

# Modelado y simulación de la interacción entre pacientes con patologías respiratorias comunes y un ventilador mecánico de última generación

## Modeling and simulation of the interaction between patients with common respiratory conditions and a last generation mechanical ventilator

LEIDY YANET SERNA HIGUITA y ALHER MAURICIO HERNÁNDEZ VALDIVIESO  
Grupo de Investigación en Bioelectrónica e Ingeniería Clínica (Gibic). Programa de Bioingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Recibido: 10/05/2009 Aceptado: 20/11/2009  
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

### Resumen

La configuración del ventilador mecánico en pacientes con patologías respiratorias durante episodios de insuficiencia respiratoria aguda (IRA) no es una tarea sencilla, pero en la mayor parte de los casos es exitosa en función de la experiencia del personal asistencial.

En este artículo se describe el desarrollo de una herramienta interactiva, basada en modelos matemáticos, que facilita el estudio de la interacción entre un ventilador mecánico y un paciente con patologías respiratorias comunes. Se describen todas las etapas del desarrollo del sistema, entre éstas los modos ventilatorios simulados, las patologías de interés y la interacción entre el usuario y el sistema a través de una interfaz gráfica desarrollada en Matlab y Simulink. El sistema desarrollado facilita el estudio de los modos ventilatorios más utilizados en la práctica clínica y la interacción entre el paciente y el ventilador. La interfaz gráfica del sistema es similar a la implementada en los ventiladores comerciales y es totalmente interactiva, lo cual facilita su uso por parte de personal asistencial, ocultando al usuario la complejidad de los modelos implementados. La evaluación de diversos escenarios clínicos simulados se aproxima adecuadamente a la realidad, según el concepto de médicos intensivistas y recientes hallazgos hechos en textos científicos.

**Palabras claves:** ventilación mecánica, sistema respiratorio, modelado de sistemas, simulación y modos ventilatorios.

### Abstract

Setting a mechanical ventilator for patients with respiratory conditions during episodes of acute respiratory failure (ARF) is not a simple task. In most cases, it is successful because care personal is experienced. This article describes an interactive tool based on mathematical models, which makes the study of the interaction between a mechanical ventilator and a patient with common respiratory diseases easy. It also describes all stages of system development, including simulated ventilatory modes, the pathologies of interest and the interaction between the user and the system through a graphical interface developed in Matlab and Simulink. The developed system facilitates the study of ventilatory modes most widely used in clinical practice and the interaction between the patient and the ventilator. The system's graphical interface, similar to the one implemented in the commercial fans, is completely interactive, making easier for the care personal use it with showing to the patient how complex the models implemented are. The evaluation of simulated clinical scenarios adequately approximates reality as the concept of intensivists and recent findings in the scientific literature show.

**Keywords:** mechanical ventilation, respiratory system, system modeling, simulation, ventilation.

## INTRODUCCIÓN

La ventilación mecánica es una técnica de soporte vital utilizada en circunstancias clínicas de deterioro de la función respiratoria. Se usa en las unidades de cuidados intensivos, quirófanos y, a veces, en áreas de urgencias. La ventilación mecánica puede sustituir total o parcialmente la función ventilatoria del paciente, por lo que la elección del modo ventilatorio y la configuración de los parámetros de ventilación asociados constituyen un paso fundamental en el tratamiento y la recuperación del paciente ventilado.

La variedad y la complejidad de situaciones clínicas derivadas de enfermedades respiratorias exigen el uso de estrategias de soporte ventilatorio más complejas, que gracias a los avances en la tecnología de microprocesadores han sido implementadas y se encuentran disponibles en los ventiladores de última generación. Sin embargo, a causa de la complejidad y diversidad de modos ventilatorios y marcas de equipos, el personal médico asistencial suele utilizar configuraciones de ventilación básicas, desaprovechando las ventajas de nuevos modos ventilatorios, debido a la ausencia de herramientas que faciliten la elección y configuración del modo ventilatorio adecuado para cada paciente. Un modo de ventilación inadecuado alarga el tiempo de conexión del paciente al ventilador y afecta su recuperación.

En este artículo se describe el desarrollo de una herramienta interactiva, basada en modelos matemáticos, orientada a facilitar el estudio de los modos ventilatorios que un ventilador mecánico de última generación puede aplicar a un paciente y la comprensión de la interacción de estos dos sistemas. Esto se hace con el fin de proporcionar elementos que faciliten la enseñanza y el aprendizaje acerca del uso, configuración y funcionamiento de diversas modalidades ventilatorias al personal médico asistencial, así como a estudiantes e investigadores interesados en este campo.

