de Padé de primer orden

$$e^{-Ts} \cong \frac{2 + Ts}{2 - Ts}$$

Se obtiene el modelo teórico generalizado del separador gas-líquido, el cual se representa de la siguiente manera

$$\frac{H_G(s)}{T_{pG}(s)} K = \frac{T_c + 1}{T_p + 1}$$

$$Q_{Gs}(t) = C_{vG} V_{pG}(t) P_1(t) \sqrt{\frac{520}{G_G T}} \operatorname{sen} \left[ \left( \frac{3417}{C_1} \right) \sqrt{\frac{\Delta P_{VG}}{P_1(t)}} \right]_{grad}$$

Donde

$C_{vG}$  = Coeficiente de la válvula de control de gas.

$V_{pG}$  = Posición de la válvula de control de gas (porcentaje de apertura).

$G_G$  = Gravedad específica del gas que fluye a través de la válvula.

Donde

$T_c$  = Parámetro asociado al cero del sistema.

$T_p$  = Parámetro asociado al polo del sistema.

#### Lazo de Presión

De forma análoga al lazo de nivel se considera el balance de masa de gas, en esta oportunidad en el separador

$$A \frac{dh_G(t)}{dt} = Q_{Ge}(t) - Q_{Gs}(t)$$

Donde

$dh_G(t)$  = Diferencial de nivel de gas en el separador.

$A$  = Área del separador.

$Q_{Ge}$  = Caudal de gas entrando al separador.

$Q_{Gs}$  = Caudal de gas saliendo del separador.

El caudal de salida de gas viene dado por la siguiente relación

$\Delta P_{VG}$  = Caída de presión a través de la válvula de control de gas.

$P_1$  = Presión en el separador horizontal.

Análogamente al lazo del nivel, se considera que la dinámica de la válvula de control de gas es de altísima rapidez en compara-

ción con los otros componentes del sistema, y que la tasa de flujo de salida de gas es igual a la tasa promedio del flujo de entrada. El modelo matemático generalizado del sistema para el lazo de presión es entonces

$$\frac{H_G(s)}{V_{pG}(s)} = K \frac{T_c + 1}{T_p + 1}$$

### Modelo Específico para un Separador Gas-Líquido Horizontal

#### Lazo de Nivel

Conociendo la data de entrada y salida del sistema (4, 5), que para el caso del lazo de ni-

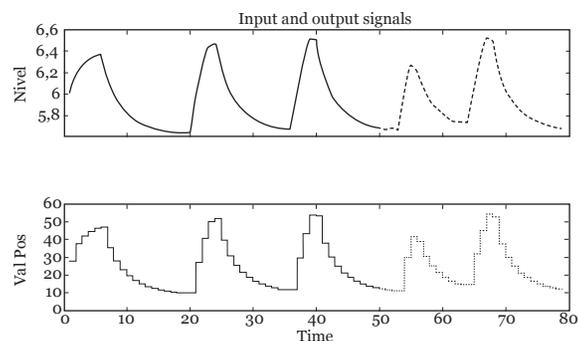


Figura 2. Data de identificación y validación en función del tiempo (Lazo de Nivel).

La respuesta al impulso así como la de frecuencia del sistema se muestran en las Figuras 3 y 4.

Seleccionando la ventana de modelos de procesos de la herramienta de identificación y colocando el modelo generali-

vel se trata del nivel de líquido dentro del separador y la posición de la válvula de control de líquido, y además conociendo el modelo matemático generalizado del lazo de nivel se procede a la identificación del sistema en caja gris a través de la herramienta de identificación de sistemas de Matlab®, esta operación permitirá determinar los parámetros indicados en el modelo generalizado del sistema.

La data en función del tiempo (lazo abierto) utilizada tanto para propósitos de identificación como validación se puede apreciar en la Figura 2.

$$HL(s) = K * \frac{1+Tz*s}{1+Tp1*s}$$

### Sistema de control óptimo para un separador gas-líquido bajo condiciones de flujo intermitente

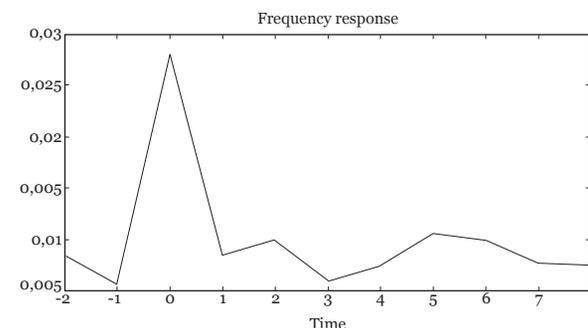


Figura 3. Respuesta al impulso (Lazo de Nivel).

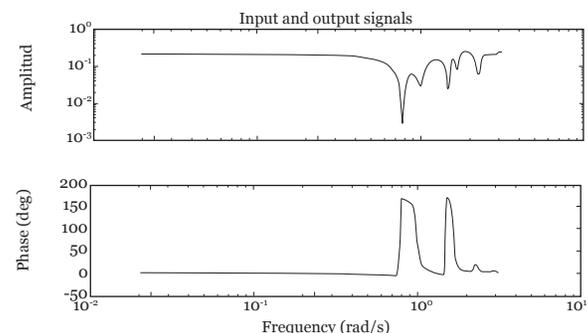


Figura 4. Respuesta de frecuencia (Lazo de Nivel).

Donde

$$\begin{aligned} K &= 4,867 \\ T_{p1} &= 1,7031e+006 \\ T_z &= 6997,2 \end{aligned}$$

Para los propósitos de verificar la veracidad del modelo determinado se debe verificar su ajuste con respecto a la data original. El ajuste del modelo identificado con respecto al modelo representado por la data disponible es de 98,5 %, lo cual

se puede evidenciar en la Figura 5.

#### Lazo de Presión

De manera similar al lazo de nivel se procede a la identificación del sistema en caja gris a través de la herramienta de identificación de sistemas de Matlab®, con lo cual se determinarán los parámetros indicados en el modelo generalizado del sistema.

La data en función del tiem-

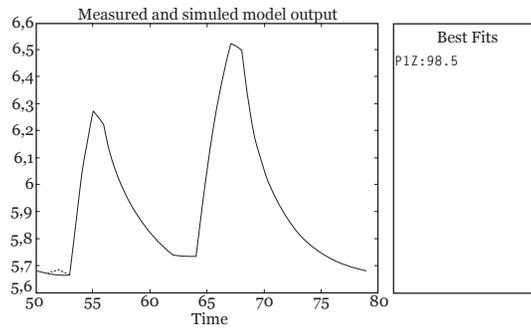


Figura 5. Ajuste del Modelo Identificado con Respecto al Modelo Representado por la Data Disponible (Lazo de Nivel).

po utilizada (lazo abierto) tanto ción como validación se puede para propósitos de identifica- apreciar en la Figura 6.

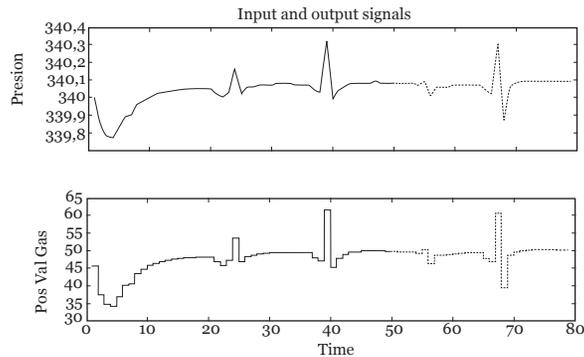


Figura 6. Data de identificación y validación en función del tiempo (Lazo de Presión).

La respuesta al impulso y de frecuencia del sistema se muestra en las Figuras 7 y 8.

A través de Matlab® se obtiene el modelo matemático del sistema dado por la siguiente función de transferencia

$$P(s) = K \cdot \frac{1+Tz*s}{1+Tp1*s}$$

Donde  
 $K = 5,0215$   
 $Tp1 = 8,7159e+005$   
 $Tz = 3504,3$

Se verifica la veracidad del modelo determinado ya que su ajuste con respecto a la data original es de 95,94 %, esto se puede evidenciar en la Figura 9.

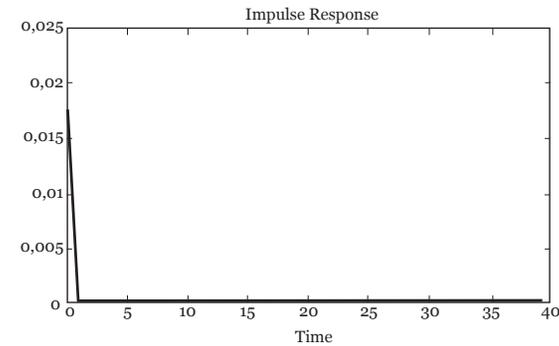


Figura 7. Respuesta al impulso (Lazo de Presión).

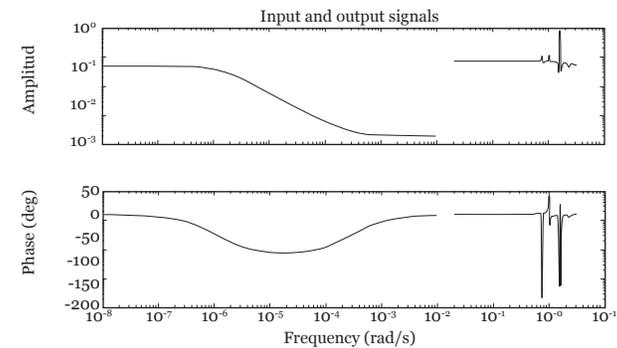


Figura 8. Respuesta de frecuencia (Lazo de Presión).

**Controlador Óptimo para el Separador**

$$\text{num}=[3,4055e+004 \ 4,8670]$$

$$\text{den}=[1703100 \ 1]$$

A continuación se describe el procedimiento utilizado en Matlab® para determinar el controlador óptimo del sistema:

b. Se determina la función de transferencia del sistema en tiempo discreto:

$$TF=tf(\text{num},\text{den},1)$$

Transfer function:

$$\frac{34055 z + 4,867}{1,703e006 z + 1}$$

Sampling time: 0,1

**Lazo de Nivel**

a. Se introducen los parámetros de desempeño del sistema, esto es, introducir el numerador y denominador de su función de transferencia:

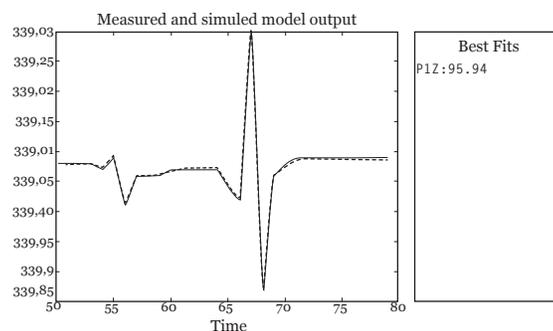


Figura 9. Ajuste del Modelo Identificado con Respecto al Modelo Representado por la Data Disponible (Lazo de Presión).

c. Se coloca el sistema en ecuaciones de espacios de estado a través de:

$$[A,B,C,D]=tf2ss(num,den)$$

Donde

$$\begin{aligned} A &= -5,8716e-007 \\ B &= 1 \\ C &= 2,8460e-006 \\ D &= 0,0200 \end{aligned}$$

d. Se resuelve la Ecuación de Ricatti utilizando la representación auxiliar de espacios para obtener la ley de control óptimo:

$$[L, P, E]=DLQR(A, B, eye, 0,001)$$

Donde

L = Ley de Control.  
P = Solución de la ecuación de Ricatti.

E = Autovalores de P.  
Sus valores son:  
L = -5,8658e-007  
P = 1,0000  
E = -5,8658e-010

e. La ley de control para el filtro de Kalman se determina resolviendo la ecuación de Ricatti para las transpuestas de A y C. La ley de control  $K_e$  será la transpuesta de  $L_e$ . En este caso por tratarse de un sistema de primer orden las transpuestas coinciden con su valor original.

#### Lazo de Presión

Siguiendo el mismo procedimiento anterior para el lazo de presión se obtiene la Ley de Control, solución de la ecuación de Ricatti y autovalores de P para el lazo de presión, ellos son respectivamente:

$$\begin{aligned} L &= -1,1462e-006 \\ P &= 1.0000 \end{aligned}$$

$$E = -1,1462e-009$$

#### Desempeño del Controlador Óptimo para el Separador

Para comprobar la efectividad del controlador diseñado, es necesario realizar pruebas que permitan verificar su desempeño. Esto se realiza a través de si-

mulaciones construidas a partir de la herramienta de simulación de Matlab®.

Conociendo ya la ley de control óptimo, es posible entonces plantear los esquemas de los Problemas de Control Óptimo:

- Regulador Óptimo.
- Seguimiento al Estado.
- Filtro de Kalman.

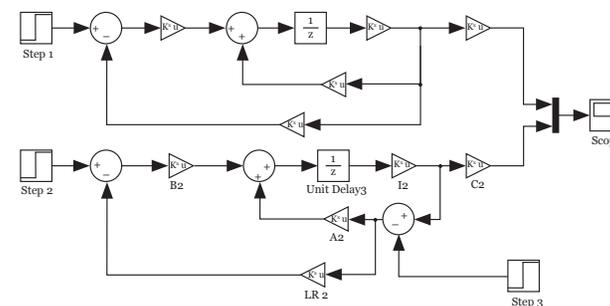


Figura 10. Regulador Óptimo y Seguimiento al Estado.

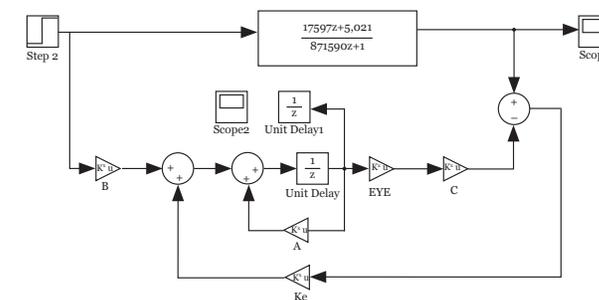


Figura 11. El Filtro de Kalman.

Obteniendo los siguientes resultados: *Lazo de Nivel*

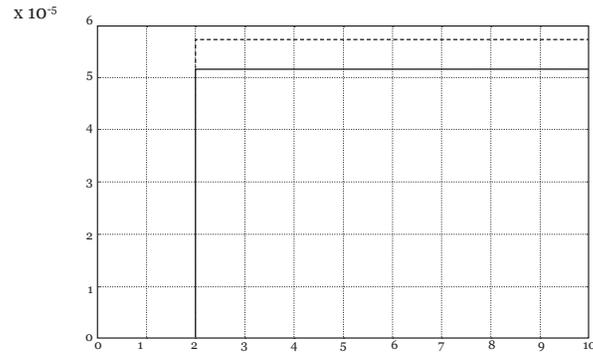


Figura 12. Respuesta del Sistema de Control con Regulador Óptimo (Línea segmentada) y Seguimiento al Estado (color continua) (Lazo de Nivel).

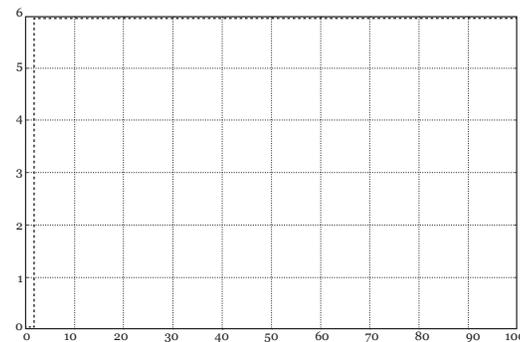


Figura 13. Respuesta del Sistema de Control con Filtro de Kalman (Lazo de Nivel).

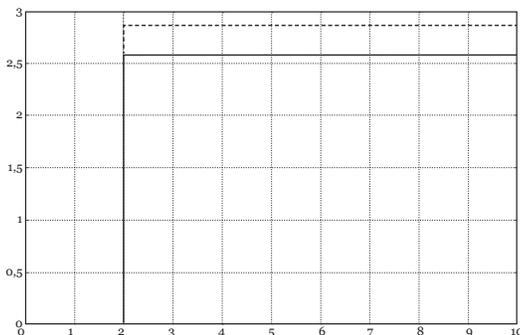


Figura 14. Respuesta del Sistema de Control con Regulador Óptimo (Línea continua) y Seguimiento al Estado (Línea segmentada) (Lazo de Presión).

Sistema de control óptimo para un separador gas-líquido bajo condiciones de flujo intermitente

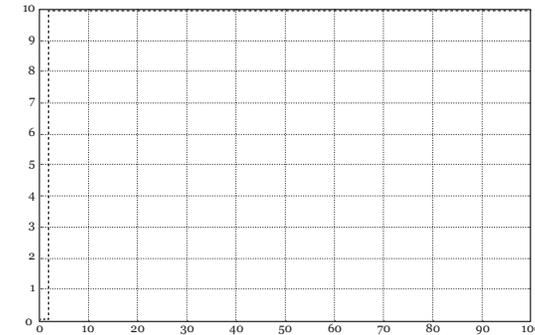


Figura 15. Respuesta del Sistema de Control con Filtro de Kalman (Lazo de Presión).

Adicionalmente a los esquemas antes planteados se presenta una comparación entre los sistemas de control clásico y avanzado (óptimo), representados por un sistema de control PID y PI - Óptimo respectivamente. La simulación correspondiente para los efectos de comparación referentes al lazo de nivel es la siguiente:

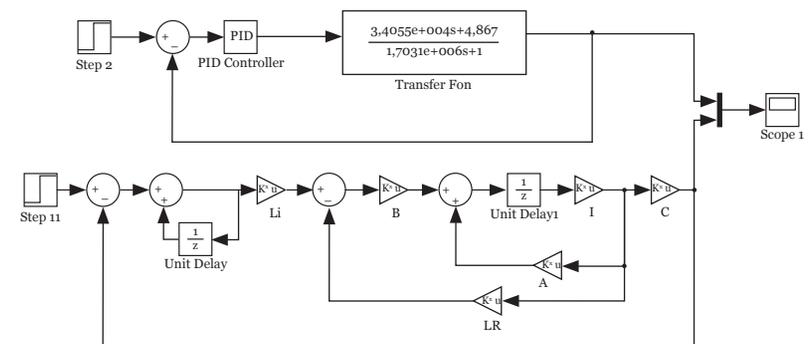


Figura 16. Controladores PID y PI - Óptimo.