El sistema respiratorio tiene como función principal dar soporte al metabolismo celular, proporcionando oxígeno a todos los tejidos del cuerpo y eliminando el dióxido de carbono producido por las reacciones metabólicas. Esta función es posible gracias a la participación de varios subsistemas con funciones específicas, que garantizan el flujo de los gases respiratorios desde el medio ambiente hacia las células y viceversa. Estos subsistemas son el sistema de ventilación pulmonar, el sistema de transporte de gases, el sistema de intercambio

de gases y el sistema de control respiratorio [1].

La ventilación pulmonar es el proceso mediante el cual se renueva el aire contenido en los pulmones, aportando oxígeno y eliminando dióxido de carbono a nivel alveolar, valiéndose de gradientes de presión generados por la contracción y relajación de los músculos respiratorios. Este proceso consta de dos etapas sucesivas: la inspiración, durante la cual los músculos respiratorios se activan (músculos intercostales y diafragma), y la espiración, durante la cual se relajan.

La ventilación ( $\dot{V}$ ), definida como la cantidad de gas movilizado por unidad de tiempo, se ve afectada de manera importante por dos factores: la resistencia del sistema respiratorio al flujo ( $R_{rs}$ ) y la distensibilidad del sistema respiratorio, cuantificada por la compliancia ( $C_{rs}$ ), conocida también como su inverso, elastancia respiratoria ( $E_{rs} = 1/C_{rs}$ ), donde la compliancia del sistema respiratorio agrupa la compliancia pulmonar ( $C_p$ ), la de la pared torácica ( $C_{cw}$ ) y la de la vía aérea ( $C_{aw}$ ) [2].

Es bien conocida la analogía entre los sistemas fluidicos y eléctricos, por lo que el sistema respiratorio suele representarse por un circuito RC (figura 1). En este caso, la fuente de alimentación representa los gradientes de presión generados por la actividad muscular; la resistencia, la oposición al flujo en la vía aérea y la capacitancia, la compliancia del sistema respiratorio [3].

A pesar de que este modelo se ha utilizado ampliamente en el diseño de ventiladores mecánicos, no resulta adecuado para estudiar las enfermedades respiratorias más comunes, dado que no tiene en cuenta las propiedades viscoelásticas y no lineales de la vía aérea, la resistencia alveolar, la no linealidad de la compliancia

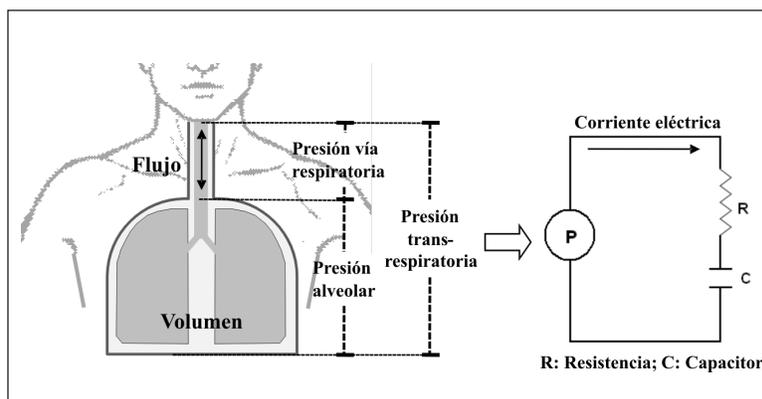


Figura 1. Sistema de ventilación pulmonar y analogía eléctrica.

pulmonar y la relación entre diferentes parámetros del modelo y algunas enfermedades respiratorias.

Las enfermedades respiratorias, debidas a anomalías relacionadas con la ventilación pulmonar, suelen ser asistidas a través de la ventilación mecánica (VM). La VM es un procedimiento de respiración artificial que emplea un equipo para suplir la función ventilatoria de una persona que no puede respirar por sí misma, de manera que mejore el proceso de intercambio de gases; dicha ventilación interactúa con el paciente, y afecta la presión, el flujo, el volumen y la duración de las fases inspiratoria y espiratoria, entre otras variables.

Durante la VM el ventilador incrementa la presión en la vía aérea progresivamente hasta que, por el efecto de la distensión pulmonar, se igualen la presión alveolar y la de la vía aérea. En torno a dicho momento concluye la inspiración y se inicia la espiración, durante la cual simplemente se retira la presión positiva en la vía aérea. A este proceso, repetido en forma continua, se le denomina ventilación con presión positiva intermitente (PPI) y es el principio de funcionamiento de todos los ventiladores mecánicos convencionales.

Existen diferentes modos de canalizar la sustitución ventilatoria, los cuales se han clasificado según la variable controlada, la forma de ciclado y las posibilidades de participación activa del paciente en su propia ventilación (figura 2). Los modos de ventilación pueden ser mandatorios, asistidos, intermitentes o espontáneos, con

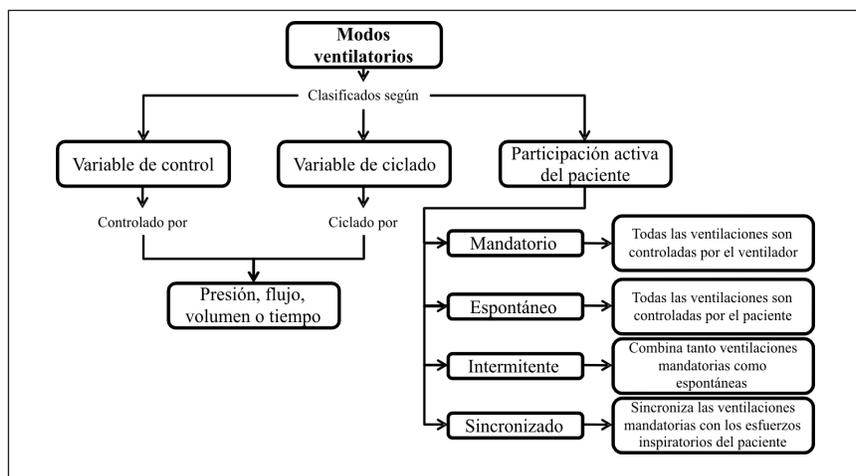
un mecanismo de ciclado ya sea por presión, volumen, flujo, tiempo o una combinación de éstos [4] [5] [6].

Las modalidades ventilatorias poseen parámetros de control asociados, según la variable controlada durante la ventilación y el mecanismo de ciclado proporcionado por el ventilador, que permiten la configuración de dichos modos. Además, el ventilador mecánico realiza el monitoreo de los parámetros y variables ventilatorias implicados en dicho procedimiento.

El empleo de la ventilación mecánica permite mejorar los síntomas y reducir las complicaciones de la insuficiencia respiratoria aguda (IRA), que se presenta en la agudización de enfermedades pulmonares obstructivas (Epoc) y restrictivas (EPR).

## METODOLOGÍA

El desarrollo de un sistema que permita simular la interacción entre un paciente con enfermedad respiratoria y un ventilador de última generación implica la implementación de diversos subsistemas, todos ellos de gran complejidad en su programación; adicionalmente, se requiere el desarrollo de una interfaz gráfica interactiva, no muy diferente de las consolas de control de los ventiladores mecánicos, para que el personal asistencial la pueda usar con facilidad. A continuación se hace una descripción detallada de cada uno de los subsistemas implicados en el desarrollo de esta herramienta.



**Figura 2.** Clasificación de los modos ventilatorios según la variable de control, la variable de ciclado y la participación del paciente [4] [5] [6].

MODELO DEL SISTEMA RESPIRATORIO

El modelo que se utiliza en este trabajo fue propuesto por [7] con el fin de describir la respuesta respiratoria en régimen permanente ante estímulos de hipercapnia y ejercicio. Dicho modelo tiene un controlador óptimo que ajusta la ventilación en función del mínimo trabajo respiratorio e incluye elementos dinámicos que relacionan la actividad neuronal con la mecánica ventilatoria [8]; adicionalmente, hace una distinción entre el trabajo mecánico de la respiración durante la inspiración y durante la espiración. Por tanto, el modelo no sólo ajusta la ventilación, sino el conjunto de variables asociadas con el patrón ventilatorio en función del mínimo trabajo respiratorio (figura 3).

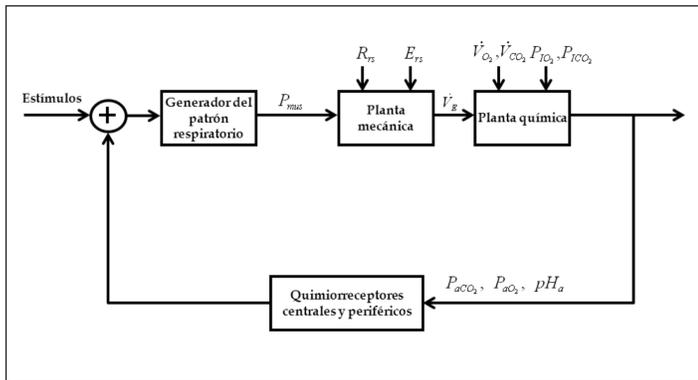


Figura 3. Diagrama de bloques del modelo del sistema de control respiratorio propuesto por [7].