Obteniendo los siguientes resultados:

#### Lazo de Nivel

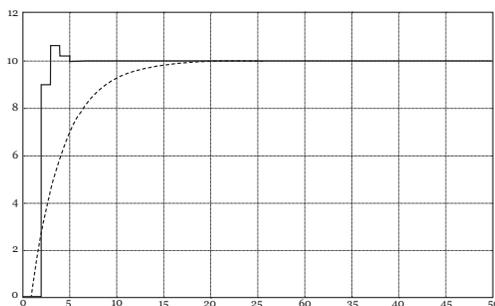


Figura 17. Comparación de Respuestas de Sistemas con Controladores PID (línea segmentada) vs. PI – Óptimo (línea continua) (Lazo de Nivel).

#### Lazo de Presión

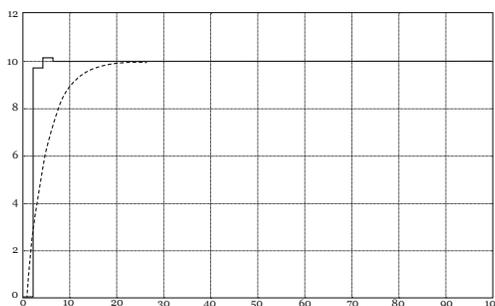


Figura 18. Comparación de Respuestas de Sistemas con Controladores PID (línea segmentada) vs. PI – Óptimo (línea continua) (Lazo de Presión).

### CONCLUSIONES

Existen numerosas variables en el proceso de separación, sin embargo, luego de ciertas consideraciones para determinar el modelo matemático del separador para el lazo de nivel, se determinó que dicho nivel se con-

vierte en la salida del sistema y el cambio de posición de la válvula de control de líquido en la salida del mismo. En el lazo de presión la posición de la válvula de control de gas es la variable de entrada y la presión la salida del sistema.

El modelado de sistemas pue-

de resultar una tarea compleja, en el caso particular de esta investigación la estrategia de modelado en caja gris utilizada se adaptó correctamente a las exigencias del proceso de separación bajo condiciones de flujo intermitente.

El modelado en caja gris es sumamente útil y efectivo, en especial si se conocen los datos de entrada y salida del sistema y se tiene conocimiento del modelo matemático del proceso. Para lograr de manera coherente dicho modelo, hay que tomar muy en cuenta las potencialidades en cuanto a las diferentes configuraciones de modelos que pueden ser introducidos en la herramienta de identificación de sistemas de Matlab®, lo cual permite ahorro en tiempo de cálculo.

En el caso particular de esta investigación, los parámetros determinados permitieron obtener ajustes entre el modelo identificado y el modelo original del separador que superan el 98 % para el lazo de nivel y el 95 % para el lazo de presión.

A través de esta investigación se pudo observar la alta efectividad de las diferentes configuraciones de control óptimo representadas, esto se evidencia en cortos tiempos de respuesta a pesar de lo exigente del proceso controlado, en especial al utilizar la configuración del filtro de Kalman.

Los controladores diseñados

presentaron comportamiento similar bajo las distintas configuraciones del control óptimo, se diferencian mayormente en su curva de atenuación antes de llegar a la estabilidad del sistema.

Después de comparar los sistemas de control PID clásico y PI-Óptimo permite verificar la superioridad de este último, sin embargo el controlador PID mostró un comportamiento satisfactorio.

### RECOMENDACIONES

Se recomienda profundizar el estudio de la dinámica del proceso y desarrollar software que permita simular condiciones operacionales para diferentes equipos de separación.

El equipo de separación más comúnmente utilizado en la industria petrolera nacional es el separador horizontal, por este motivo se recomienda probar la efectividad del modelado en caja gris utilizado en esta investigación con data de campo existente.

Se recomienda probar la capacidad de atenuación del control óptimo planteado en diferentes equipos de separación, instalados tanto en tierra firme como costa afuera, y sometidos a diversas condiciones operacionales y patrones de flujo.

Verificar la capacidad de adaptación de sistemas dispo-

nibles en la industria al sistema pruebas y ensayos.  
de control planteado a través de

#### LITERATURA CITADA

- (1) Aboukheir, H. (2006). Sistemas de Control II. Maracaibo. Universidad Rafael Belloso Chacín. Facultad de Ingeniería.
- (2) Adeniyi, O. (2004). Development of Model and Simulation of a Two-Phase, Gas-Liquid Horizontal Separator. Nigeria. Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Federal de Tecnología.
- (3) Cáliz, L. (2006). Sistema de Control Predictivo para Separadores no Convencionales. Trabajo presentado como requisito para optar al grado de Magíster en Ingeniería de Control y Automatización de Procesos. Universidad Rafael Belloso Chacín. Vicerrectorado de Investigación y Postgrado. Decanato de Investigación y Postgrado.
- (4) Giozza, W. 1983. Simulation of Gas-Oil Separator Behavior under Slug Flow Conditions. Trabajo presentado como requisito para optar al grado de Magíster en la Disciplina de Ingeniería de Petróleo. Universidad de Tulsa. Proyecto de Flujo de Fluidos.
- (5) Grupo de Estudios Norsk Hydro. (2007). Slug Flow. Londres.
- (6) Núñez, G. 2007. A Practical Strategy for Controlling Flow Oscillations in Surge Tanks. Río de Janeiro. Centro de Investigación de PETROBRAS.
- (7) Skogestad, S. (2003). Lower Limit on Controller Gain for Acceptable Disturbance Rejection. Hong Kong. Simposio Internacional de Control Avanzado y Procesos Químicos.
- (8) Stoorcaas, E. (2005). Stabilizing Control and Controllability: Control Solutions to Avoid Slug Flow in Pipeline-Riser Systems. Trabajo presentado como requisito para optar al grado de Doctor en Ingeniería. Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología. Departamento de Ingeniería Química.

## DVS en control MIMO: respuesta en frecuencia y desacople

SVD in MIMO Control: Frequency Response and Decoupling

**Pedro A. Teppa G.\* y Juan B. Acosta A.\*\***

### Resumen

En este trabajo se emplea la técnica de descomposición en valores singulares (DVS) en dos problemas de control multivariable (MIMO). En el primero de ellos la DVS de la matriz de transferencia del sistema multivariable es utilizada para definir un procedimiento sencillo que permite computar las direcciones de mayor y menor amplificación del sistema. En el segundo problema, la técnica de DVS se emplea para obtener ecuaciones desacopladas entre las combinaciones lineales de los sensores y combinaciones lineales de los actuadores, dadas por las matrices unitarias de la DVS de la matriz de transferencia del sistema. Ambas metodologías son validadas en un proceso físico de intercambio térmico. Los resultados alcanzados confirman su efectividad.

**Palabras clave:** control multivariable, control multilazos, valores singulares, respuesta en frecuencia, desacople.

Recibido el 20/02/09. Aceptado el 10/07/09  
Autor para correspondencia: e-mail: pteppa@usb.ve

\* Departamento de Procesos y Sistemas, Universidad Simón Bolívar, Apartado Postal 89000, Caracas-1080, Venezuela.

\*\* Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Carabobo, Valencia, Carabobo, Venezuela.

## Abstract

This work uses the technique of singular value decomposition (SVD) in two multivariable (MIMO) control problems. In the first problem, the SVD of the matrix transfer function of the system is employed to define a simple procedure for computing directional information about the system. In particular, we can compute the direction of maximum and minimum amplification of the unit, real valued sinusoidal input. In the second problem, the SVD is used to obtain decoupled equations between linear combinations of sensors and linear combinations of actuators, given by the columns of the unitary matrices of the SVD of the matrix transfer function. Both of the methodologies have been validated in a physical process, a heat exchanger. The results obtained show the effectiveness of the approach.

**Key words:** multivariable control, multi-loop control, singular values, frequency response, decoupling.

## INTRODUCCIÓN

La descomposición en valores singulares de la matriz de transferencia de la planta es utilizada en este trabajo para tratar dos problemas: la respuesta en frecuencia y el desacople de un sistema de control multivariable. Aunque los conceptos de base del tema de respuesta en frecuencia están bien establecidos (1, 5 14). A juicio de los autores, el tratamiento no ha tenido una orientación práctica, a diferencia del caso SISO (una entrada – una salida), donde una profusión de herramientas gráficas (diagramas de Bode, diagramas polares, cartas de Nichols) han permitido un detallado análisis del comportamiento del sistema en el dominio de la frecuencia (2, 3, 9, 13). Lo anterior no deja

de ser curioso, ya que el análisis frecuencial de un sistema MIMO es mucho más complejo. Una de las razones principales de esta dificultad radica en las inevitables interacciones y acoples que existen entre los diferentes subsistemas que lo componen, así como en el concepto de direccionalidad que advierte que las ganancias dependen de la dirección de la entrada, esto es, de la combinación de entradas en consideración.

En este trabajo se considera como se puede extender de manera natural el análisis frecuencial de un sistema SISO al caso MIMO. La principal contribución consiste en un procedimiento que permite computar sistemáticamente la información direccional del sistema. En particular, las direcciones de

mayor y menor amplificación. Igualmente se muestra como emplear el programa de computación Matlab® para desplegar gráficamente la información direccional.

En el contexto del segundo problema se puede señalar que en la década de los 70 y principios de los 80 apareció un fuerte impulso para trabajar en la explotación de técnicas SISO en el control de sistemas MIMO, dentro de este marco, en 1982, presentaron el primer antecedente de la técnica de desacople de sistemas multivariables a través de la DVS de la matriz de transferencia (8). En ese trabajo se definió la metodología RFN (Reversed Frame Normalising), la cual empleaba una descomposición Quasi-Nyquist (QND) que incorporaba la información de la fase a los valores singulares. Posteriormente, (10) realizaron un segundo aporte. En ambas contribuciones las matrices unitarias  $U$  y  $V$  de la DVS de la matriz de transferencia ( $G=U\Sigma V^*$ ) varían con la frecuencia, lo que dificulta la aplicación de la metodología. No obstante, se apreciaba la potencialidad del concepto. Pocos años después, una vez consolidada una teoría madura y eficiente que permitía el tratamiento directo de los problemas de control MIMO, la práctica de descomposición del sistema multivariable en diferentes subsistemas SISO, perdió su empuje inicial. En 1997,

(7) analizaron la metodología RFN a la luz de las nuevas técnicas MIMO ( $H_2$ ,  $H_\infty$  y síntesis) y descubrieron que, bajo ciertas hipótesis, (i.e. la matriz de transferencia admitía una DVS particular, donde las matrices unitarias eran constantes, por lo que no se tenían problemas con la dirección de las entradas), el controlador MIMO compuesto de varios diseños SISO era más óptimo que si se empleaba un diseño MIMO directo. Sin embargo, a pesar de la importancia teórica del resultado, el mismo no tuvo mayor repercusión en aplicaciones prácticas de control multivariable, quizás vinculado al hecho de que la hipótesis era bastante restrictiva.

En este trabajo se propone una metodología simple para aplicar la DVS en el diseño de un controlador multivariable, se utiliza una aproximación real de la DVS de la matriz de transferencia para desacoplar los enlaces sensor-actuador del sistema. La síntesis del controlador multivariable se resume en un procedimiento sencillo de muy pocos pasos. Los resultados obtenidos muestran el buen desempeño y la viabilidad de la técnica.

El artículo está organizado de la manera siguiente. La sección 2 trata el tópico de respuesta en frecuencia de una manera tutorial, se recuerdan ciertas nociones básicas y se muestra como computar la información direc-

cional del sistema, en particular, las direcciones de mayor y menor amplificación. Se define de una manera sencilla la noción de DVS de la matriz de transferencia que es empleada en la sección 3 para tratar el problema de desacople. La sección 4 ilustra las dos metodologías desarrolladas a través de un ejemplo numérico, una versión idealizada de un proceso de intercambio térmico que ya fue tratado con antelación por los autores (15) utilizando un procedimiento de desacople de estado estacionario aproximado.

**Respuesta en Frecuencia**

Al discutir la respuesta en frecuencia de un sistema LTI (Lineal e Invariante en el Tiempo) SISO se requiere que el sistema sea estable. Esto permite considerar la aplicación de señales sinusoidales en la entrada del sistema y la medición de señales de salida en estado estacionario, estas últimas señales son igualmente sinusoidales de la misma frecuencia que la entrada pero escaladas en magnitud y desplazadas en fase. En el caso de los sistemas MIMO, aunque existen similitudes con la situación SISO, se deben considerar elementos adicionales que hacen que el análisis frecuencial sea mucho más complejo.

Sea un sistema LTI multivariable estable con matriz función de transferencia

$$G(s) = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & \dots & g_{1m}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{p1}(s) & \dots & g_{pm}(s) \end{bmatrix} \quad [1]$$

Si se aplica en el canal  $i$ , la entrada  $u_i(t) = \cos(\omega t)$  (las entradas restantes se hacen cero) la salida en el canal  $j$  vendrá dada por  $y_j(t) = A \cos(\omega t) + \varphi$ .

Donde  $A = |g_{ij}(j\omega)|$ ,  $\varphi = \angle g_{ij}(j\omega)$ . O sea, ocurre exactamente como en el caso SISO, la función matricial  $G(j\omega)$  proporciona información sobre como responde el sistema ante señales sinusoidales (frecuencias). Por tal razón, se le denomina *función de respuesta en frecuencia*. De la teoría básica de control, se conoce muy bien que el diagrama de Bode de un sistema LTI SISO es una herramienta fundamental para conocer sus propiedades. En particular, la característica de magnitud, esto es, la gráfica de  $|G(j\omega)|$  como una función de la frecuencia (dB vs  $\omega$  en escala logarítmica) es de considerable importancia. Sin embargo, ¿Qué sucede cuando  $G(j\omega)$  es una matriz? Se podría considerar la realización de múltiples diagramas de Bode para las posibles combinaciones entrada - salida (cada  $g_{ij}(j\omega)$  en  $G(j\omega)$ ). El inconveniente con esta estrategia es que la información sobre las conexiones y acoples de los diferentes subsistemas no se consideraría. Se estarían igno-

rando importantes propiedades del sistema multivariable visto como un todo. Otra idea, sería estudiar los autovalores de la matriz  $G(j\omega)$  como una forma de medir su “tamaño”, y de esta manera comenzar a ver el sistema en forma global. No obstante, esto solo serviría para sistemas cuadrados ( $m = p$ ). Aún más, los autovalores de  $G(j\omega)$  no son necesariamente una buena medida de la ganancia de la matriz (14). En definitiva, la solución que se adopta en la práctica consiste en la utilización de los valores singulares de la función de respuesta en frecuencia. En lo que sigue se definirá ese concepto. Sea inicialmente una transformación lineal

$$y = Ax \quad [2]$$

donde  $A \in \mathbb{C}^{p \times m}$ ,  $y \in \mathbb{C}^p$  y  $x \in \mathbb{C}^m$  (con  $\mathbb{C}$  el cuerpo de los números complejos).

**Definición 1** Sea  $A$  una matriz de valor complejo. La adjunta  $A^*$  de la matriz  $A$  se obtiene tomando la transpuesta de  $A$  y posteriormente conjugando sus elementos.

*Ejemplo 1*

$$A = \begin{bmatrix} 1 + j \\ 5 + j \end{bmatrix} \Rightarrow A^* = [1 - j \quad 5 + j]$$

**Definición 2** Una matriz  $A$  de valor complejo se dice ser hermítica si verifica  $A = A^*$ .

Las matrices hermíticas para

matrices de valor complejo corresponden a las matrices simétricas para matrices de valor real. Por lo que siempre tienen autovalores reales (12). Retomando la Ec. (2). ¿Cuál es el tamaño de  $y$  en comparación con el de  $x$ ? La norma-2 del vector  $x$  se expresa como

$$\|x\|_2 = \left( \sum_{i=1}^m |x_i|^2 \right)^{1/2} = \sqrt{x^* x}$$

Entonces

La matriz  $A^* = A$  con dimensión  $m \times m$  es hermítica y semidefinida positiva. Por tanto tiene autovalores reales y no negativos. Denotando los autovalores por  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$  con  $\lambda_1$  el mayor y  $\lambda_m$  el menor, no es difícil demostrar la relación siguiente (12, 17).

$$\|y\|_2^2 = \|Ax\|_2^2 = x^* A^* A x \quad [3]$$

Esto lleva a la definición siguiente

**Definición 3** Dada una matriz  $A \in \mathbb{C}^{p \times m}$ . Sus valores singulares  $\sigma_i$  se definen como  $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$  donde los  $\lambda_i$  corresponden a los autovalores de la matriz  $A^* = A$ . El mayor valor singular de  $A$  se denota por  $\bar{\sigma}(A)$  y el menor por  $\underline{\sigma}(A)$ .

De todo esto se desprende que si  $y = Ax$  resulta

$$\underline{\sigma}(A) \leq \frac{\|y\|}{\|x\|} \leq \bar{\sigma}(A) \quad [4]$$

Esto es, la “ganancia” de la matriz  $A$  se encuentra comprendida entre su mayor valor singular y su menor valor singular. En general, los valores singulares no son calculados numéricamente como los autovalores de la matriz  $A^*A$ . En su lugar,  $A$  se representa como una factorización (descomposición) de matrices, la denominada descomposición en valores singulares (DVS)

$$A = U \Sigma U^*$$

Dado que  $A$  es una matriz  $p \times m$ ,  $U$  será una matriz unitaria ( $UU = I_p$ ) de dimensión  $p \times p$ ,  $\Sigma$  una matriz  $p \times m$  con los valores singulares en la diagonal principal y elementos cero en las posiciones restantes y  $V$  será una matriz unitaria de dimensión  $m \times m$ .

**Observación 1**

i. Si  $A$  es de valor complejo,  $U$  y  $V$  también lo serán. Sin embargo, sus valores singulares, serán reales y no negativos.

ii. En Matlab®, la descomposición en valores singulares de la matriz  $A$  se ejecuta como

$$[U, \text{Sigma}, V] = \text{svd}(A)$$

iii. Las columnas de la matriz

$$U = [u_1 \dots u_p]$$

corresponden a los vectores singulares izquierdos de  $A$

$$(u_i \in \mathcal{C}^p)$$

A su vez, las columnas de la matriz

$$V = [v_1 \dots v_m]$$

corresponden a los vectores singulares derechos de  $A$ ,

$$(v_i \in \mathcal{C}^m)$$

Los vectores  $u_i$  y  $v_i$  son ortonormales  $u_i^* u_j = \delta_{ij}$  Esto es, y  $v_i^* v_j = \delta_{ij}$  con

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, i=j \\ 0, i \neq j \end{cases}$$

En lo que sigue, las consideraciones efectuadas sobre la transformación lineal (2), serán trasladadas al caso específico de la matriz de transferencia  $G(s)$  y en particular al cómputo de la información direccional del sistema multivariable. A ese fin, se considera nuevamente (2), la descomposición de  $A$  en valores singulares arroja

$$y = U \Sigma U^* x$$

Supóngase  $x = v_i$  (i-ésimo vector singular derecho). Luego, el vector de salida resultante será

$$y = U \Sigma U^* v_i \quad [5]$$

Pero, por la ortonormalidad de los vectores singulares se desprende

$$(V^* v_i) = \begin{pmatrix} 0 \dots 0 & 1 & 0 \dots 0 \\ \uparrow \\ \text{Posición } i \end{pmatrix}$$

Además,

$$\Sigma V^* v_i = (0 \dots 0 \quad \sigma_i \dots 0)^T$$

Finalmente,

$$y = A v_i = U \Sigma V^* v_i = \sigma_i u_i \quad [6]$$

**Ejemplo 2 (1).** Sea la matriz

$$A = \begin{bmatrix} 45 & -72 & -5 \\ 0,3 & 1,5 & -0,2 \\ 27 & -45 & 9 \end{bmatrix}$$

La instrucción de Matlab  $[U, S, V] = \text{svd}(A)$  proporciona

$$U = [u_1 \quad u_2 \quad u_3]$$

$$S = \begin{bmatrix} 0,8503 & -0,5262 & 0,0047 \\ -0,0112 & -0,0270 & -0,9996 \\ 0,5261 & 0,8499 & -0,0289 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} 9,8190 & 0 & 0 \\ 0 & 10,3201 & 0 \\ 0 & 0 & 1,0248 \end{bmatrix}$$

$$V = [v_1 \quad v_2 \quad v_3]$$

$$V = \begin{bmatrix} 0,5256 & -0,0717 & -0,8477 \\ -0,8507 & -0,0386 & -0,5242 \\ 0,0049 & 0,9967 & -0,813 \end{bmatrix}$$

Si  $x = v_3$  (dirección de mínima

amplificación), la salida tendrá la dirección de  $u_3$ . Esto es

$$\begin{aligned} \underline{y} &= A v_3 \\ &= A[-0,8477 \quad -0,5242 \quad -0,0813 \end{aligned}$$

$$= \begin{bmatrix} 0,0048 \\ -1,0244 \\ 0,0296 \end{bmatrix}$$

Además

$$\|\underline{y}\|_2 = \sqrt{\underline{y}^T \underline{y}} = 1,0248$$

La dirección de máxima amplificación será en la dirección de  $u_1$  para una entrada  $x = v_1$ . Esto es

$$\underline{\bar{y}} = A v_1 = \begin{bmatrix} 84,8794 \\ -1,1193 \\ 52,5173 \end{bmatrix}$$

con

$$\|\underline{\bar{y}}\|_2 = 9,8190$$

Para un sistema LTI multivariable con matriz de transferencia  $G(s) \in \mathcal{R}(s)^{p \times m}$  se tiene

$$y(j\omega) = G(j\omega)u(j\omega) \quad [7]$$

Con  $u(j\omega)$  y  $v(j\omega)$  las transformadas de Fourier de la entrada y la salida, respectivamente. Por todo lo visto con anterioridad es evidente que

$$\underline{\sigma}(G(jw)) \leq \frac{\|y(jw)\|}{\|u(jw)\|} \leq \bar{\sigma}(G(jw)) \quad [8]$$

Esto es, la ganancia del sistema a una frecuencia  $w$  se encuentra entre el mayor valor sin-

gular y el menor valor singular de la función de respuesta en frecuencia  $G(jw)$ . La contrapartida de los diagramas de Bode de amplitud en el caso SISO corresponden a gráficas de  $\bar{\sigma}(G)$  y  $\underline{\sigma}(G)$  vs  $w$  en el caso MIMO como ilustra la Figura 1.

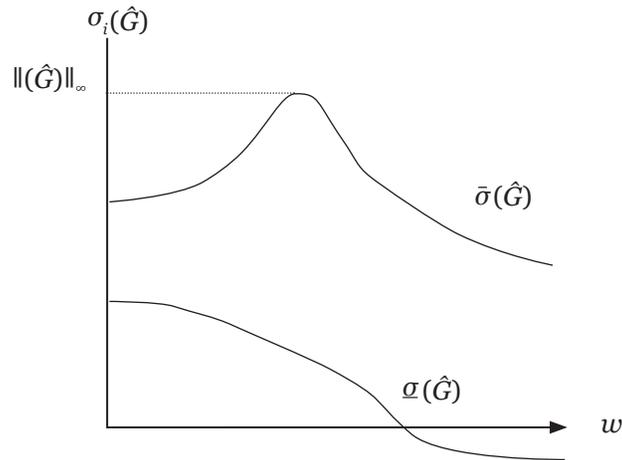


Figura 1. Valores singulares de  $\hat{G}(jw)$

**Observación 2**

i. La norma  $-\infty$  de la matriz de transferencia

$$G(s) \text{ es } \|G\|_{\infty} = \sup_{w \in \Re} \bar{\sigma}(G(jw))$$

La ganancia depende de la “dirección” del vector de entrada  $u(jw)$ . Si este vector es paralelo al vector singular derecho correspondiente al mayor valor singular de  $G(jw)$ , se tendrá la máxima ganancia. La menor amplificación corresponde a una dirección paralela al vector

singular derecho asociado al menor valor singular de  $G(jw)$ .

ii. Se dice que: Una planta multivariable tiene ganancia “grande” a una frecuencia  $w$  si  $\underline{\sigma}(G(jw)) \gg 1$  Una planta multivariable tiene ganancia “pequeña” a una frecuencia  $w$  si  $\bar{\sigma}(G(jw)) \ll 1$

iii. En Matlab®, la instrucción para graficar  $\bar{\sigma}(G)$  y  $\underline{\sigma}(G)$  en  $dB$  vs  $w$  es  $sigma(A, B, C, D)$  con las matrices  $(A, B, C, D)$  una realización en espacio de estado

de  $G(s)$ .

A continuación se muestra un procedimiento para computar la dirección de mayor amplificación del sistema multivariable (el caso de menor amplificación es análogo).

1. Seleccionar una frecuencia específica  $w$ .

2. Computar la descomposición en valores singulares de  $G(jw)$ , a la frecuencia seleccionada en el paso anterior. Obteniéndose,  $G(jw) = U(jw)\Sigma(jw)V^*(jw)$ .

3. Determinar  $\bar{\sigma}G(jw)$ .

4. Determinar el máximo vector singular derecho  $V_{max}(W)$  (Primera columna de la matriz  $V(jw)$ ). Notar que  $V_{max}(W)$  es

$$\begin{bmatrix} u_1(t) = |a_1(w)| \text{sen}(wt + \alpha_1(w)) \\ u_2(t) = |a_2(w)| \text{sen}(wt + \alpha_2(w)) \\ \vdots \\ u_m(t) = |a_m(w)| \text{sen}(wt + \alpha_m(w)) \end{bmatrix}$$

donde los parámetros  $a_i$  y  $\alpha_i$  se determinaron arriba. Notar que la amplitud y fase de cada componente sinusoidal son diferen-

tes. Empleado la descomposición en valores singulares se desprende que el vector de salida  $y(t)$  es

un vector complejo con  $m$  elementos. Escribir los elementos de  $V_{max}(W)$  en forma polar  $[V_{max}(W)]_i = |a_i(W)|e^{j\alpha_i(w)}$ ;  $i = 1, \dots, m$

5. Repetir el paso (4) pero con el máximo vector singular izquierdo  $[U_{max}(W)]_i = |b_i(W)|e^{j\beta_i(w)}$ ;  $i = 1, \dots, p$ .

6. En este momento se está en capacidad de construir las señales sinusoidales de entrada que corresponden a la máxima dirección de amplificación y determinar las señales sinusoidales de respuesta esperadas en estado estacionario. El vector de entrada  $u(t)$  es

tes. Empleado la descomposición en valores singulares se desprende que el vector de salida  $y(t)$  es

$$\begin{bmatrix} y_1(t) = \bar{\sigma}(w)|b_1(w)| \text{sen}(wt + \beta_1(w)) \\ y_2(t) = \bar{\sigma}(w)|b_2(w)| \text{sen}(wt + \beta_2(w)) \\ \vdots \\ y_p(t) = \bar{\sigma}(w)|b_p(w)| \text{sen}(wt + \beta_p(w)) \end{bmatrix}$$

**Desacople de Sistemas Multivariables**

El objetivo del control por desacople consiste en transformar la matriz de transferencia

del sistema, en una diagonal o cercanamente diagonal. De esta forma, el control MIMO sería equivalente a un conjunto independiente de lazos de control. El desacople puede alcanzarse de



los fluidos se “encuentran” (en tuberías separadas), el agua caliente se enfría hasta una temperatura  $T_H$ , calentando el agua fría hasta una temperatura  $T_C$ . Se asume que el agua se encuen-

tra perfectamente mezclada en cada sección, de manera que su temperatura sea uniforme en todos los puntos de cada parte, esto es,  $T_H$  y  $T_C$ .

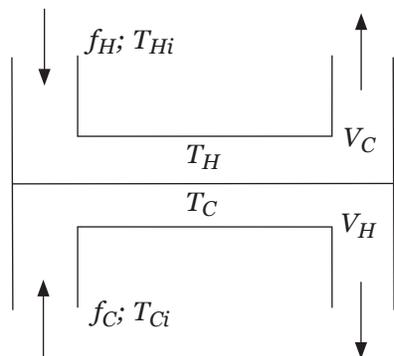


Figura 3. Intercambiador de calor.

$f_C$  y  $f_H$  son los flujos de agua fría y caliente.  $f_{Ci}$ ,  $f_{Hi}$ ,  $T_C$  y  $T_H$  denotan temperaturas en los puntos señalados.  $V_C$  y  $V_H$  son los volúmenes de agua fría y ca-

liente. Luego de efectuar un balance de energía en la parte fría se obtiene que la temperatura cambia conforme a la ecuación

$$V_C \frac{dT_C}{dt} = f_C (T_C - T_C) + \beta (T_H - T_C) \quad [10]$$

El primer término del lado derecho representa el enfriamiento debido a la entrada de agua fría (normalmente,  $T_{Ci} \ll T_C$ , por lo que habrá un descenso de temperatura). El otro término corresponde al calor que fluye desde la parte caliente hacia la parte fría en el intercambiador

$$V_H \frac{dT_H}{dt} = f_H (T_H - T_H) + \beta (T_H - T_C) \quad [11]$$

de calor. Es proporcional a la diferencia de temperatura, y la constante de proporcionalidad  $\beta$  depende del coeficiente de transferencia de calor, la capacidad calorífica de los fluidos, entre otros. Repitiendo en la parte caliente resulta

Se asume que los flujos  $f_H$  y  $f_C$  son constantes e iguales a  $f$  y se considera que las temperaturas de los fluidos que ingresan al intercambiador son entradas:  $U_1 = T_{Ci}$  y  $U_2 = T_{Hi}$ . Tomando como vector de estado  $x = [x_1, x_2]^T = [T_C, T_H]^T$  se obtienen las ecuaciones en variables de estado

$$\begin{aligned} x &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad [12]$$

Con

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{(f + \beta)}{V_C} & \frac{\beta}{V_C} \\ \frac{\beta}{V_H} & -\frac{(f + \beta)}{V_H} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{f}{V_C} & 0 \\ 0 & \frac{f}{V_H} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Considerando los valores numéricos  $f = 0,01$  ( $m^3/min$ ),  $\beta = 0,2$  ( $m^3/min$ ) y  $V_H = V_C = 1$  ( $m^3$ ) resulta

$$x = \begin{bmatrix} -0,21 & 0,20 \\ 0,20 & -0,21 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0,01 & 0 \\ 0 & 0,01 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x \quad [13]$$

La matriz de transferencia se calcula a través de la expresión  $G(s) = C(sI - A)^{-1} B$  resultando

$$\begin{aligned} G(s) &= \begin{bmatrix} g_{11}(s) & g_{21}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) \end{bmatrix} \\ &= \frac{0,01}{(s + 0,01)(s + 0,41)} \begin{bmatrix} s + 0,21 & 0,2 \\ 0,2 & s + 0,21 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad [14]$$

### Respuesta en Frecuencia y Cómputo Direccional del Intercambiador de Calor

Dado que el modelo del intercambiador de calor es estable ( $\Re\{\lambda_i(A)\} < 0, i = 1, 2$ ) se tiene

$$\hat{G}(j\omega) = \frac{0,01}{(j\omega + 0,01)(j\omega + 0,41)} \begin{bmatrix} j\omega + 0,21 & 0,2 \\ 0,2 & j\omega + 0,21 \end{bmatrix} \quad [15]$$

El programa en Matlab® que permite generar el gráfico de respuesta en frecuencia de la Figura 4 es:

» A=[-0,21 0,2; 0,2 -0,21];

» B=0,01\*eye(2);  
 » C=eye(2);  
 » D=zeros(2,2);  
 » sigma(A,B,C,D)

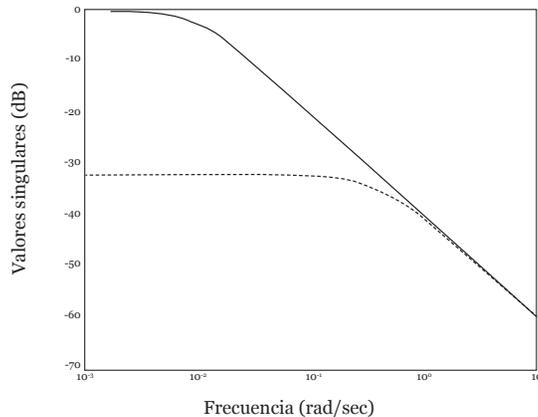


Figura 4. Respuesta en frecuencia del intercambiador de calor.

Para frecuencias por encima de 1 rad/s, todas las entradas son atenuadas de forma idéntica y la ganancia decrece hasta cero. Para bajas frecuencias, la diferencia es significativa, alrededor de 32 dB ( $\cong 40$  veces). Además:

$$V = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0 \\ 0 & 0,0244 \\ 0,7071 & -0,7071 \\ 1,7071 & 0,7071 \end{bmatrix}$$

El máximo valor singular esta asociado con el vector singular derecho  $v = [0,7071 \ 0,7071]^T$ . Por lo que cualquier entrada constante de la forma  $u(t) = \alpha[1 \ 1]^T$ , tendrá una influencia significativa en la respuesta de estado estacionario de la salida ( $w = 0$ ). Por otra parte, las entradas constantes paralelas al vector singular derecho asociadas al menor valor singular (0,0244) del tipo  $u(t) = \alpha[1 \ -1]^T$ , no tienen influencia en el comportamiento estacionario de la salida. Ahora, se considera una señal sinusoidal de frecuencia 0,01 r/s en las direcciones de máxima y mínima amplificación.

$$\|\hat{G}(s)\|_{\infty} = 1.$$

Se va a estudiar la dependencia direccional para una frecuencia  $w = 0$

$$\hat{G}(0) = \frac{1}{0,41} \begin{bmatrix} 0,21 & 0,2 \\ 0,2 & 0,21 \end{bmatrix}$$

En Matlab® se tiene:

```
» Go=[0,21 0,2;0,2 0,21]/0,41;
» [U,S,V]=svd(Go)
```

$$U = \begin{bmatrix} 0,7071 & -0,7071 \\ 0,7071 & 0,7071 \end{bmatrix}$$

```
» G=(0,01/(0,01+j*0,01)*(0,41+j*0,01))*[0,21+j*0,01 0,2;0,2
0,21+j*0,01] % G(j0,01)
G =
0,0461 - 0,0399i    0,0420 - 0,0400i
0,0420 - 0,0400i    0,0461 - 0,0399i
» [U,sigma,V]=svd(G)
U =
0,5238 - 0,4750i    -0,7069 - 0,0172i
0,5238 - 0,4750i    0,7069 + 0,0172i
sigma =
0,1189    0
0    0,0041
V =
0,7071    -0,7071
0,7071 - 0,0000i    0,7071 - 0,0000i
```

```
Empleando el procedimiento de la sección 2 se tiene en Matlab®
» t=0:0,1:1000;
» y1_max=(0,707)*(0,1189)*sin(0,01*t-0,7366); % Máxima am-
plificación
» y2_max=(0,707)*(0,1189)*sin(0,01*t-0,7366); % y1=y2. Máxi-
ma amplificación
» y1_min=(0,707)*(0,0041)*sin(0,01*t-3,1172); % Mínima am-
plificación
» y2_min=(0,707)*(0,0041)*sin(0,01*t+0,0244); % Mínima am-
plificación
» figure
» plot(t,y1_max,t,y2_max,t,y1_min,t,y2_min)
» grid
» xlabel('Tiempo [s]')
» ylabel('Salidas')
» title('Cómputo direccional')
```

En la Figura 5 se muestran simultáneamente las salidas correspondientes a las direcciones de mayor y menor amplificación para una frecuencia de 0,01 r/s.

### Desacople del Intercambiador de Calor

Siguiendo el procedimiento definido en la sección 3 se tiene

$$G_0 = G(0)^{-1} = \begin{bmatrix} 21 & -20 \\ -20 & 21 \end{bmatrix} \quad [16]$$

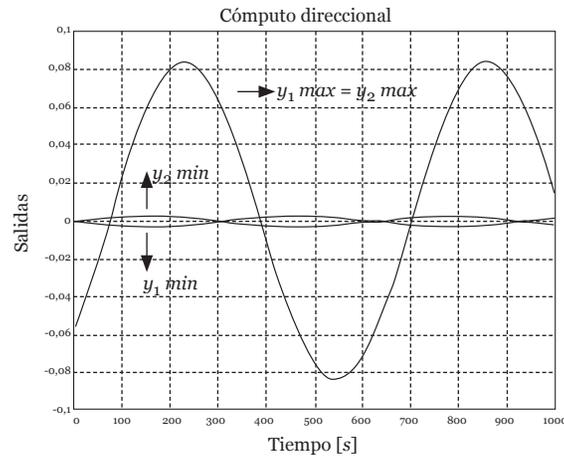


Figura 5. Salidas del intercambiador de calor para las direcciones de mayor y menor amplificación a una frecuencia de 0,01 r/s.

la DSV de  $G_0$  resulta en

$$G_0 = U_0 \Sigma_0 V_0^T = \begin{bmatrix} 0,707 & -0,707 \\ -0,707 & 0,707 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 41 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,707 & -0,707 \\ -0,707 & 0,707 \end{bmatrix}^T \quad [17]$$

Haciendo  $P_1 = V_0$  y  $P_2 = U_0^T$  y sintonizando los controladores PID en  $K_d$  por técnicas empíricas simples de Ziegler-Nichols (13). La respuesta para  $r_1(t) = 1$ , y  $r_2(t) = -1, \forall t > 10$  se muestra en la Figura 6. Es de destacar que la respuesta mejora sensiblemente con refinamientos en la sintonización de los controladores PID.