El costo de la respiración tiene dos componentes, uno químico y otro mecánico, descritos por la expresión:

(1)

El primer término de la función de costo ( $J_c$ ) es el costo químico, donde  $\alpha$  es la sensibilidad y  $\beta$  el umbral de respuesta de los quimiorreceptores. De la ecuación de balance de masas que describe el intercambio de gases se obtiene la presión parcial de  $CO_2$  en la sangre arterial:

(2)

Esta ecuación no lineal es válida siempre y cuando se desprece la relación de disociación sangre-gas para el  $CO_2$ , que permite asumir la igualdad entre las presiones

parciales arterial ( $P_{aCO_2}$ ) y alveolar ( $P_{ACO_2}$ ) de  $CO_2$ . El segundo término de la ecuación (1) representa el costo mecánico, donde se discrimina el trabajo entre las fases inspiratoria y espiratoria al ponderar su contribución con el término  $\lambda_2$ . Los trabajos inspiratorio y espiratorio están dados por las expresiones:

(3)

(4)

Donde  $\lambda_1$  es un factor de ponderación,  $\xi_1$  y  $\xi_2$  son factores de eficiencia mecánica y el parámetro  $n$  representa la variación no lineal de la eficiencia:

(5)

$P_{mus}(t)$  es la presión muscular, definida como una función a tramos. Durante la inspiración es una función cuadrática, y durante la espiración una exponencial decreciente en la que  $\tau$  es la constante de tiempo posinspiratoria:

(6)

(7)

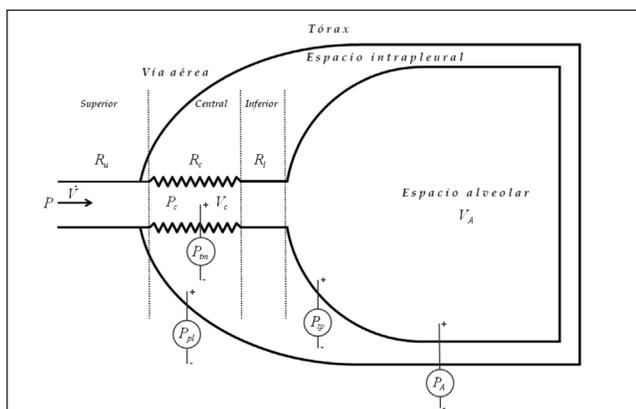
La ecuación que describe el proceso de ventilación pulmonar (ecuación del movimiento) en este modelo [9] [10] es:

(8)

Siendo  $R_{rs}$  y  $E_{rs}$  la resistencia y la elastancia totales del sistema respiratorio,  $P_{TR}$  la presión transrespiratoria,  $P_E$  la presión disipada por las propiedades elásticas de los pulmones y  $P_R$  la presión disipada por la resistencia al paso del flujo en la vía aérea.

En las ecuaciones 1-8 se describe el modelo del sistema respiratorio propuesto por [7], que basa su funcionamiento en la minimización del costo de la respiración (ecuación 1). Este modelo se puede implementar de manera relativamente simple en Matlab utilizando un algoritmo de optimización que minimice  $J$  (ecuación 1) en función de los cinco parámetros  $a_1, a_2, \tau, T_1$  y  $T_E$  [11].

En cuanto a la mecánica ventilatoria, se utiliza el modelo mostrado en la figura 4 [12] [13] [14], en el



**Figura 4.** Modelo de la mecánica ventilatoria de acuerdo con Mead y Golden [12] [13] [14].

que se tienen en cuenta las propiedades viscoelásticas y no lineales de la vía aérea, la resistencia alveolar, la no linealidad de la compliancia pulmonar, al igual que la relación entre diferentes parámetros y algunas enfermedades respiratorias.

Un análisis exhaustivo de dicho modelo permite realizar una linealización de éste [15], de tal manera que tanto la resistencia como la elastancia equivalentes del sistema respiratorio son parámetros de la mecánica ventilatoria dependientes de la frecuencia respiratoria y el volumen pulmonar, así:

$$R_r = a_0 + a_1 f_R + a_2 V_l \quad (9)$$

$$E_{rs} = b_0 + b_1 f_R + b_2 V_l \quad (10)$$

Donde  $f_R$  y  $V_l$  son, respectivamente, la frecuencia respiratoria y el volumen pulmonar (la suma de la capacidad residual funcional, FRC, y el volumen alveolar,  $V_A$ ), y  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_0$ ,  $b_1$  y  $b_2$  son coeficientes de ajuste para estimar  $R_{rs}$  y  $E_{rs}$ . Con este modelo, es posible simular diferentes niveles de enfermedad en pacientes obstructivos (Epop) y restrictivos (EPR) [2] [15] en ventilación espontánea.

## MODOS VENTILATORIOS

Los modos ventilatorios implementados se encuentran disponibles en la mayor parte de los ventiladores mecánicos modernos (tabla 1), y su funcionamiento se ha descrito ampliamente en la bibliografía existente [5] [9] [16].

Los modos P-CMV y (S)CMV se conocen como modos mandatorios controlados por presión y por volumen, en ese orden. Estos modos permiten sincronizar los esfuerzos inspiratorios del paciente con las ventilaciones generadas por el ventilador, siempre y cuando tales esfuerzos inspiratorios sean detectados al final de la fase espiratoria. Los modos P-SIMV y SIMV son modos intermitentes que combinan ventilaciones mandatorias controladas por presión o volumen, con ventilaciones espontáneas. En el modo espontáneo (SPONT) todas las ventilaciones son controladas por el paciente.