La Figura 7 ilustra el desempeño del sistema para una estrategia de desacople convencional de estado estacionario (15). Es evidente la mejora que se obtiene con el esquema de desacople

por DVS (Figuras 5 y 6).

### CONCLUSIONES

En este trabajo se consideró la utilización de la descomposición en valores singulares en dos problemas fundamentales del control multivariable. El primero fue el análisis de la respuesta en frecuencia. En este caso se colocó el énfasis en el cómputo de la información direccional del sistema. En particular en la determinación de las direcciones de mayor y menor amplificación.

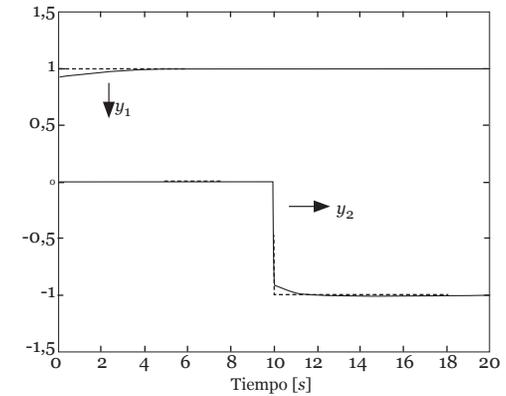


Figura 6. Respuesta del intercambiador de calor usando una estrategia de desacople por descomposición en valores singulares.

El segundo problema mostró dinámicas del sistema multivariable. Ambas metodologías de la descomposición en valores singulares como una estrategia de desacople de las relaciones

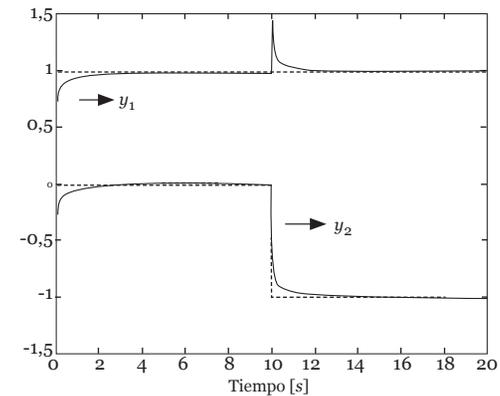


Figura 7. Respuesta del intercambiador de calor usando una estrategia de desacople de estado estacionario.

### LITERATURA CITADA

- (1) Albertos, P. y A. Sala. (2004). Multivariable Control Systems. Springer-Verlag. Londres.
- (2) D'azzo, J. y C. Houpis. (1995). Linear Control Systems Analysis and Design: Conventional and Modern, 4ta edición. McGraw-Hill. Nueva York.
- (3) Dorf, R. y R. Bishop. (2004). Modern Control Systems, 10ma edición. Prentice-Hall. Nueva York.
- (4) Falb, P.L. y W.A. Wolovich. (1967). Decoupling in the design and synthesis of multivariable control systems, IEEE Transactions on Automatic Control, 12: 651-659.
- (5) Glad, T. y L. Ljung. (2000). Control Theory: Multivariable and Nonlinear Methods., Taylor & Francis. Londres y Nueva York
- (6) Goodwin, G., S. Graebe y M. Salgado. (2001). Control system design. Prentice-Hall, New Jersey.
- (7) Hovd, M., R.D. Braatz y S. Skogestad. (1997). SVD controllers for  $H_2$ ,  $H_\infty$  y  $m$  optimal control. Automatica, 33(3):433-439.
- (8) Hung, Y.S. y A.G.J. MacFarlane. (1982). Multivariable Feedback: A quasi-classical approach. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- (9) Kuo, B. (1996). Automatic Control Systems, New Jersey, USA, Prentice - Hall. New Jersey.
- (10) Lau, H., J. Alvarez y K.F. Jensen. (1985). Synthesis of control structures by singular value analysis: dynamic measures of sensitivity and interaction, AIChE J. 31: 427-439.
- (11) Liu, C.H. (1983). General Decoupling Theory of Multivariable Process Control Systems. Springer -Verlag. Nueva York.
- (12) Noble, B. y J.W. Daniel. (1977). Applied Linear Algebra, 2da edición. Prentice-Hall. Londres.
- (13) Ogata, K. (2003). Modern Control Engineering, 4ta edición. Prentice - Hall. New Jersey.
- (14) Skogestad, S. y I. Postlethwaite. (1996). Multivariable Feedback Control. Wiley, Nueva York.
- (15) Teppa, P. y J.B. Acosta. (2007). Desacople de sistemas de control multivariable. VI SPDC ASME USB. Caracas, Venezuela.
- (16) Teppa, P., J.M. Andrade y J. Ferrer. (2005). Control de una torre de destilación empleando un servomecanismo multivariable, Ingeniería UC, 12 (1):76-83
- (17) Zhou, K. (1996). Robust and Optimal control, Prentice-Hall, New Jersey.

## Diversidad de lepidópteros en bosques aprovechados: variación en el corto plazo por aplicación de retención variable<sup>†</sup>

Lepidoptera diversity in harvested forests: short term variation due to variable retention application

**María Vanessa Lencinas\***, **Guillermo Martínez Pastur\***, **Juan Manuel Cellini\*\***, **Emilce Gallo\*\*\***, **Carlos Alberto Busso\*\*\*\***

### Resumen

La cosecha tradicional afecta la biodiversidad original del bosque, principalmente a los insectos. Los sistemas de regeneración con retención variable se proponen para mejorar la conservación en bosques intervenidos, siendo los lepidópteros buenos indicadores. El objetivo fue evaluar variaciones en la diversidad luego de implementarse distintos sistemas de regeneración en bosques de *Nothofagus pumilio* en Tierra del Fuego (Argentina). En 50 ha se ensayaron tres sistemas con retención: agregada-RA, dispersa-RD

Recibido: 19/08/2009. Aceptado: 23/09/2009  
Autor para correspondencia: María Vanessa Lencinas.

<sup>†</sup> Este trabajo fue realizado con fondos otorgados por la Dirección de Bosques de la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (Proyecto PIARFON BIRF 4085-AR).

\* Centro Austral de Investigaciones Científicas (CADIC-CONICET). Av. Houssay 200 (9410) Ushuaia, Tierra del Fuego, Argentina. E-mail: vlencinas@cadic-conicet.gob.ar; cadicforestal@gmx.net

\*\* Universidad Nacional de La Plata. Diag. 113 y 118 (1900) La Plata, Buenos Aires, Argentina. E-mail: jmc@agro.unlp.edu.ar

\*\*\* Administración de Parques Nacionales. Delegación Parque Nacional Tierra del Fuego. (9410) Ushuaia, Argentina. E-mail: egallo@apn.gov.ar

\*\*\*\* Universidad Nacional del Sur. San Andrés 800 (8000) Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina. E-mail: cebusso@criba.edu.ar

y combinada-RC, que se compararon con un bosque primario-BP, y se evaluaron durante cuatro años (línea base antes del corte y capturas en veranos posteriores), mediante un sistema de trapeo de amplio espectro. Se analizaron 4328 individuos pertenecientes a 38 morfoespecies (división Heterocera). Las abundancias y riquezas variaron anualmente, siendo máximas después del corte y mínimas antes de la misma. La riqueza no varió entre BP (35 morfoespecies) y los rodales intervenidos (31-35 morfoespecies), siendo muy bajo el impacto debido a la incorporación de morfoespecies (1 RA y RC, 2 RD). Existió mayor similitud entre BP y RC, seguido de RD y RA. No existieron variaciones significativas de diversidad de lepidópteros en el corto plazo después del corte, siendo RC el que mejor conservó la diversidad original de BP.

**Palabras clave:** pérdida de especies, conservación, *Nothofagus pumilio*, silvicultura, Tierra del Fuego.

### Abstract

Traditional harvesting affects the original forest biodiversity, mainly on insects. Several regeneration systems with retention have been proposed to improve the conservation capacity of harvested forest. These were not evaluated, being the Lepidoptera good indicators. The objective was to evaluate diversity variations after the implementation of several regeneration systems in *Nothofagus pumilio* forests of Tierra del Fuego (Argentina). In 50 ha were assayed three regeneration systems with aggregated-RA, dispersed-RD and combined-RC retention, compared to a primary forest-BP. It was evaluated during four years, carrying out a base-line before cut and captures in following summers. A wide-spectrum trap set was employed. 4328 individuals were analyzed belonging to 38 morpho-species (Heterocera division). The abundance and diversity varied annually, being maximum after the cut and minimum before the interventions. Diversity did not varied between BP (35 morpho-species) and the harvested stands (31-35 morpho-species), being very low the impact due to the new morpho-species incorporation (1 RA and RC, 2 RD). BP and RC were the most similar treatments, followed by RD and RA. Few Lepidoptera variations were detected during the first years after the cut, being RC the treatment which better conserved the original diversity of BP.

**Key-words:** conservation, forestry, *Nothofagus pumilio*, species loss, Tierra del Fuego.

### INTRODUCCIÓN

Los insectos son los principales componentes de la mayoría de los ecosistemas y actúan en roles primordiales de los procesos ecosistémicos (8). Abarcan una gran diversidad en los bosques de *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krass. (7, 17, 18), detectándose entre 100 y 200 especies en los rodales productivos de Tierra del Fuego (27, 28). El conocimiento sobre la taxonomía y autoecología de estas especies es muy escaso, pero se sabe que muchas de ellas son endémicas y relictuales, de significativa importancia para la conservación (9, 17, 27) y de probada utilidad para definir regiones biogeográficas (18, 24). Los lepidópteros son uno de los órdenes más importantes de estos bosques (10, 13, 27, 28), y varias especies, *i.e.* *Automeris* Hübner spp. y *Chilecomadia valdiviana* Phil. (3, 10, 22) atacan a *N. pumilio*, aunque no han sido registrados daños importantes (29). Este grupo constituye una herramienta útil para estudios de impacto, ya que provee valores relativamente fáciles de obtener, sensibles y de bajo costo para medir los efectos del estrés antropogénico en la biodiversidad y los ambientes (8). Asimismo, tienen tiempos de reproducción relativamente cortos y son muy sensibles a los cambios locales (30), lo que se observó en estudios en ambien-

tes no productivos asociados a rodales productivos, donde al menos cinco morfoespecies fueron encontradas en dichos sitios en forma exclusiva (13).

La cosecha forestal tradicional aplicada en Tierra del Fuego a los bosques de *Nothofagus pumilio* (26) afecta significativamente a la biodiversidad original (4, 15, 28), principalmente por los cambios que genera en la estructura del dosel forestal y por la homogeneización del paisaje a gran escala. La entomofauna es una de las más afectadas, ya que se pierde en promedio una especie cada 11 años a lo largo del ciclo del manejo forestal (28). Además, su abundancia sufre una explosión en las primeras etapas de crecimiento de la regeneración arbórea, y luego decrece gradualmente en etapas posteriores. Como alternativas para mitigar el impacto de estas intervenciones se han propuesto sistemas de regeneración con distintos grados y formas de retención, que pueden conservar parte de la estructura del bosque original en pie por más de un turno o ciclo de manejo (6). Estas prácticas están orientadas a mejorar la capacidad de conservación de los rodales aprovechados, manteniendo sectores no intervenidos y/o individuos intocables dentro de la estructura del bosque productivo afectado (5), debiendo evaluarse su aplicabilidad en Tierra del Fuego. Es por ello, que el objetivo

de este trabajo fue evaluar las variaciones sobre la diversidad (riqueza y abundancia) de lepidópteros antes de realizarse la corta en un gradiente de calidades de sitio, y durante los tres primeros años luego de implementarse distintos sistemas de regeneración en bosques primarios de *N. pumilio* en Tierra del Fuego (Argentina).

### Materiales y métodos

La muestra se obtuvo en una parcela experimental de 50ha de un bosque puro de *Nothofagus pumilio*, ubicada en la estancia San Justo (54° 05' S, 68° 37' O), Tierra del Fuego - Argentina. El bosque original tenía un área basal de 65-75m<sup>2</sup>/ha, 400-600 ind/ha, 40-45cm DAP y 680-780m<sup>3</sup>/ha de volumen total. En dicha área se ensayaron tres sistemas de regeneración: retención agregada (RA) dejando un 30% del bosque en forma de agregados circulares, a razón de uno por hectárea; retención dispersa (RD) dejando 20-30m<sup>2</sup>/ha de árboles maduros homogéneamente distribuidos a lo largo de toda la superficie; y un tratamiento combinado (RC) que incluye agregados de retención y 10m<sup>2</sup>/ha de retención dispersa entre los mismos. Asimismo, se conservó sin intervenir una parte de la superficie del bosque primario (BP), a modo de testigo, para comparar lo con los sectores de bosque intervenidos.

La diversidad de lepidópteros se evaluó durante el verano de cuatro años sucesivos, realizándose una línea base antes de la corta a lo largo de un gradiente de calidades de sitio, de acuerdo a la clasificación propuesta por Martínez Pastur *et al.* (16), y capturas en los tres primeros años después de la cosecha. El sistema de trapeo utilizado estuvo compuesto por trampas de luz fluorescente negra y blanca fría (21, 25) ubicadas en un gradiente de alturas, a nivel del sotobosque y a 3/4 de la altura total del dosel forestal. Cada trampa poseía una réplica y se mantuvo por dos días en cada tratamiento. Las trampas se distribuyeron aleatoriamente en las cercanías del centro geográfico de los rodales representativos para cada tratamiento. El agente de retención utilizado fue agua con algunas gotas de formol como conservante y detergente comercial para romper la tensión superficial.

Las capturas fueron cuantificadas y clasificadas a nivel de morfoespecies. Una morfoespecie es una unidad taxonómicamente reconocible que difiere claramente de otros por características morfológicas conspicuas y fácilmente separables (2, 19, 23). Su utilización ha sido propuesta en reemplazo de las especies verdaderas, ya que constituye una técnica rápida de evaluación de biodiversidad (19, 20). Esta técnica ha sido utiliza-

da exitosamente en bosques de *N. pumilio* en Tierra del Fuego (13, 14, 28). La riqueza y abundancia obtenidas se compararon mediante estudios de correlación y multivariados, usando para ello un ordenamiento por DCA (*Detrended Correspondence Analysis*) sin ponderación de especies raras y una clasificación mediante enlace completo y cálculo por distancias euclidianas. Para los análisis fueron utilizados los programas Statgraphics Plus 4.0 (Statistical Graphics Corp., Manugistics Inc., Maryland, USA) y PC-ORD (McCune y Mefford 1999).

### Resultados y discusión

Se analizaron 4437 individuos pertenecientes a 38 morfoespecies de la división Heterocera. Estos valores fueron similares a los registrados en otros estudios en Tierra del Fuego, habiéndose encontrado 37 morfoespecies de la misma división en la zona central del sector argentino de Tierra del Fuego (13). La extensión del período de muestreo a las horas de la noche y no solo durante el día, permitió capturar abundantes especies de lepidópteros nocturnos y mejorar enormemente las estimaciones de diversidad (1). Las abundancias y riquezas totales variaron a lo largo de los años (Cuadro I), siendo máximas inmediatamente después de producida la corta (36 morfoespecies en 2002)

y mínimas antes de realizarse la misma (21 morfoespecies en 2001). Ambas variables se correlacionaron positivamente ( $r^2 = 0,899$ ) luego de estandarizar los valores de acuerdo a los días de muestreo realizados cada año, pudiendo asociarse estos cambios a fluctuaciones anuales en los tamaños poblacionales. Aunque dichos aumentos poblacionales se debieran en gran parte a especies defoladoras en etapas larvales de su ciclo de vida, estas no representarían un riesgo para el recurso, ya que por ser *Nothofagus pumilio* una especie caducifolia, resiste mejor la presión de la herbivoría (10).

En el bosque primario sin intervención, la riqueza de lepidópteros fue similar en distintas calidades de sitio (Cuadro 2), compartiéndose entre todos ellos aproximadamente dos tercios de las especies observadas (Figura 1). De las especies restantes, dos fueron exclusivas de las mejores calidades de sitio (L21 y L33) y dos de la peor (L3 y L4), mientras que en sitios de calidad intermedia las especies exclusivas fueron cuatro (L27, L29, L30 y L36), y el resto se compartió entre pares de calidades de sitio. Las abundancias en cambio (Cuadro 2), fueron diferentes en sitios de distintas calidades, siendo mucho mayores bajo doseles medianamente altos y muy altos. Por otra parte, la riqueza específica total del bosque primario, considerando

**CUADRO I**

RIQUEZA Y ABUNDANCIA DE LEPIDÓPTEROS SEGÚN EL AÑO DE MUESTREO.

| Año          | Riqueza   | Abundancia  | Días de muestreo |
|--------------|-----------|-------------|------------------|
| 2001         | 21        | 302         | 9                |
| 2002         | 36        | 1936        | 8                |
| 2003         | 30        | 1301        | 8                |
| 2004         | 32        | 898         | 8                |
| <b>Total</b> | <b>38</b> | <b>4437</b> | <b>33</b>        |

los muestreos de todos los años, fue mayor que las obtenidas por separado. Esto podría deberse a: (a) fluctuaciones anuales de los tamaños poblacionales de ciertas morfoespecies (como L1, L3 o L9), que en ocasiones fueron muy abundantes y en otras solo estuvieron representadas por un ejemplar, o (b) baja frecuencia de ocurrencia de morfoespecies que usualmente habitan los bosques, por lo que muy raramente se capturaron en los muestreos o se colectaron pocos individuos independientemente de los años (como L10, L37 o L41). Respecto de la abundancia en el bosque primario (Cuadro II) se observaron fluctuaciones anuales importantes, llegando en los mejores años a sextuplicar la de los años más pobres.

Contrariamente a lo esperado, en los rodales intervenidos se observó igual o menor riqueza que en el bosque primario (Cuadro II) perdiéndose de 2 a 5

morfoespecies de las existentes en el sistema original e incorporándose una o dos según el tratamiento considerado (Figura 1). Las morfoespecies que se perdieron en los rodales aprovechados respecto del bosque primario fueron L23 y L43 en RD; L7, L10, L23, L44 y L45 en RC; y L16, L27 y L43 en RA. Las que se incorporaron luego de la intervención fueron L6 y L17 en RD; L46 en RC; y L17 en RA.

Cabe destacar que en RC todas las morfoespecies observadas los dos primeros años luego de producida la corta fueron propias del bosque primario (Cuadro 2), incorporándose una morfoespecie distinta recién en el año 2004. En cambio, en los otros sistemas silvícolas ensayados (RD y RA), la incorporación de especies se observó desde el año inmediato posterior a la corta, disminuyendo además la capacidad de conservación de especies propias de los bosques.