Es de anotar que cada modo ventilatorio tiene una serie de parámetros asociados que se incluyen en los algoritmos programados para generar los modos ventilatorios que, según el modo de ventilación elegido, pueden verse afectados por las ventilaciones generadas por el paciente.

## INTERACCIÓN PACIENTE-VENTILADOR

La interacción entre el paciente y el ventilador implica diferentes subsistemas (figura 5): los modos ventilatorios descritos previamente (bloque 2, figura 5), los parámetros asociados con la configuración del ventilador, los pacientes Epop y EPR con diferentes niveles de enfermedad y un paciente arbitrario que permita demostrar la versatilidad del sistema (bloque 1, figura 5).

Con el fin de implementar diferentes niveles de enfermedad en pacientes Epop y EPR, es importante tener en cuenta la relación entre las variables: presión, flujo, volumen y tiempo (ecuación 8). La presión transrespiratoria ( $P_{TR}$ ), durante la ventilación mecánica, es el resultado de la presión generada por el ventilador mecánico ( $P_{vent}$ ) y por la acción de los músculos respiratorios del paciente ( $P_{mus}$ ), por lo que en (8),  $P_{TR}$  corresponde a la suma de  $P_{vent}$  y  $P_{mus}$ , siempre y cuando estas dos presiones estén sincronizadas. Durante la espiración, lo habitual es que tanto la presión muscular como la presión del ventilador estén ausentes, por lo que de (8) se obtiene:

$$(11)$$

En esta ecuación se muestra también que el flujo durante la espiración pasiva es generado por la energía almacenada en los pulmones y en las paredes del pecho durante la inspiración y es mermado por la resistencia

Tabla 1  
Modos ventilatorios implementados y parámetros de control asociados

Modo ventilatorio	Nombre de control	Parámetros de control*											
		$P_{\text{max}}^{\text{inspir}}/P_{\text{max}}^{\text{expir}}$	$P_{\text{max}}^{\text{expir}}$	$P_{\text{max}}^{\text{inspir}}$	$P_{\text{max}}^{\text{plata}}$	$P_{\text{max}}^{\text{plata}}$	$P_{\text{max}}^{\text{plata}}$	$f_{\text{res}}$	$f_{\text{res}}$	$f_{\text{res}}$	Flow Trigger	Pressure Trigger	Forma de onda de flujo
Mandatorio - Sincronizado	Controlado por presión	P-CMV	X		X				X	X	X	X	
	Controlado por volumen	(S)CMV				X	X		X	X	X	X	X
Espontáneo	Con presión de soporte	SPONT		X	X			X			X	X	
Intermittente - Sincronizado	Controlado por presión	P-SIMV	X	X	X			X	X	X	X	X	
	Controlado por volumen	SIMV		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

\* Para ámbitos del controlados con variables de control (prioritizado)

Para ámbitos del controlados con variables de control:

Para ámbitos del controlados con variables de control y expiración

$P_{\text{max}}^{\text{inspir}}$  presión por encima del PEEP/CAP que se aplicará durante la fase inspiratoria.  $P_{\text{max}}^{\text{expir}}$  presión por encima de PEEP/CAP que se aplicará a una respiración espontánea por el paciente durante la fase inspiratoria.  $P_{\text{max}}^{\text{plata}}$  tiempo de presión, tiempo requerido para que la presión inspiratoria aumente hasta alcanzar la presión establecida.  $V_T$  volumen calculado suministrado durante la inspiración.  $f_{\text{res}}$  presión o nivel de inspiración.  $f_{\text{res}}$  sensibilidad de disparo expiratorio, porcentaje del flujo inspiratorio máximo en el que el ventilador pasa de la inspiración a la expiración.  $f_{\text{res}}$  frecuencia respiratoria o número de respiraciones por minuto.  $f_{\text{res}}$  relación existente entre el tiempo inspiratorio y el expiratorio.  $f_{\text{res}}$  PEEP/CAP, presión positiva en la vía aérea al final de la expiración presión positiva continua en la vía aérea.  $f_{\text{res}}$  Flow Trigger, flujo inspiratorio en el paciente que hace que el ventilador proporcione una ventilación.  $f_{\text{res}}$  Trigger, descenso de la presión por debajo del PEEP/CAP requerido para comenzar una respiración espontánea por el paciente.  $f_{\text{res}}$  Forma de onda de flujo, de flujo la forma de la onda de flujo para el suministro del gas.

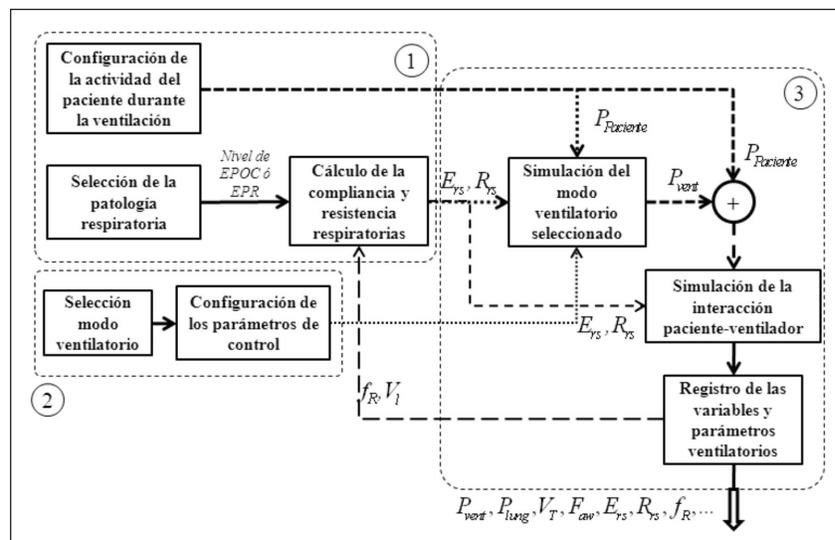


Figura 5. Diagrama de bloques en el que se describe la interacción entre el modelo de la mecánica ventilatoria y los modos ventilatorios aplicados por el ventilador.

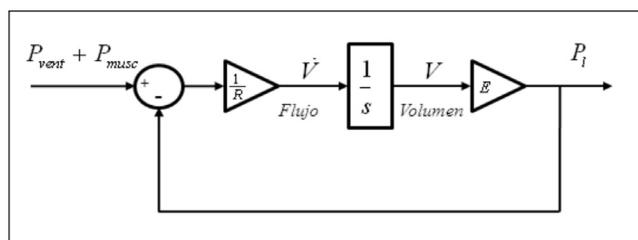
de la vía aérea [16]. El signo negativo indica la dirección del flujo durante la espiración.

Teniendo en cuenta que al final de la inspiración y antes de iniciar la espiración la presión en el sistema se puede representar aproximadamente por la presión pulmonar  $P_1 = EV$ , aplicando la transformada de Laplace en (8), con condiciones iniciales iguales a cero, se obtiene la siguiente función de transferencia:

$$(12)$$

A renglón seguido se muestra el diagrama de bloques equivalente a la ecuación (12). A partir de este sistema se puede establecer una aproximación de las curvas de flujo, volumen y presión resultantes durante la ventilación de un paciente determinado.

Una vez seleccionados el modo ventilatorio y la patología, se procede a la simulación de la interacción paciente-ventilador (bloque 3, figura 5). Las señales resultantes de la simulación: presión y flujo en la vía aérea, presión pulmonar, volumen circulante, frecuencia respiratoria, elastancia y resistencia, son registradas para permitir su visualización en el panel gráfico de monitoreo.



**Figura 6.** Diagrama de bloques de la mecánica ventilatoria, obtenido a partir de la ecuación (12). Este modelo permite variar  $R$  y  $E$  en cualquier momento de la simulación.

### INTERFAZ GRÁFICA

Dado el amplio número de parámetros de control para la configuración de los modos ventilatorios, se diseñó una interfaz gráfica interactiva con la herramienta *Guide* de Matlab, la cual permite configurar mediante pestañas, parámetros de control de los diferentes modos y de la mecánica ventilatoria del paciente.

La interfaz gráfica desarrollada cuenta con dos paneles (figura 7): el izquierdo para la configuración de los parámetros relacionados con la mecánica ventilatoria del paciente, y el derecho para la selección de los modos, la

configuración de los parámetros de control y el monitoreo de variables ventilatorias. En el diagrama mostrado en la figura 7, el panel está habilitado para la selección del modo ventilatorio. En la figura 8 se presenta el panel derecho habilitado para la configuración de los parámetros de control relacionados con el modo elegido y en la figura 9 se observa el mismo panel habilitado para la visualización de gráficas de presión, volumen y flujo, así como de algunos parámetros de monitoreo relacionados con la mecánica ventilatoria del paciente y parámetros de control del modo simulado.

El panel de configuración del paciente permite la configuración de un paciente arbitrario, además de la selección de diferentes niveles de enfermedad en pacientes Epoc y EPR. Adicionalmente, permite configurar la actividad respiratoria del paciente en cuanto a la frecuencia y magnitud de sus esfuerzos inspiratorios.

La ventana de “Modos” del panel derecho (figura 7) agrupa los modos ventilatorios según la variable controlada durante la ventilación (volumen o presión). Algunos modos particulares de marcas específicas de ventiladores no se encuentran disponibles en esta versión de la herramienta, pero son motivo de estudio y se tiene previsto incorporarlos en el futuro.