**CUADRO III**  
RIQUEZA Y ABUNDANCIA DE LEPIDÓPTEROS SEGÚN LA CALIDAD DE SITIO Y EL SISTEMA DE REGENERACIÓN IMPLEMENTADO. ENTRE PARENTÉISIS: RIQUEZAS Y ABUNDANCIAS COMUNES CON EL BOSQUE PRIMARIO.

| Año          | Sitio I-II |         | Sitio III  |             | Sitio IV-V |            | RA      |
|--------------|------------|---------|------------|-------------|------------|------------|---------|
|              | Abundancia | Riqueza | Abundancia | Riqueza     | Abundancia | Riqueza    |         |
| 2001         | 14         | 108     | 15         | 135         | 15         | 59         |         |
| Año          | BP         |         | RD         |             | RC         |            | RA      |
| Riqueza      | Abundancia | Riqueza | Abundancia | Abundancia  | Riqueza    | Abundancia |         |
| 2001         | 21         | 302     | --         | --          | --         | --         | --      |
| 2002         | 25         | 681     | 25 (24)    | 344 (339)   | 27 (27)    | 323 (323)  | 29 (28) |
| 2003         | 27         | 416     | 27 (25)    | 608 (605)   | 17 (17)    | 110 (110)  | 23 (23) |
| 2004         | 20         | 115     | 29 (28)    | 328 (327)   | 21 (20)    | 267 (266)  | 26 (26) |
| <b>Total</b> | 35         | 1514    | 35 (33)    | 1280 (1271) | 31 (30)    | 700 (699)  | 33 (32) |

Calidades de sitio de acuerdo a Martínez Pastur et al. (20). BP: bosque primario; RD: retención dispersa; RC: retención combinada; RA: retención agregada.

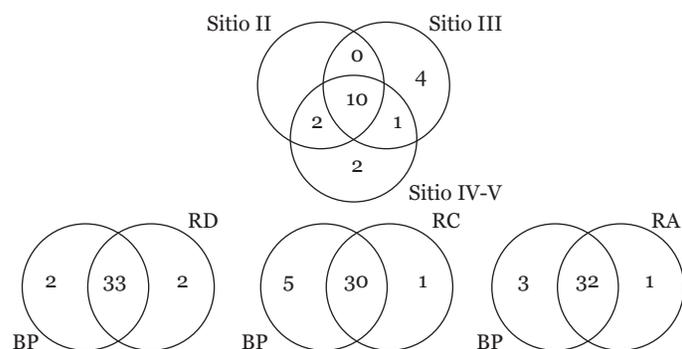


Figura 1. Solapamiento de morfoespecies entre calidades de sitio y sistemas de regeneración. Calidades de sitio de acuerdo a Martínez Pastur et al. (20). BP: bosque primario; RD: retención dispersa; RC: retención combinada; RA: retención agregada.

Los dos tipos de trampa utilizados capturaron similares valores de riqueza de lepidópteros en todos los ambientes (Cuadro III), excepto en RC donde las trampas de luz negra atrajeron 8 morfoespecies más que las de luz blanca. En el resto de los ambientes, y en ambos estratos, la mayor parte de las especies fueron capturadas indistintamente por trampas de luz negra o blanca. La abundancia, sin embargo, siempre fue mayor en las trampas de luz negra, abarcando entre el 59% y el 68% de las capturas en los distintos ambientes. Estos resultados concordaron con las observaciones de Lencinas (11), quien capturó mayor riqueza y abundancia de lepidópteros en trampas de luz negra. Respecto de los niveles dentro del dosel, y tal como fue observado por Lencinas (11), la riqueza en términos generales

fue mayor en el sotobosque que en las copas en casi todos los ambientes (Cuadro III), excepto en RA donde esta fue similar en ambos estratos. Esto se debería tanto a que el sistema de retención agregada afecta la composición y el desarrollo del sotobosque, modificando las características microclimáticas propias del bosque sin intervención y por ende a las especies que lo habitan, como a que favorece el ingreso a las copas de especies de otros ambientes, aumentando tanto su riqueza como su abundancia. Por otra parte, las especies compartidas entre estratos fueron una alta proporción de la riqueza de cada uno de ellos, independientemente del tipo de trampa utilizado, salvo para RC en la luz blanca, donde solo la mitad de las especies estuvieron en los dos estratos. La abundancia, en cambio, solo

**CUADRO III**  
 RIQUEZA Y ABUNDANCIA EN DISTINTOS SISTEMAS DE REGENERACIÓN SEGÚN TIPO DE TRAMPA Y GRADIENTE VERTICAL DENTRO DEL DOSEL FORESTAL. EL PRIMER VALOR ENTRE PARENTESIS INDICA LA RIQUEZA COMPARTIDA ENTRE NIVELES PARA UNA MISMA TRAMPA, MIENTRAS QUE EL SEGUNDO SE REFIERE A LA RIQUEZA COMPARTIDA ENTRE TRAMPAS PARA UN MISMO NIVEL DENTRO DEL DOSEL FORESTAL.

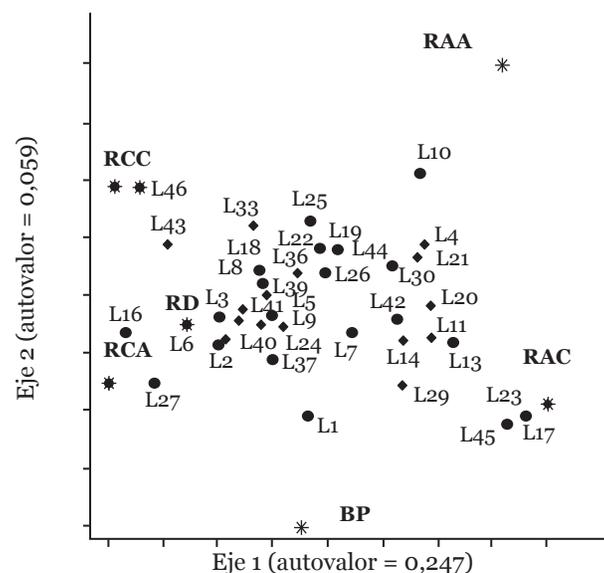
| Tratamiento | Nivel respecto del dosel forestal | Luz blanca |            | Luz negra |            | Total   |            |
|-------------|-----------------------------------|------------|------------|-----------|------------|---------|------------|
|             |                                   | Riqueza    | Abundancia | Riqueza   | Abundancia | Riqueza | Abundancia |
| BP          | Copas                             | 23(20,20)  | 20%        | 20(19,20) | 22%        | 23      | 42%        |
|             | Sotobosque                        | 26(20,23)  | 20%        | 30(19,23) | 37%        | 33      | 57%        |
|             | Total                             | 29         | 40%        | 31        | 59%        | 35      | 100%       |
| RD          | Copas                             | 17(17,14)  | 4%         | 20(20,14) | 56%        | 23      | 60%        |
|             | Sotobosque                        | 31(17,29)  | 28%        | 33(20,29) | 12%        | 35      | 40%        |
|             | Total                             | 31         | 32%        | 33        | 68%        | 33      | 100%       |
| RC          | Copas                             | 16(8,13)   | 9%         | 18(17,13) | 54%        | 21      | 63%        |
|             | Sotobosque                        | 13(8,13)   | 25%        | 28(17,13) | 12%        | 28      | 37%        |
|             | Total                             | 21         | 34%        | 29        | 66%        | 31      | 100%       |

BP: bosque primario; RD: retención dispersa; RC: retención combinada; RA: retención agregada.

fue mayor a nivel del sotobosque en el bosque primario, ya que en *RD* y en *RC* fue mayor en las copas, mientras que en *RA* fue similar en los dos niveles de altura dentro del dosel.

El ordenamiento simultáneo de los sitios de muestreo y las

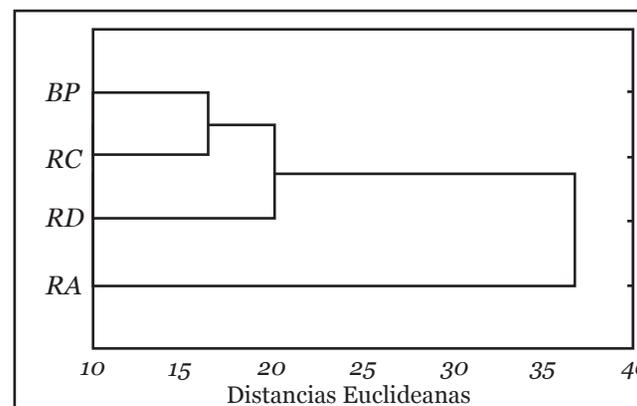
especies (Figura 2) ubica al área fuera de los agregados del sistema de retención agregada pura (*RAA*) en la posición más alejada respecto de *BP*, dejando al resto de los tratamientos en el espacio intermedio. De esta forma, el eje 1 se asocia principalmente a la



**Figura 2.** Ordenamiento de los sistemas de regeneración por abundancia de lepidópteros. *BP*: bosque primario; *RD*: retención dispersa; *RCC*: centro de agregados en retención combinada; *RCA*: exterior de agregados en retención combinada; *RAC*: centro de agregados en retención combinada; *RAA*: exterior de agregados en retención agregada.

forma de la retención, separando a la retención agregada (a la derecha) de la dispersa (a la izquierda). El eje 2 en cambio, se relaciona con el grado de apertura del dosel desde la situación original de *BP* donde no hay mayores aperturas (abajo) hasta el

área fuera de los agregados en *RA* (arriba), que es similar a una tala rasa. Complementariamente, la clasificación (Figura 3) reflejó una mayor similitud entre *BP* y *RC*, grupo que a su vez fue más parecido a *RD* que a *RA*. De esta forma, ambos análisis



**Figura 3.** Clasificación de los sistemas de regeneración en base a la abundancia de lepidópteros. *BP*: bosque primario; *RD*: retención dispersa; *RC*: retención combinada; *RA*: retención agregada.

demonstrarían que las mayores diferencias en abundancia de morfoespecies de lepidópteros con *BP* se producirían en *RA*, siendo la retención combinada el sistema de regeneración que mejor conserva las condiciones del bosque original.

La abundancia de los lepidópteros no solo se encuentra relacionada a los cambios en la estructura forestal, sino que es afectada por las variaciones que se producen en las poblaciones de las especies que los consumen. Existe una marcada correlación entre la abundancia de los insectos y las variaciones que se producen por el manejo forestal entre otros grupos poblacionales (4). Es posible que la diversidad y abundancia de lepidópteros esté regulada por las poblaciones de aves, princi-

palmente de Passeriformes, que presentan variaciones importantes dentro del bosque luego de las intervenciones (12). Los resultados obtenidos en este trabajo, deberían ser complementados con este tipo de estudios, analizando conjuntamente los cambios entre los distintos componentes del bosque.

## CONCLUSIONES

Las especies de lepidópteros más abundantes en los bosques de *Nothofagus pumilio* pertenecen a la división Heterocera, y no presentan variaciones de diversidad entre calidades de sitio, por cuanto el valor de conservación entre distintos rodales productivos no varía significativamente. El manejo forestal produce cambios importantes

en la abundancia, afectando a unas pocas especies del bosque original que desaparecen después de la corta. Los sistemas de retención agregada permiten mantener sectores del bosque conservando las condiciones originales del ecosistema. Estos sectores presentan una diversidad y abundancia de lepidópteros que son más similares al bosque primario que los sectores intervenidos. Es por ello, que su aplicación mejora las cualidades de conservación de los bosques aprovechados en relación con la aplicación de sistemas tradicio-

nales, *i.e.* la corta de protección.

### Agradecimientos

A Isabel Gamondés Moyano, Lucas Larralde, Yanina Mariottini, Florencia González Otharán, Carolina Llavallol, Rosana Solán e Ignacio Mundo por su colaboración en las tareas de campo. A Ricardo Vukasovic, Ramiro Vicente, Boris Díaz, Emiliano Walter y Marcelo Brouver por su participación invaluable en la realización de las cortas de los distintos sistemas de aprovechamiento.

### LITERATURA CITADA

- (1) Basset, Y. 1999. Diversity and abundance of insect herbivores foraging on seedlings in a rainforest in Guyana. *Ecol. Entomol.* Vol. 24, 245-259.
- (2) Basset, Y., V. Novotny, S. E. Miller y R. Pyle. 2000. Quantifying biodiversity: experience with parataxonomists and digital photography in Papua New Guinea and Guyana. *BioScience* Vol. 50, N° 10, 899-908.
- (3) Bauerle, P., P. Rutherford y D. Lanfranco. 1997. Defoliadores de roble (*Nothofagus obliqua*), raulí (*N. alpina*) y lenga (*N. pumilio*). *Bosque* Vol. 18, N° 2, 97-107.
- (4) Deferrari, G., C. Camilión, G. Martínez Pastur y P. Peri. 2001. Changes in *Nothofagus pumilio* forest biodiversity during the forest management cycle: Birds. *Biodiv. Conserv.* Vol. 10, N° 12, 2093-2108.
- (5) Franklin, J. 1993. Preserving biodiversity: Species, ecosystems or landscapes? *Ecol. Appl.* Vol. 3, 202-205.
- (6) Franklin, J. y R. Forman. 1987. Creating landscape patterns by forest cutting: Ecological consequences and principles. *Landsc. Ecol.* Vol. 1, 5-18.
- (7) Gentili, M. y P. Gentili. 1988. Lista comentada de los insectos asociados a las especies sudamericanas del género *Nothofagus*. *Mon. Ac. Nac. Cs. Exactas, Físicas y Nat. Bs. As.* Vol. 4, 85-106.
- (8) Kim, K. 1993. Biodiversity, conservation and inventory: why insects

- matter. *Biodiv. Conserv.* Vol. 2, 191-214.
- (9) Lanfranco, D. 1977. Entomofauna asociada a los bosques de *Nothofagus pumilio* en la región de Magallanes. 1° parte: Monte Alto (Río Rubens, Última Esperanza). *An. Inst. Patagonia*, Vol. 8, 319-346.
- (10) Lanfranco, D. 1991. Sinopsis de los insectos que atacan bosques de lenga (*Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl. Krass.)) en Magallanes. *An. Inst. Patagonia, Serie Cs. Nat.* Vol. 20, 89-93.
- (11) Lencinas, M. V. 2005. Biodiversidad en el bosque productivo de *Nothofagus pumilio* y sus ambientes asociados en Tierra del Fuego. Tesis Doctoral. Univ. Nac. del Sur (Argentina).
- (12) Lencinas, M. V., E. Gallo, G. Massaccesi, Y. Mariottini, I. Gamondés, L. Larralde, G. Martínez Pastur y C. Busso. 2002. Modificación de la diversidad de aves frente a diferentes cortas de regeneración en bosques de *Nothofagus pumilio*. I Congr. Chileno de Ciencias Forestales, Santiago (Chile), p. 90.
- (13) Lencinas, M. V., G. Martínez Pastur y C. Busso. 2001. Diversidad de lepidópteros en ambientes asociados al bosque productivo de *Nothofagus pumilio* en Tierra del Fuego. V Congr. Latinoam. Ecol., Jujuy (Argentina), 15-19 de octubre.
- (14) Lencinas, M. V., G. Martínez Pastur, J. M. Cellini, C. Busso y E. Gallo. 2003. Manejo forestal sustentable en Patagonia: decisiones basadas en la biodiversidad. XII Congr. For. Mundial, Québec (Canadá), 21-28 de septiembre.
- (15) Martínez Pastur, G., P. Peri, M. C. Fernández, G. Staffieri y M. V. Lencinas. 2002. Changes in understory species diversity during the *Nothofagus pumilio* forest management cycle. *J. For. Res.* Vol. 7, N° 3, 165-174.
- (16) Martínez Pastur, G., P. Peri, R. Vukasovic, S. Vaccaro y V. Piriz Carrillo. 1997. Site index equation for *Nothofagus pumilio* Patagonian forest. *Phyton* Vol. 6, N° 1/2, 55-60.
- (17) Mcquillan, P. 1993. *Nothofagus* (Fagaceae) and its invertebrate fauna – an overview and preliminary synthesis. *Biol. J. Linn. Soc.* Vol. 49, 317-354.
- (18) Niemela, J. 1990. Habitat distribution of carabid beetles in Tierra del Fuego, South America. *Entomol. Fennica* Vol. 29, N° VI, 3-16.
- (19) Oliver, I. y A. J. Beattie. 1993. A possible method for the rapid assessment of biodiversity. *Conserv. Biol.* Vol. 7, N° 3, 562-568.
- (20) Oliver, I., A. Pik, D. Britton, J. Dangerfield, R. Colwell y A. Beattie. 2000. Virtual biodiversity assessment systems. *BioScience* Vol. 50, N° 5, 441-450.
- (21) Pastrana, J. A. 1985. Caza, preparación y conservación de insectos. Ed. El Ateneo.

- (22) Petersen, J. G. 1988. Chilecomadia valdiviana (Philippi) (Lepidoptera: Cossidae) asociado a Nothofagus pumilio (Poepp. et Endl Krasser) (lenga) en la Región de Magallanes. An. Inst. Patagonia, Serie Cs. Nat. Vol. 18, 51-55.
- (23) Richardson, B. J., F. F. Azarbayjani, S. Burgin y S. Richardson. 1999. Arboreal arthropod biodiversity in woodlands: Effect of collection procedures and geographic distance on estimates of diversity found on two species of Melaleuca. Australian J. Ecol. Vol. 24, 544-554.
- (24) Roig-Juñent, S., J. V. Crisci, P. Posadas y S. Lagos. 2002. Áreas de distribución y endemismo en zonas continentales. En, PRIBES. Monografías Tercer Milenio. Costa, Vanin, Lobo y Melic (Eds.). SEA, Zaragoza, España, Vol. 2, 247-266.
- (25) Ross, H. 1973. Introducción a la entomología general y aplicada. Ed. Omega, Barcelona.
- (26) Schmidt, H. y A. Urzúa. 1982. Transformación y Manejo de los Bosques de Lengua en Magallanes. Cs. Agr. N° 11, 62 p.
- (27) Solervicens, J. 1995. Entomology. Informe del Subproyecto 94-14. Estudios de línea base: Proyecto Río Cóndor (Chile), 79 p.
- (28) Spagarino, C., G. Martínez Pastur y P. Peri. 2001. Changes in Nothofagus pumilio forest biodiversity during the forest management cycle: 1. Insects. Biodiv. Conserv. Vol. 10, 2077-2092.
- (29) Welch, R. 1988. Phytophagous insects on deciduous Nothofagus in Chile and Argentina. Mon. Ac. Nac. Cs. Exactas, Físicas y Nat. Bs. As. Vol. 4, 107-114.
- (30) Werner, S.M. y K.F. Raffa. 2000. Effects of forest management practices on the diversity of ground-occurring beetles in mixed northern hardwood forests of the Great Lakes Region. For. Ecol. Manage, Vol. 139, 135-155.
- (31) sistemas de regeneración. Calidades de sitio de acuerdo a Martínez Pastur et al. (20). BP: bosque primario; RD: retención dispersa; RC: retención combinada; RA: retención agregada.

## La productividad investigativa de los docentes del Programa Ingeniería y Tecnología de la Universidad Nacional Experimental Rafael María Baralt

The research productivity of teachers of Engineering and Technology Program of the National Experimental University Rafael María Baralt

*Yamelis Pérez Colmenares\**

### Resumen

El propósito del estudio fue describir las características de la productividad investigativa de los docentes adscritos al Programa de Ingeniería y Tecnología de la Universidad Nacional Experimental Rafael María Baralt. Es de tipo descriptivo, y se realizó bajo la comprensión de la investigación holística; se utilizó un diseño descriptivo transeccional contemporáneo univariable de campo, utilizando para la recolección de los datos fuentes vivas. El evento de estudio fue la productividad investigativa, y las unidades de estudio fueron los docentes del PIT (Programa de Ingeniería y Tecnología). La muestra fue de (103) docentes. La técnica de muestreo es no probabilística de tipo intencional. La técnica de recolección de datos fue la encuesta y se utilizó como instrumento el cuestionario. Se validó el instrumento mediante el juicio de expertos en el área académica y de investigación, arrojando unos índices de va-

Recibido el 03/12/2009. Aceptado el 20/02/2010  
E-mail del autor para correspondencia: perezzyame@hotmail.com

\* MSc. Programa de Ingeniería y Tecnología de la UNERMB. Proyecto de Ingeniería en Mantenimiento Mecánico/Proyecto de Ingeniería en Gas. Urbanización Libertad Calle Las Palmas N° 335. Ciudad Ojeda, Estado Zulia. Telf.: 0265 6318106.

lidad de 0,84 y 0,89. Los resultados de la investigación se centran en que los docentes del PIT realizan pocas actividades relacionadas a la investigación. Se determinó que la productividad investigativa de los docentes es poco significativa, se encuentra muy por debajo del 50%; muy pocos docentes divulgan y comparten los resultados productos de sus investigaciones. Asimismo, son pocos los docentes que pertenecen y generan líneas de investigación. Sólo el 12% de la muestra están inscritos en líneas de investigación, lo cual es un valor muy bajo, considerando que si un docente realiza trabajos de investigación, deberían divulgarlos y continuar con los otros niveles de dichas investigaciones.

**Palabras clave:** Investigación, holística, educación

### **Abstract**

The intention of the study was to describe the educational characteristics of the research productivity of assigned to the Program of Engineering and the Technology of the National University Experimental Rafael María Baralt. It is of descriptive type, and it was realised under the understanding of the holistic investigation; a descriptive design was used transeccional univariable contemporary of field, using for the harvesting of the source data cheers. The study event was the research productivity, and the units of studies were the educational ones of the PIT (Program of Engineering and Technology). The sample was of (103) educational. The type of sampling is probabilistic and the technique was intentional. The technique of data collection was the survey and the questionnaire was used like instrument. The instrument by means of the judgment of experts in the academic area and investigation was validated, throwing indices of validity of 0,84 and 0,89. The results of the investigation concentrate in which the educational ones of the PIT realise few activities related to the investigation. It was determined that the research productivity of the educational ones is little significant, is very below 50%; very few educational ones disclose and share the results products of their investigations. Also, the educational ones are few that belong and generate lines of investigation. Only 12% of the sample are enrolled in lines of investigation, which is a very low value, considering that if an educational one carries out works of investigation, had to disclose them and to continue with the other levels of these investigations.

**Key words:** Investigation, holistic, research productivity

### **INTRODUCCIÓN**

La investigación tiene una función ineludible en todas las universidades del mundo, tanto a nivel de pregrado como en el de postgrado; ya que nutre a sus actores en distintos niveles y contribuye significativamente a mejorar las condiciones de vida de los individuos y su comunidad, así como a impulsar el desarrollo de una sociedad o un país.

Por su parte, en Venezuela, en 1999 se crea el Ministerio de Ciencia y Tecnología actualmente Ministerio del Poder Popular para Ciencia y Tecnología como parte de la profundas transformaciones implementadas para dar al estado una estructura y funcionalidad coherentes al nuevo proyecto de país y en aras de que los productos de la ciencia, la tecnología y la innovación se articulen permanentemente y se orienten para agregar valor a los componentes reales del desarrollo sustentable (13).

Uno de los programas de este ente gubernamental, en pro del nuevo país, es la Calidad de la Educación, el cual refiere el desarrollo del talento humano en todos sus niveles, con el objeto de incrementar la capacidad técnico-científica, y estimular la creatividad y el conocimiento del venezolano (4). Dicho incremento y estímulo, son condiciones básicas para lograr la eficiencia en un proceso de in-

vestigación.

De modo que, el Programa de Investigación (PI) de la Universidad Nacional Experimental Rafael María Baralt (UNERMB), a través del Consejo de Desarrollo Científico Humanístico y Tecnológico (CDCHT) como organismo rector de la investigación científica y tecnológica en la institución, ha orientado sus acciones en fortalecer y consolidar la función investigativa de los docentes en la universidad.

Acciones que tienen que ver con la divulgación y negociación de los resultados de las investigaciones desarrolladas en la comunidad universitaria y fuera de ella; con establecer mecanismos institucionales para la promoción, estímulo, fomento y evaluación de la investigación; pero evaluar, de forma permanente para producir los cambios pertinentes que representan en la docencia y la extensión universitaria.

Desde estas perspectivas, el presente trabajo, está orientado a describir las características relacionadas a la actividad investigativa de los docentes del PIT (Programa de Ingeniería y Tecnología) de la UNERMB, y de esta forma dar inicio a una posible línea de investigación que permita orientar el trabajo académico, que tenga como norte fomentar todas las actividades que despierten y potencien el espíritu investigador, así como visualizar la actividad científica

con criterios de continuidad.

El sustento filosófico y metodológico está basado en la concepción integradora de la investigación holística. Además el diseño toma como referencia tanto a investigaciones anteriores en relación a la problemática investigativa en el país, como el diagnóstico preliminar llevado a cabo con los docentes adscritos al PIT.

De manera que, el estudio comprende no sólo una descripción de la situación actual, el mismo pretende trascender lo que siempre parece obvio con respecto a la investigación en el sistema de educación superior, a partir de una perspectiva diferente.

### **Contextualización de la temática y objetivos de la investigación**

Muchos estudios, tales como los de Carlos Tunnermann y Víctor Morles, por ejemplo, los cuales refieren al desarrollo investigativo en América Latina, y principalmente los referidos a problemas de la investigación en las universidades y en los postgrados, han intentado identificar los factores que han generado la situación actual de la investigación.

Dichos estudios han señalado, entre otros, los siguientes: el escaso presupuesto, la falta de incentivos salariales a los investigadores, primacía de la

docencia sobre la investigación, carencia de centros de información y documentación, escasez de mecanismos institucionales que promuevan y coordinen la investigación. Sin embargo, éstos son en realidad síntomas o expresiones de la misma problemática; son indicadores de cómo está la investigación en América Latina, pero no pueden considerarse factores explicativos (6). Así que, en todas las instituciones de educación superior de Venezuela, es de vital importancia el proceso de investigación para el docente, tanto en las ciencias naturales como en las ciencias sociales.

En tal sentido, las instituciones que se dedican a la educación superior, los altos estudios y a la investigación, se han considerado claves en el proceso de formación de recursos humanos en ciencia y tecnología, así como las políticas para la retención de este personal. Pues, dentro del contexto académico, es la educación de postgrado la que está llamada a vincular estrechamente la formación especializada con la producción científica, tecnológica y humanística (5).

No obstante, en Venezuela, existen iniciativas puntuales exitosas, pero la intervención del estado es fundamental para crear procesos generalizados de innovación, ciencia y tecnología, y la inserción competitiva del país, dentro de los escenarios internacionales.

En efecto, el SNCTI (Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación), engloba las actividades de dicho sistema bajo un marco legal específico publicado en el 2001 y todo bajo los lineamientos del Ministerio del Poder Popular para Ciencia y Tecnología como ente rector.

Asimismo, el PNCTI (Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación) 2005-2030, se sustenta en el marco legal que establece la CRBV (Constitución de la República Bolivariana de Venezuela) en su artículo 110 y en la LOCTI (Ley orgánica de Ciencia, Tecnología e Innovación) en sus artículos 11 al 19 (9), de acuerdo a esa orientación, se recogió gran cantidad de opiniones a diferentes actores pertenecientes al SNCTI (Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación), acerca de cómo la Ciencia, la Tecnología y la Innovación contribuyen con el desarrollo del país. Para ello, se definió un marco de acción a 25 años, con la idea de recuperar la capacidad de soñar un mundo mejor y posible, a partir de una ciencia, tecnología e innovación con y para la gente.

Cabe señalar, que es en las Universidades, principalmente en las públicas, donde se realizan la mayor parte de las actividades de I+D (Investigación y Desarrollo) del país, financiadas casi totalmente, con fondos del Estado (11, 12).

Sin embargo, existen pocos

incentivos para desarrollar la carrera del investigador y problemas presupuestarios para apoyar las actividades de I+D en las universidades. Caso contrario sucede, como que las actividades de investigación, de desarrollo y de Innovación, son inexistentes, insuficientes o escasamente utilizadas por el sector privado. Esto en comparación con los países desarrollados y con las recomendaciones de la UNESCO (Unión de las Naciones para la Educación, la Ciencia y la Cultura) para países en desarrollo (4).

De modo que, a pesar de los excelentes profesionales con grado de Magíster y/o Doctor formados en prestigiosas instituciones nacionales e internacionales y que se desempeñan en dichas instituciones, las investigaciones son financiadas con fondos del Estado, los resultados obtenidos en la formación de investigadores y en la producción científica difieren sustancialmente de los resultados esperados, por ejemplo, referido en relación a las normas de 10/10.000 establecidas por la UNESCO; es decir, diez científicos por cada diez mil habitantes para nivelar el avance tecnológico (7).

Ahora bien, en el caso particular de la UNERMB (Universidad Nacional Experimental Rafael María Baralt), el PI-CDCHT (Programa de Investigación-Consejo de Desarrollo Científico

Humanístico y Tecnológico), es el organismo rector de la investigación científica y tecnológica de la institución, el cual, desde su creación en el año 1990, se orienta en sus acciones a fortalecer y consolidar la función investigativa en dicha institución (10).

A su vez, la universidad cuenta con uno de los Programas académicos de formación a nivel de pregrado de más pertinencia científica y social de la subregión COLM (Costa Oriental del lago de Maracaibo), es decir, el PIT (Programa de Ingeniería y Tecnología), el mismo se rige por los lineamientos y políticas de dicho organismo rector de la investigación de la institución, sin embargo, hay poca actividad de los docentes en lo que a investigaciones se refiere, lo cual destaca la existencia de una situación que no coincide con lo ideal y lo pertinente al desempeño investigativo del docente en las instituciones de educación superior (3).

En función de lo dicho, mediante datos suministrados

por la Coordinación Docente del PIT, para el período lectivo 2007-II, el Programa cuenta con una plataforma profesoral de 139 docentes pertenecientes a los dos Proyectos: El PIMM (Proyecto de Ingeniería en Mantenimiento Mecánico) y el PIGAS (Proyecto de Ingeniería de Gas). Cabe destacar, que para este estudio, no se tomaron en cuenta los docentes con categoría de auxiliares, los cuales suman 10.

El Cuadro I muestra, que la cantidad de docentes que tienen estudios de postgrado de Maestrías y Doctorados (se suman los que obtuvieron el grado académico más los que están actualmente estudiando), es de 78; es decir, representa el 56% de los profesores del PIT, lo que es considerado una cantidad insuficiente. Ya que, como mínimo, el 75% de los docentes en las universidades, debieran ser investigadores (6), esto en relación a las normas de 10/10000 establecidas por la UNESCO.

Cabe resaltar, contrariamente a lo que se piensa, postgrado

no necesariamente es igual a investigación, por lo menos en las evidencias que aportan los hechos (7). Es decir si realmente las maestrías están alcanzando su propósito de formar investigadores, y la educación superior en general está aportando elementos en este sentido, esto debería verse reflejado en los logros investigativos de los egresados, pero sin embargo, continúa señalando dicha autora, debido a diversos estudios realizados éstos muestran otra realidad.

El Cuadro II muestra, que solo 46 de estos 78 docentes tienen el grado académico, mientras que 32, están estudiando y no hay certeza de que terminen sus estudios, y como mínimo logren el grado académico, y al menos realizar una investigación para

optar a dicho grado; en consecuencia, la cantidad total de docentes con estudios de postgrado, es muy bajo.

Por lo tanto, parte de las inquietudes de la autora de este trabajo de investigación es, el bajo e insuficiente nivel de desarrollo académico e investigativo de los docentes del PIT (Programa de Ingeniería y Tecnología), capaces de dar respuesta a los principales problemas de la región y del país. Lo cual destaca la existencia de una situación que no coincide con lo ideal y lo pertinente al desempeño investigativo del docente en las instituciones de educación superior.

Ante estos planteamientos, se evidencia la necesidad de indagar con mayor fuerza en torno a la productividad investigativa

**CUADRO I**  
PLATAFORMA DE DOCENTES DEL PIT

| Docentes del PIT       | Cantidad   | %          |
|------------------------|------------|------------|
| Con estudios Postgrado | 78         | 56         |
| Sin estudios Postgrado | 61         | 44         |
| <b>Total</b>           | <b>139</b> | <b>100</b> |

Fuente: Coordinación PIT, 2007.

**CUADRO II**  
DOCENTES DEL PIT CON ESTUDIOS DE POSTGRADO

| Docentes con estudios culminados | Condición Contratado |    |    | Condición Ordinario |    |    | Sub Total | Total                     |
|----------------------------------|----------------------|----|----|---------------------|----|----|-----------|---------------------------|
|                                  | Conv                 | TC | DE | Conv                | TC | DE |           |                           |
| <b>Maestría</b>                  | 1                    | 11 |    | 2                   |    | 21 | 35        | <b>46</b><br><b>(33%)</b> |
| <b>Doctorado</b>                 |                      | 2  |    |                     |    | 9  | 11        |                           |
| Docentes cursando estudios       | Conv                 | TC | DE | Conv                | TC | DE | Sub Total | <b>32</b><br><b>(23%)</b> |
| <b>Maestría</b>                  |                      | 19 |    |                     |    | 10 | 29        |                           |
| <b>Doctorado</b>                 |                      | 1  |    |                     |    | 2  | 3         |                           |
| <b>Total</b>                     |                      |    |    |                     |    |    |           | <b>78</b><br><b>(56%)</b> |

Fuente: Coordinación PIT, 2007.

de los docentes en el Programa de Ingeniería y Tecnología de la UNERMB, más aún, para futuras investigaciones, la posibilidad de desarrollar estrategias o un modelo teórico que permita superar la problemática planteada, o aportar posibles soluciones.

El objetivo general de la investigación fue, describir las características de la productividad investigativa de los docentes adscritos al Programa de Ingeniería y Tecnología de la Universidad Nacional Experimental Rafael María Baralt. Formulándose, unos objetivos específicos que permitieran:

- Describir cuáles son las actividades académicas, científicas y de investigación que actualmente realizan los docentes del PIT

- Describir aspectos fundamentales que toman en cuenta los docentes, al momento de realizar un trabajo de investigación, en relación a la pertinencia, eficiencia, calidad, novedad y continuidad de dicho trabajo

- Describir aspectos relacionados al desarrollo de Líneas de investigación por parte de los docentes del PIT

### **Sintagma gnoseológico. Generalidades**

El sintagma gnoseológico comprende el proceso de revisión e integración que se realiza como parte de la fundamentación conceptual, teórica y referencial del trabajo de investigación.

La investigación, forma parte de la triada de la educación superior, fundamentada en principios y prácticas académicas necesarias para desempeñarse bien sea como profesional o como investigador. Por su parte, bajo la comprensión de la investigación holística, la cual integra diferentes criterios epistémicos, se define la investigación, como un proceso que genera conocimiento nuevo, no sólo para el investigador, sino también para la comunidad científica, mediante la indagación sistemática y organizada, estructurada o no estructurada, que se efectúa en el campo de los acontecimientos, ya sea en ambientes naturales o espontáneos, recreados o de laboratorio, o a partir de registros previos (5).

En referencia a Investigación e integración en la Educación Superior, ésta tiene un doble compromiso en investigación, por una parte producir conocimiento y divulgarlo y por otra parte formar profesionales que desarrollen habilidades, destrezas y capacidades que les permitan realizar investigaciones que contribuyan a solucionar las necesidades de la sociedad y que hagan aportes al desarrollo de la ciencia y a la generación de explicaciones propias, de allí que el proceso de Investigación se convierte en el eje integrador de

la acción formadora (8). En el nivel de pregrado y en el de postgrado el hombre en formación debe desarrollar competencias en investigación, entre las que destacan:

- Comprensión, análisis y ejecución de los componentes empírico, teórico y metodológico que intervienen en el proceso de investigación.
- La capacidad para la percepción, la aprehensión, la producción de ideas, el trabajo en equipo, liderazgo, adaptabilidad, flexibilidad y administración de recursos,
- Desarrollo de herramientas para observar, identificar, categorizar, razonar, comprender, sistematizar, socializar y generalizar el conocimiento, en suma para integrar conocimiento.
- Promover la participación, conducir grupos, desarrollar la amplitud de ideas, tomar decisiones en conjunto, propiciar cambios, atender normas y políticas, formular estrategias de acción, gestionar alianzas, desarrollar líneas de investigación, planificar y ejecutar proyectos y utilizar los recursos que tenga al alcance.

Unas de las competencias que debe desarrollar el investigador son las propias de la actitud científica, entendida como la disposición positiva para hacer ciencia, lo que responde a un conjunto de creencias o conocimientos e informaciones, también valores, habilidades, com-

petencias que debe desarrollar el sujeto y el colectivo investigador. De modo que, no basta con desarrollar estrategias y actividades apropiadas al logro de los objetivos propios de la formación de investigadores. Es necesario además que el docente, durante cada una de sus actividades, mantenga una actitud y unos principios metodológicos que se expresen como constantes durante toda su labor, los cuales promuevan la autonomía de pensamiento en los estudiantes y su formación integral (7). Estos principios son: la participación, trabajo en equipos, modelaje y asesoría permanente.