En la ventana de “Controles” del panel derecho aparecen disponibles los parámetros configurables del modo seleccionado (PC1, PC2, etc.) y se visualiza, a través del rectángulo ubicado en la parte superior derecha del panel, el valor de los parámetros de control configurados. Esta ventana cambia en función de cada modo ventilatorio, pero en todos los casos se presenta el patrón de flujo o presión, en la esquina superior izquierda, el cual es modificado de acuerdo con el patrón de flujo escogido, para el caso de los modos controlados por volumen, y de los valores de los parámetros de control.

Con respecto a las ventilaciones de los modos mandatorios, éstas pueden sincronizarse o no con los esfuerzos inspiratorios del paciente. En el caso de que se sincronicen, ya sea por presión o por flujo, una vez superado el umbral de activación establecido por el usuario, el ventilador atenderá dicho esfuerzo entregando una ventilación mandatoria, siempre y cuando dicho esfuerzo se haya realizado al final de la fase espiratoria.

En el caso de los modos ventilatorios que implican ventilación espontánea, la sincronización de las ventilaciones tanto mandatorias como espontáneas está

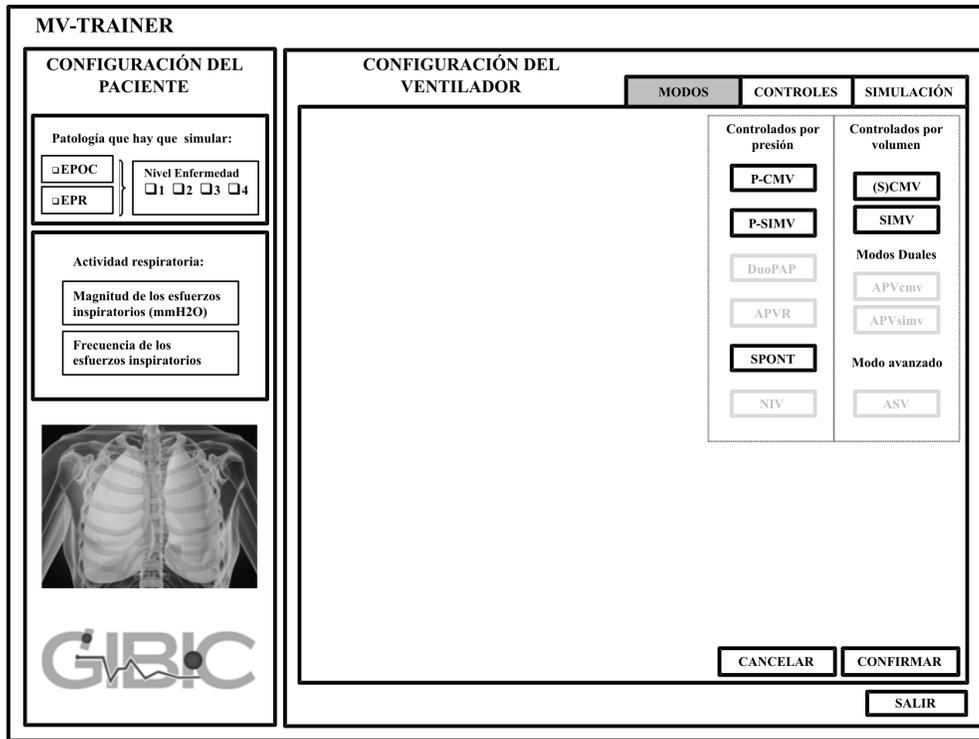


Figura 7. Esquema de la interfaz interactiva desarrollada para la configuración de parámetros ventilatorios del paciente (panel izquierdo) y para la selección del modo ventilatorio que hay que simular (panel derecho).

siempre activa y la ventilación de “Respaldo de apnea” se habilita para que el usuario la active o no. En caso de que este último sea activado, se configuran los parámetros de control relacionados con las ventilaciones mandatorias controladas de acuerdo con el modo elegido, con el fin de asistir al paciente si se presenta algún episodio de apnea. Dicho episodio es detectado cuando, alcanzado el tiempo de apnea configurado por el usuario (botón apnea), el ventilador no registra esfuerzos inspiratorios.

La última pestaña disponible en el panel derecho de la interfaz gráfica “Simulación” permite monitorear los trazos de las variables ventilatorias en los formatos comúnmente utilizados por los ventiladores mecánicos (figura 9). Es así como pueden visualizarse gráficas de presión, volumen y flujo vs. tiempo, bucles de presión vs. volumen y presión vs. flujo. Adicionalmente, se presentan valores numéricos de todas las variables de interés.