En otro orden de ideas, en referencia a la Educación e investigación, uno de los aspectos característicos de la condición humana lo es la capacidad para investigar. La evolución social e histórica transcurre bajo variadas circunstancias derivadas de la condición investigativa. El desarrollo de la personalidad, la adquisición de conocimiento, el habla, el trabajo, en fin, todo lo que el ser humano crea, desarrolla y produce está profundamente relacionado con la investigación. De ahí que el humano sea un investigador natural: nace con la facultad de preguntar, de indagar, de aprender, de conocer. Sin embargo, no le basta esta condición natural pues debe en todo momento y bajo diversas circunstancias poten-

petencias que debe desarrollar el sujeto y el colectivo investigador. De modo que, no basta con desarrollar estrategias y actividades apropiadas al logro de los objetivos propios de la formación de investigadores. Es necesario además que el docente, durante cada una de sus actividades, mantenga una actitud y unos principios metodológicos que se expresen como constantes durante toda su labor, los cuales promuevan la autonomía de pensamiento en los estudiantes y su formación integral (7). Estos principios son: la participación, trabajo en equipos, modelaje y asesoría permanente.

En otro orden de ideas, en referencia a la Educación e investigación, uno de los aspectos característicos de la condición humana lo es la capacidad para investigar. La evolución social e histórica transcurre bajo variadas circunstancias derivadas de la condición investigativa. El desarrollo de la personalidad, la adquisición de conocimiento, el habla, el trabajo, en fin, todo lo que el ser humano crea, desarrolla y produce está profundamente relacionado con la investigación. De ahí que el humano sea un investigador natural: nace con la facultad de preguntar, de indagar, de aprender, de conocer. Sin embargo, no le basta esta condición natural pues debe en todo momento y bajo diversas circunstancias poten-

petencias que debe desarrollar el sujeto y el colectivo investigador. De modo que, no basta con desarrollar estrategias y actividades apropiadas al logro de los objetivos propios de la formación de investigadores. Es necesario además que el docente, durante cada una de sus actividades, mantenga una actitud y unos principios metodológicos que se expresen como constantes durante toda su labor, los cuales promuevan la autonomía de pensamiento en los estudiantes y su formación integral (7). Estos principios son: la participación, trabajo en equipos, modelaje y asesoría permanente.

En otro orden de ideas, en referencia a la Educación e investigación, uno de los aspectos característicos de la condición humana lo es la capacidad para investigar. La evolución social e histórica transcurre bajo variadas circunstancias derivadas de la condición investigativa. El desarrollo de la personalidad, la adquisición de conocimiento, el habla, el trabajo, en fin, todo lo que el ser humano crea, desarrolla y produce está profundamente relacionado con la investigación. De ahí que el humano sea un investigador natural: nace con la facultad de preguntar, de indagar, de aprender, de conocer. Sin embargo, no le basta esta condición natural pues debe en todo momento y bajo diversas circunstancias poten-

ciar la actividad investigativa.

Así, algunas personas logran desarrollar más la condición indagativa, como ocurre en las facultades, incluyendo la voluntad y la inteligencia, pero en todos reside esa potencialidad de buscar, de descubrir, de interpelar y de aprender. Corresponde a la educación la tarea de propiciar que la condición indagativa humana aflore con toda su potencialidad, que a su vez sea orientada hacia los propósitos considerados fundamentales, y éstos tienen que ver con la realización íntegra, personal y social.

La educación y la investigación se deben una a otra. La investigación produce la educación, la educación potencia la investigación, ambos permiten que el ser humano se recree, se perfeccione, se desarrolle y se realice en el espacio tiempo (1).

De allí, que surja la dimensión investigativa de la educación, como una condición necesaria para que la misma educación ocurra dentro de los parámetros formales, pero soportada sobre condiciones humanas, según los requerimientos de cada quien, cosa a veces paradójica, pues si bien la dimensión investigativa es una condición universal, fruto de la condición holista de la naturaleza humana, también es cierto que la misma se manifiesta según los valores, la personalidad, los rasgos culturales, en cada contexto y depende de cada quien.

Esto lleva a entender que, la investigación, así como la educación, deben obedecer a contexto, eventos, situaciones muy particulares, y deben relacionarse con aspectos de carácter más amplio como bien pueden ser los avances del pensamiento, la tecnología de la época, las ideas, los valores y las tendencias culturales de carácter global.

En función de lo dicho, la Educación Superior en el contexto internacional, basado en el documento de visión y misión de la Educación para el siglo XXI de la UNESCO 1998 (2), refiere en el Artículo 5 literal a: La importancia de la promoción del saber como una función esencial de todos los sistemas de Educación Superior que tienen el deber de promover la innovación, la interdisciplinariedad en los programas fundamentados en las orientaciones a largo plazo, en los objetivos y necesidades sociales y culturales.

Asimismo, el Artículo 6 literal c, refiere a la pertinencia social a largo plazo, la “Educación Superior debe aumentar su contribución al desarrollo del conjunto de sistema educativo, sobre todo mejorando la formación del personal docente, la elaboración de planes de estudio y la investigación”.

De modo que, de cierto modo si se obedece a los diferentes contextos, particularidad de situaciones, el proceso cambiante de la tecnología, a las ideas, la

formación del docente, a los valores y tendencias culturales.

Ahora bien, Venezuela como país participante en la conferencia mundial sobre Educación Superior, aprobó la declaración y se comprometió a acatarla en el marco de las responsabilidades individuales y colectivas, adoptando medidas para hacerla realidad.

En consecuencia, a la UNERMB como institución de Educación Superior le corresponde asumir los acuerdos de la UNESCO que significa adecuar sus políticas y estructuras organizativas para dar cumplimiento a la Visión y Misión de la Educación Superior en el Siglo XXI. De igual manera, se integra al plan Estratégico Nacional con relación a las Políticas para el desarrollo de la Educación Superior en Venezuela 2000–2006, la Ley de Ciencia, Tecnología e Innovación y la Ley de Educación Superior.

En relación a esto, un aspecto importante son las Líneas de Investigación, éstas son uno de los pilares fundamentales para la creación de cualquier grupo o centro de investigación, son la formación de líneas de investigación, las cuales constituyen ejes coordinados que facilitan la integración y continuidad de esfuerzos de personas, equipos e instituciones comprometidas en el desarrollo del conocimiento en determinado campo.

El concepto “línea de inves-

tigación” hace referencia a una problemática de investigación determinada, alrededor de la cual se articulan personas, proyectos, problemas, metodologías y actividades de investigación que, organizados en sublíneas (bien sea por afinidades temáticas o por logros esperados), hacen posible la producción intelectual en un área del saber. Las sublíneas, así mismo, constituyen expresiones y segmentos del objeto de estudio de una línea, que se concretan en proyectos afines.

De tal forma que, las líneas de investigación son oportunidades históricas para descubrir nuevas fronteras, para recrearse con la contemplación de nuevo conocimiento, para resolver problemas y atender aparentes contradicciones, en fin para participar de la interesante aventura del conocimiento ya conocido, del conocimiento por conocerse y de aquél que se haya producto de las circunstancias y a veces al azar (1).

Por su parte, sobre la Productividad Investigativa, se tiene que la actividad científica, se refiere a todas las participaciones que el individuo haya tenido en tarea de investigación y que estén comprendidas durante un período determinado; con relación a la producción científica, la misma está conformada por un conjunto acumulativo de productos de carácter científico comprendidos en un lapso de-

terminado.

“La Productividad de nuestra Investigación Biomédica, considera que el concepto de productividad implica una relación entre un insumo y un producto” (14). Este producto puede ser de carácter intangible como la docencia, la extensión, el prestigio y la cultura, o de carácter tangible como la publicación, ya sea de artículos, libros, mimeógrafos, entre otros. Dicho autor considera al producto publicado y, en especial, a los artículos publicados en revistas especializadas, como el indicador por excelencia de la productividad científica de un investigador.

En un documento de la Fundación para el desarrollo de la Ciencia y la Tecnología FUNDACITE, se analizan en términos más institucionales la problemática de la investigación en la región Centro Occidental. En este artículo se toma como objeto de estudio a las unidades de investigación existentes en la región.

En dicho documento, se toman en cuenta algunos elementos que podrían dar indicios generales de la productividad científica de la región, los cuales no son considerados como indicadores de productividad en el mismo. Los elementos referidos son: el tiempo de dedicación y el nivel educativo de los investigadores, además, analiza, algunas variables inherentes al investigador, como lo son: sexo, edad y

tipo de investigación realizada.

De manera que, los aspectos relacionados a la productividad investigativa de los docentes, lo cual compete en este estudio, tiene que ver en primer lugar con la calidad; este es un concepto multidimensional que puede ser aplicado a cualquier proceso del campo educativo. Más aún, es un concepto político abordado por los entes gubernamentales y financistas para diseñar e implementar políticas que afectan el funcionamiento de las universidades.

Existen dos tendencias respecto a la calidad: calidad establecida en función de los recursos y calidad con base en los resultados. En vista de la falta de acuerdo en torno a lo que se entiende por calidad, algunos autores han adoptado una visión pragmática según la cual la calidad es definida en función de una serie de criterios e indicadores que reflejen la opinión de los distintos grupos de interés dentro y fuera de la universidad (12).

En segundo lugar, otro aspecto relacionado a la productividad en investigaciones sería la pertinencia, el cual es el grado de correspondencia que existe entre los fines y objetivos perseguidos por una institución y los requerimientos, en términos de necesidades y expectativas, de la sociedad en la cual se inserta. En el caso de las universidades, ésta se logra a través del comprome-

so y participación de sus actores para satisfacer tales demandas.

Otros aspectos relacionados a productividad de las investigaciones, y que son fundamentales son, la eficiencia, lo novedoso y la continuidad, éstos a su vez permiten determinar las necesidades y demandas de trabajos de investigación en las instituciones universitarias.

Así que, una forma de quebrar el doble discurso existente en las universidades, entre una exigencia de investigación para el estudiante que contrasta con una inactividad creciente de sus docentes en materia de investigación, es el de impulsar procesos investigativos con la docencia.

En la actualidad, caracterizado por una realidad dinámica, en constante cambio, es impensable un trabajo docente sin investigación continua. Lograrlo, constituye el mayor reto compartido de las comunidades científica y académica para la prospectiva.

## CONCLUSIONES

Para describir las características de la productividad investigativa de los docentes del PIT, se plantearon unos objetivos los cuales se obtuvieron y permitieron llegar a las siguientes conclusiones:

- Con respecto a las actividades académicas, científicas y de

investigación que actualmente realizan los docentes del PIT; en síntesis, los docentes del PIT realizan pocas actividades relacionadas a la investigación. Se determinó que la productividad investigativa de los docentes es poco significativa, se encuentra muy por debajo del 50%; el 15% de la muestra ha publicado artículos de investigaciones en revista arbitradas nacionales, ninguno en revistas internacionales; sólo 2 docentes han publicado libros; ningún docente posee patente alguna; 6 han realizado monografías; asimismo, 18 docentes han asistido como ponentes en congresos o eventos nacionales, de éstos, sólo 10 han sido invitados a asistir como ponentes en dichos congresos; 1 docente ha asistido a un congreso internacional como ponente, más no fue invitado a él.

En efecto, muy pocos docentes divulgan y comparten los resultados productos de sus investigaciones. Pero un aspecto sorprendente, es que los resultados arrojaron que 70 docentes realizan labores de tutorías académicas; para los cuales, la mayoría de las tutorías están referidas a trabajos de pregrado y 11 a trabajos de maestrías. Es decir, hay un número muy elevado de docentes (28) que no han realizado algún trabajo de investigación, ni siquiera tienen una especialización en metodología de la investigación, no tienen el grado académico para

una maestría, y sin embargo así, son tutores legales de trabajos de investigación.

• Con respecto a los aspectos fundamentales que toman en cuenta los docentes, al momento de realizar un trabajo de investigación, en relación a la pertinencia, eficiencia, calidad, novedad y continuidad de dicho trabajo; Los criterios de idoneidad, exhaustividad y rigurosidad metodológica, no son aspectos fundamentales que debiera contener un trabajo de investigación; según los resultados arrojados en la investigación, 6 docentes de los 43 en total que sí hacen investigación, dicen tomar en cuenta el criterio de idoneidad, y 8 dicen tomar en cuenta los criterios de exhaustividad y de rigurosidad metodológica; es decir, se hacen trabajos de investigación pero no con criterios de calidad.

También, los docentes consideran realizar las investigaciones si tomar en cuenta el tiempo estimado, debido a que 41 de 43 docentes así lo mencionaron; 18 de ellos se apoyan en las TIC's, así como, que 23 dicen estimar costos mínimos; es decir, no hay eficiencia al realizar la actividad investigativa.

Por otra parte, 20 docentes consideraron el criterio de heurística en el desarrollo de los trabajos, 26 consideraron temas transdisciplinarios para sus trabajos, y 6 de ellos consideran la continuidad de las investigaciones; de manera que, se describen estas características las cuales determinan si los trabajos realizados por los docentes del PIT son investigaciones que se prolongan con criterios de permanencia y progresión.

• Aspectos relacionados al desarrollo de Líneas de investigación por parte de los docentes del PIT; son pocos docentes los que pertenecen y generan líneas de investigación. Sólo el 12% de la muestra están inscritos en líneas de investigación. Valores muy bajos, considerando que si un docente realiza trabajos de investigación, debiera divulgarlos y continuar con los otros niveles de dichas investigaciones. De manera que, describir estos aspectos determinó que un número poco significativo de docentes, conectan diferentes tipos de investigaciones pertenecientes a un tópico en particular, y que además están soportadas por alguna organización institucional.

#### LITERATURA CITADA

(1) Barrera, M., Hurtado, J. (2002). Líneas de investigación. Editorial Magisterio. Caracas.

- (2) CRESALC-UNESCO, (1991). Visión cuantitativa de la Educación Superior en América Latina y el Caribe. Documento de la reunión internacional de reflexión sobre los nuevos roles de la educación superior a nivel mundial, Caracas. www.rioei.org [Consulta: 10 de mayo 2006]
- (3) Documento de políticas Programa de Investigación 1998-2003. Unermb, Cabimas, Venezuela
- (4) Genatios C. y La Fuente, M. (2004). Ciencia y Tecnología en América Latina. Análisis comparativo de Chile, Colombia, Uruguay y Venezuela. Ediciones OPSU. Caracas, Venezuela.
- (5) Hurtado de Barrera, J. (2000a). Metodología de la investigación Holística. Caracas: Fundación SYPAL.
- (6) Hurtado de Barrera, J. (2000b). Retos y alternativas en la formación de investigadores. Caracas: Fundación SYPAL
- (7) Inciarte A. (2003). Formación para una Actitud Científica. www.Sadpro.ucv.ve.[Consulta: 15 de agosto 2006]
- (8) Inciarte A. (2004). Competencias para la Investigación a ser desarrolladas por la Educación Superior. Maracaibo: LUZ.
- (9) Ley Orgánica de Ciencia, Tecnología e Innovación, (2006). Acciones en materia de ciencia, tecnología e innovación. www.fonacit.gov.ve [Consulta: 07 de agosto 2006]
- (10) Lineamientos generales CDCHT-UNERMB, 2004. Unermb. Programa Investigación, Cabimas.
- (11) López, M. y Ochoa, H, (1998). Acerca de la Política científica de la Universidad del Zulia de la década de los noventa. En memorias del V seminario de Investigación. Mayo, Maracaibo. Pág. 355-368
- (12) Mayhew y otros (1990). 17. Mayhew, L., Ford, P. y Hubbard, D. Current Perspectives on Academic Quality. En The Quest for Quality. The Challenge for Undergraduate Education in the 1990's. San Francisco: Jossey.Bass.
- (13) MCT, (2005). Ministerio de Ciencia y Tecnología. Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (PNCTI) 2005-2030. Caracas
- (14) Roche, M. (1981). La Productividad de nuestra Investigación Biomédica en: Los Objetivos y la Productividad de nuestra Investigación Biomédica. Publicaciones de la Facultad de Medicina. UCV. NEIR Contreras, Caracas.



## ***POLÍTICA EDITORIAL***

---

### **Objetivos y Alcances**

La Revista Investigaciones Científicas de la UNERMB, es una publicación periódica de carácter científico y tecnológico al servicio de la comunidad universitaria venezolana, así como del Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación implementado por el Ministerio del Poder Popular para la Ciencia y la Tecnología. Es editada semestralmente por el Programa Investigación de la Universidad Nacional Experimental Rafael María Baralt, teniendo circulación nacional e internacional. Está dirigida a investigadores, profesionales, profesores y estudiantes de las ciencias aplicadas, agroalimentaria, ingeniería, veterinaria, ciencias de la salud, matemática, biología, química, ecología, extensionistas y a quienes trabajan en diversos campos del conocimiento aplicado.

La Revista tiene por objeto divulgar artículos originales e inéditos derivados de la investigación y experimentación en las diferentes áreas de las ciencias mencionadas. Publica artículos científicos (investigaciones originales), artículos tecnológicos (aplicaciones de la ciencia), artículos de revisión, comentarios científicos, resúmenes de tesis de pre y post-gradado, doctorado, así como notas y avances de investigación que aporten soluciones y nuevas perspectivas a la ciencia. También acepta ensayos (artículos de reflexión) que estimulen el debate acerca de aspectos científicos o tecnológicos relevantes, desarrollados bajo una óptica crítica, proactiva y prospectiva. Lo anterior enmarcado en altos estándares de rigor científico y calidad editorial.

El Comité Editorial se reserva el derecho de rechazar o aceptar los materiales enviados para su publicación. Todos los artículos enviados son revisados y analizados por dos (2) evaluadores o árbitros: uno interno y otro externo a la universidad, de alto nivel científico, seleccionados por el Comité Editorial y el Director de la revista. Si los artículos son aceptados para publicación, los autores deberán corregirlos según las observaciones de los pares de evaluación y en el período de tiempo otorgado para ello por el Editor; si dos árbitros consideran que el material no tiene el nivel para poder publicarse, éste será rechazado. Los autores de los artículos deberán ajustarse a las normas establecidas por el Comité Editorial en la sección "Instrucciones a los autores". Los materiales de texto e ilustración deben ser enviados al Director de la revista por triplicado. Aquellos artículos que no se ajusten a estas pautas serán devueltos antes de ser considerados para su evaluación.



## INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

### 1. General.

La Revista Investigaciones Científicas de la UNERMB, publica artículos científicos, notas técnicas, comunicaciones rápidas y artículos invitados (revisiones) originales e inéditos de autores interesados en los campos de Ingeniería, Biología, Química, Ciencias de la Salud, Ciencias Ambientales, Ciencias Agrícolas, Veterinaria y Ciencias aplicadas en general.

Los manuscritos remitidos para publicación y las comunicaciones relacionadas con asuntos editoriales deben ser remitidas al Director de la Revista Investigaciones Científicas de la Universidad Nacional Experimental Rafael María Baralt (UNERMB). Av. Intercomunal, sector Bello Monte, Quinta Ghirlandina, Cabimas, Estado Zulia, Código Postal 4013, Email: [revivcien@gmail.com](mailto:revivcien@gmail.com), [cesartimaure@yahoo.com](mailto:cesartimaure@yahoo.com) Telef. /fax (0264) 241-41-87, 0416-3606469.

Los manuscritos deben estar escrito en idioma castellano con un resumen en castellano, e inglés.

Los manuscritos deben ser remitidos por triplicado, incluyendo una copia del archivo original en digital (CD). El documento no debe exceder las 20 cuartillas (10 para notas técnicas), incluyendo cuadros y gráficos. El artículo debe ser consignado acompañado de una autorización de publicación firmada por todos los coautores, cuyo modelo se anexa.

Todos los manuscritos serán enviados a dos árbitros para su revisión. En este sentido, los autores deberán enviar en una comunicación anexa, una lista de cinco (5), posibles árbitros, nacionales y/o extranjeros, con sus respectivas direcciones postales completas, teléfonos y correos electrónicos.

### 2. Presentación.

- 2.1 Los manuscritos deben ser transcritos en un procesador de palabras MS-WORD versión actualizada, con el tipo de letra Arial, tamaño 12.
- 2.2 El diseño de la página debe incluir los siguientes parámetros papel tamaño carta (8,5" x 11" o 21,59 cm. x 27,94 cm.) impreso en un solo lado del papel, dejando márgenes amplios (2,5 cm.) con la numeración de páginas debajo y centrada, y utilizando un espacio interlineal doble.
- 2.3 Los trabajos deben estar divididos en secciones en el orden siguiente: Título en español, Título en inglés, Autores dirección postal institucional precisa (incluir Email), Resumen, Palabras

claves, Abstract, key words, Introducción (incluye la revisión de literatura), Materiales y métodos, Resultados y discusión, Conclusiones, Literatura citada. Los cuadros y figuras deben ir en el texto.

- 2.4 Las subvenciones y autor al cual debe enviarse la correspondencia deben incluirse como nota al pie de la página.
- 2.5 No deben utilizarse letras mayúsculas, excepto para incluir títulos, subtítulos, párrafos después de punto y aparte o punto y seguido y nombres propios.
- 2.6 Las citas en el texto se deben indicar por el número entre paréntesis correspondiente a la literatura citada. No se deben utilizar referencias en el resumen ni en el Abstract.

### 3. Resumen y Abstract.

No deben exceder las 200 palabras, incluyendo: justificación, objetivos materiales y métodos, resultados y conclusiones en forma breve. Deben estar escritos en un solo párrafo, con espacio sencillo y en hojas separadas. Al final del resumen deben colocarse de tres a seis palabras claves que indiquen el contenido del artículo científico o de la nota técnica.

### 4. Introducción

Incluir justificación, breve revisión de la literatura actualizada del tópico en estudio y finalizar con los objetivos de la investigación.

### 5. Materiales y métodos.

Se deben especificar los materiales utilizados en el desarrollo de la investigación, incluyendo marcas registradas (de ser el caso). En lo posible se deben especificar los métodos y técnicas empleados mediante referencias, a menos que se trate de métodos poco usuales o novedosos. Los métodos de análisis estadísticos empleados en la investigación, deben ser especificados al igual que los programas empleados (software). En esta sección el arreglo debe ser en forma cronológica, de tal manera que cualquier investigador pueda repetir dichas técnicas. Se puede hacer referencia a cuadros, figuras y diagramas. Los números decimales se señalan con comas.

### 6. Resultados y discusión.

Los resultados deben ser analizados en base a lo obtenido en investigaciones previas y relacionadas con mecanismo y procesos científicos, destacando los hallazgos relevantes de la investigación. Es importante finalizar esta sección con un párrafo donde se reflejen las implicaciones prácticas o teóricas de la investigación.

Se puede colocar, en caso de ser necesario, un aparte de Agradecimientos, señalando a personas, instituciones, becas, que hayan realizado un aporte importante al trabajo de investigación.

### 7. Literatura citada.

- 7.1 La literatura citada debe ser de fácil acceso para cualquier lector, deben evitarse las citas de tesis de grado, resúmenes de eventos científicos, mimeografías. La literatura debe estar ordenadas alfabéticamente y numeradas.
- 7.2 Se deben realizar las abreviaturas convencionales internacionalmente aceptadas para los nombres de las revistas y publicaciones periódicas (referirse al World List Of Scientific Periodicals).
- 7.3 Artículos de revistas arbitradas.  
Angulo, F., M. Molero, F. Escalona, J. Muñoz, Z. Mármol y R. Ramírez. 2007. Prevalencia y dinámica de HPG mensual de Fasciola hepática y otros helmintos en un rebaño bovino de una zona inundable tropical. *Rev. Cientif. FCV-LUZ*. Vol. XVII, N° 2, 111-116.
- 7.4 Libros.  
Romero, R. y L. Zúñica. 2005. *Métodos Estadísticos en Ingeniería*. Editorial Universidad Politécnica de Valencia.
- 7.5 Capítulos dentro de libros.  
Faria-Mármol J., González B. 2008. Nuevas especies de gramíneas forrajeras para el desarrollo sostenible de los sistemas ganaderos de Doble Propósito. En: *Desarrollo sostenible de la ganadería doble propósito*. C. González-Stagnaro, N. Madrid Bury, E. Soto Belloso (Eds). Fundación GIRARZ. Ediciones Astro Data S.A. Maracaibo-Venezuela. Cap. XXIX: 363-371
- 7.6 Reportes técnicos.  
Comisión del Plan Nacional de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos (COPLANARH). 1975. *Atlas Inventario Nacional de Tierras*. Región Lago de Maracaibo. Tecnicolor S. A. Caracas. Venezuela.
- 7.7 Publicaciones gubernamentales.  
Morales, D., E. Fuenmayor, J. Colina, A. Sánchez y L. Arias. 1982. *Diagnostico agroecológico de la región zuliana*. Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias (FONAIAP). Serie C N° 1-05. FONAIAP Ed. Maracaibo, Venezuela.
- 7.8 Programas y Software.  
SAS Institute, Inc. 1985. *SAS user's guide: Statistics*. 5th edition. SAS Inst., Inc., Cary, NC.
- 7.9 No se aceptan referencias electrónicas, a menos que sean trabajos arbitrados, boletines o comunicaciones respaldadas por instituciones científicas. Evite el uso excesivo de estas referencias electrónicas. En caso de ser necesario, la referencia debe incluir: título, autores, lugar de origen e institución que la respalda, cita de la búsqueda y fecha. Ejemplo: Fernández, M. Manejo de la calidad de la dieta. La Mañana. Suplemento Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Argentina (en línea). <http://www.lamañana.com.ar/01/12/02.notainta5.html>
8. Cuadros, figuras y diagramas.
- 8.1 Los cuadros deberán estar en el texto, en el mismo documento (archivo). Las figuras y diagramas deberán ser hechos con líneas negras sobre fondo blanco, utilizando para ello los programas graficadores actualizados. También podrá utilizarse formatos JPG, GIF, TIF o BMP. Preferiblemente deberán enviarse impresiones láser o inyección de tinta de la mayor calidad posible, sobre papel blanco y remitidos por separado.
- 8.2 Los cuadros, figuras, diagramas y fotos deberán identificarse con números arábigos, (sin usar el símbolo N°) y en orden consecutiva.
- 8.3 El lugar de ubicación de los cuadros, figuras, fotos y diagramas debe corresponder adecuadamente con la redacción del texto.
- 8.4 Los cuadros se titularan en la parte superior. Las figuras y diagramas se titularan en la parte inferior.
- 8.5 Las reproducciones de fotografías se harán en blanco y negro. La calidad de las fotografías debe ser muy buena, copiadas en papel brillante.
9. Nomenclatura.
- 9.1 Química y bioquímica. Los nombres de compuestos químicos deben citarse de acuerdo a Chemical abstracts (Chemical Abstracts Service, Ohio State University, Columbus) y sus índices.
- 9.2 La terminología bioquímica, incluyendo abreviaciones y símbolos se debe hacer de acuerdo a la Comisión de Nomenclatura Bioquímica (Comisión of Biochemical Nomenclatura, SUPAC-IUB).
- 9.3 La actividad enzimática se expresará en las unidades sugeridas por: *Enzyme Nomenclatura* (Academic Press, 1979).
- 9.4 Puede consultar resúmenes de abreviaciones más comúnmente usadas en: *Journal of Animal Science*, *Journal of Biological Chemistry*, *Archives of Biochemistry and Biophysics* and the *Handbook of Biochemistry* (H.A. Sober, Chemical Rubber Company, Cleveland, también en [www.fao.org](http://www.fao.org) abreviaturas, siglas y equivalencias).
- 9.5 Taxonómica. Se debe utilizar la nomenclatura binaria; nombres y géneros y categorías mayores deben ser usados solos.
- 9.6 Genética. La aplicación de los términos fenotipo y genotipo deben usarse de acuerdo a Demerec et al. (*Genetics*, 54:61-74).
- 9.7 Abreviaciones y unidades. Solo deben ser usadas unidades y abreviaciones del Sistema Internacional (SI). Las abreviaciones con-

templadas en el SI y/o las no estándar, deben ser explicadas cuando aparecen por primera vez en el texto. No deben usarse puntos en las abreviaturas.

10. Disposiciones finales.

- 10.1 Una vez recibidas las observaciones de los árbitros el (los) autor (es) deberá (n) regresar las correcciones en un lapso no mayor de dos (2) semanas. Cuando el trabajo sea aceptado, el (los) autor (es) será (n) informado (s) del tiempo aproximado de publicación.
- 10.2 Cuando un trabajo es rechazado por los árbitros el mismo no será publicado.
- 10.3 El (los) autor (es) recibirá (n) el ejemplar completo de la revista sin costo alguno.



**MODELO DE AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Ciudad, fecha

Sr. Director  
Revista Investigaciones Científicas de la UNERMB  
Su Despacho.

Leídas atentamente las Instrucciones a los Autores y analizada la cobertura de la Revista Investigaciones Científicas, considero que la publicación que usted dirige es la adecuada para la difusión de nuestro trabajo, por lo que le ruego someta a la consideración de su posible publicación en la sección correspondiente, el manuscrito que, adjunto le remito titulado:

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_, cuyos autores son: \_\_\_\_\_, de los cuales, \_\_\_\_\_ será el

encargado de correspondencia.

Los autores certifican que este trabajo no ha sido publicado ni en todo ni en parte por cualquier otro medio, ni está en vías de consideración para publicación en otra revista.

Los autores se responsabilizan de su contenido y de haber contribuido a la concepción, diseño y realización del trabajo, análisis e interpretación de datos, y de haber participado en la redacción del texto y sus revisiones, así como en la aprobación de la versión que finalmente se remite.

Así mismo, aceptamos la introducción de cambios en el contenido si hubiere lugar tras la revisión y de cambios en el estilo del manuscrito por parte de la redacción de la revista.

**CESIÓN DE DERECHOS Y DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES**

Los autores abajo firmantes transfieren los derechos de propiedad (Copyright) del presente trabajo a la Universidad Nacional Experimental Rafael María Baralt, como organización editora y patrocinadora de la Revista.

Declaramos además estar libres de cualquier asociación personal o comercial que pueda suponer un conflicto de intereses en conexión con el artículo remitido, así como el haber respetado los principios éticos de investigación.

Firmas:

Roberto A. XXXX-XXXXX; Luis A. de XXXXXXXX; José XXXXX-XXXXXXX



## ***INSTRUCCIONES PARA LOS ÁRBITROS***

Lea cuidadosamente el formato “Planilla para arbitraje de artículos” anexo. Coloque fecha de recibido y cuando se realizó el arbitraje. Evalúe los siguientes aspectos:

1. **Título:** verificar si se ajusta al contenido del trabajo. Evitar las siglas y acrónimos. La extensión máxima será de 15 palabras.
2. **Resumen:** debe ajustarse a las normas establecidas por la Revista Investigaciones Científicas, las cuales aparecen en la sección “Instrucciones para los autores”.
3. **Palabras clave:** deben reflejar el contenido principal del trabajo y ser referencia para los lectores sobre la temática, a objeto de facilitar la consulta electrónica.
4. **Coherencia interna del trabajo:** examinar la relación existente entre la introducción, materiales, métodos, resultados, discusión y conclusiones.
5. **Claridad y coherencia del discurso:** comprobar que la redacción sea apropiada en términos de sintaxis y sintéresis.
6. **Organización de secciones y subsecciones:** verificar que los títulos de las secciones y subsecciones guarden relación con el contenido y la secuencia lógica del trabajo. Los encabezamientos de cada sección se escribirán a la izquierda en minúsculas y negritas.
7. **Literatura citada:** pertinente y actualizada, cumpliendo con las pautas que se especifican en las normas para los colaboradores. En las referencias solo debe aparecer la literatura citada.
8. **Aportes al conocimiento:** los resultados deben contribuir a superar el estado actual del conocimiento sobre el objeto, evidenciándose el aporte del autor.
9. **Contribución a futuras investigaciones:** las propuestas temáticas se convierten en oportunidades para explorar otros contextos o áreas de investigación.
10. **Conclusiones:** verificar que sean pertinentes, precisas y vinculadas con los aspectos desarrollados en el cuerpo del trabajo.
11. **Tablas, cuadros y gráficos:** verificar que sean de elaboración propia y estén adecuadamente referidos en el texto e identificados secuencialmente. En caso de no ser de elaboración propia, sino tomado de otro autor, se debe considerar la pertinencia e importancia de la misma en la discusión presentada. Deben indicar el título y en caso de adaptación, indicar claramente la fuente.
12. **Apreciación general:** se sugiere que al concluir la evaluación se redacte una síntesis donde se presenten las correcciones específicas y otras observaciones surgidas en el proceso de arbitraje.
13. En el formato anexo “Planilla para arbitraje de artículos”, indicar la valoración definitiva utilizando las opciones: excelente, bueno, regular y defectuoso. De igual modo, el cuadro de la decisión de publicarse o no.
14. Para las observaciones o recomendaciones que se consideren pertinentes, utilice hojas adicionales.
15. Finalmente, indicar los datos del árbitro en la planilla anexa.



UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL  
RAFAEL MARÍA BARALT  
VICERRECTORADO ACADÉMICO  
PROGRAMA INVESTIGACIÓN-CDCHT  
REVISTA INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



**PLANILLA PARA ARBITRAJE DE ARTÍCULOS**

**I. Datos del Trabajo**

|  |
|--|
| Título:  |
| Fecha de recepción en RIC: / /      Fecha de envío al árbitro: / / |
| Fecha recibido por el árbitro: / /      Fecha de evaluación: / /   |

**II. Arbitraje**

| Ítems a evaluar                             | Exc. | Bue. | Reg. | Def. | Justificación |
|---|------|------|------|------|---------------|
| Título:                                     |      |      |      |      |               |
| Resumen:                                    |      |      |      |      |               |
| Claridad y coherencia del discurso:         |      |      |      |      |               |
| Organización interna del trabajo:           |      |      |      |      |               |
| Bibliografía utilizada:                     |      |      |      |      |               |
| Aportes al conocimiento del objeto tratado: |      |      |      |      |               |
| Interpretación y conclusiones:              |      |      |      |      |               |
| Contribución a la investigación científica: |      |      |      |      |               |
| Apreciación general:                        |      |      |      |      |               |

**III. Decisión**

**Observaciones**

|   |  |
|---|--|
| Publicarse sin modificaciones               |  |
| Publicarse con ligeras modificaciones       |  |
| Publicarse con modificaciones sustanciales. |  |
| No publicable.                              |  |

Nota: de requerir modificaciones, favor anexar hoja aparte donde se indiquen las mismas.

**IV. Datos sobre el árbitro**

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| Nombre:                              |  |
| Institución de adscripción:          |  |
| Título del último trabajo publicado: |  |
| Revista u otro medio:                |  |
| Fecha de publicación:                |  |
| Dirección postal, teléfono y E-mail: |  |

Firma

*Ciencia y Tecnología al servicio de las comunidades*



UNIVERSIDAD NACIONAL EXPERIMENTAL  
RAFAEL MARÍA BARALT  
REVISTA INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS  
PUBLICACIÓN SEMESTRAL DEL  
PROGRAMA INVESTIGACIÓN – CDCHT



**Suscripción**

**Subscription**

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| 2 números al año. Edición en papel  | 2 numbers Publisher two times a year.            |
| Venezuela (Precio por año)          | Single Edition                                   |
| Bs.F. 30                            | Latin America and Caribbean: price one year \$12 |
| Versión CD-ROM Bs.F. 20             | USA, Europe and Asia: \$ 12                      |
| Número sencillo o suelto: Bs.F. 15  | CD-ROM: \$ 10                                    |
| Número sencillo en CD-ROM: Bs.F. 10 | One single edition: \$ 10                        |
|                                     | One single CD-ROM: \$ 8                          |

***Las solicitudes de canje y suscripción deben enviarse a:  
(The subscription and exchange requests must be sent to)***

Revista Investigaciones Científicas. Universidad Nacional Experimental “Rafael María Baralt”. Programa Investigación, Quinta Ghirladina, Av. Intercomunal con calle José María Vargas. N° 1. Sector Bello Monte, teléfonos 0264-2414187. Código postal 4013. Apartado postal 28, Cabimas, Estado Zulia. Venezuela  
Correo electrónico: revivcien@gmail.com, cesartimaure@yahoo.com

Ficha de suscripción  
Subscription form

Nombre y apellidos: \_\_\_\_\_  
Name

Dirección: \_\_\_\_\_  
Address

Teléfonos: \_\_\_\_\_ E-mail: \_\_\_\_\_

Apartado: \_\_\_\_\_ Ciudad: \_\_\_\_\_  
P.O Box City, zip code

Estado: \_\_\_\_\_ País: \_\_\_\_\_  
State: Country

La Revista Investigaciones Científicas UNERMB (NE)  
Vol. 1, N° 1 y N° 2, Enero-Diciembre, se terminó de  
imprimir en el mes de junio de 2010, con un tiraje de 250  
ejemplares, en los talleres en la Imprenta UNERMB, bajo la  
responsabilidad del Fondo Editorial UNERMB. Se utilizó  
fuente Georgia, papel bond 20, portada glazze 200.