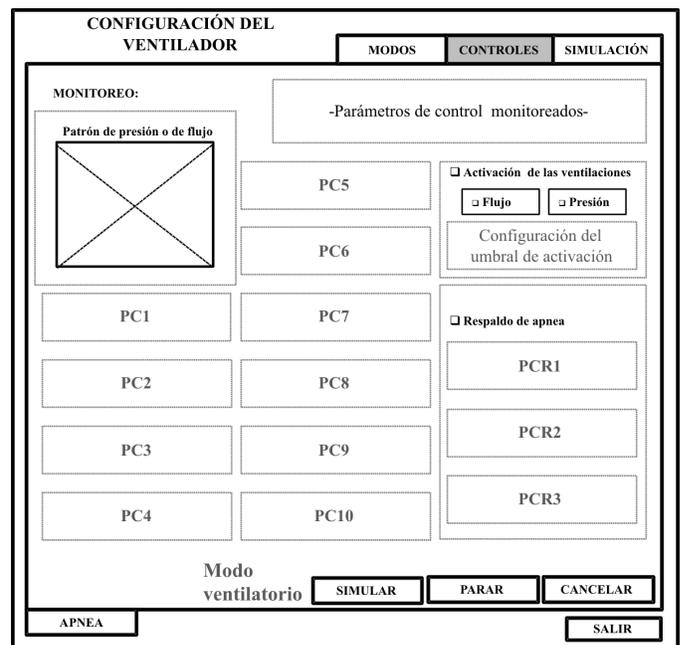
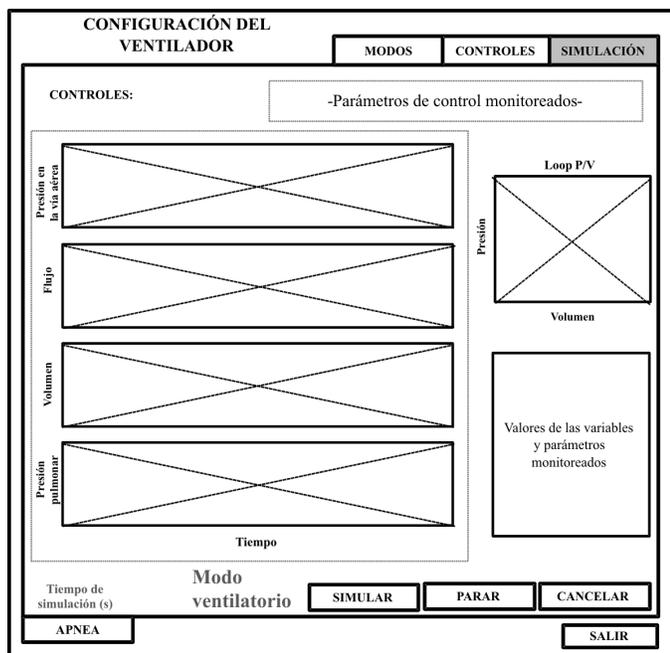


Figura 8. Panel derecho de la interfaz gráfica para la configuración de parámetros de control del modo seleccionado.



**Figura 9.** Panel derecho de la interfaz gráfica para el monitoreo de los parámetros de control del modo simulado y de las variables ventilatorias del paciente.

## RESULTADOS

Demostrar en el papel las ventajas de una aplicación interactiva como la presentada en este artículo no es simple y requiere la selección de ejemplos lo suficientemente ilustrativos que evidencien su alcance. A continuación se presentan dos casos de pacientes ventilados, cada uno con dos modos ventilatorios distintos, lo cual permite ilustrar la capacidad de la herramienta para simular diferentes patologías y la interacción con diversos modos ventilatorios.

Los tipos de patología seleccionados para la simulación son un paciente con enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) y un paciente arbitrario con una combinación de enfermedad pulmonar restrictiva (EPR) y EPOC. En la tabla 2 se muestra la configuración de actividad respiratoria del paciente y de los modos (S)CMV y SIMV. Los valores escogidos corresponden a la configuración típica de un paciente con patología obstructiva, de aproximadamente 70 kg de peso, que realiza quince esfuerzos respiratorios por minuto con una presión en la vía aérea de 1,5 cmH<sub>2</sub>O.

En la figura 10 se muestra la configuración descrita en la tabla 2 para el modo SIMV tras haber seleccionado la pestaña “Controles”. Como puede apreciarse, los parámetros habilitados son exclusivamente los relacionados con dicho modo ventilatorio.

En la figura 11 se presentan las gráficas de presión, flujo y volumen correspondientes a los casos simulados, de la misma manera en que aparecen en la interfaz gráfica mostrada previamente en la figura 9. También se pueden observar los bucles de volumen-presión obtenidos en los dos modos ventilatorios para los dos pacientes (cada paciente con un trazo diferente).

Con respecto al modo ventilatorio (S)CMV (parte superior de la figura 11), se puede observar que las curvas de flujo y volumen tienen una evolución idéntica durante la inspiración, independientemente del paciente, debido a que en este modo se controlan el flujo inspiratorio y el volumen circulante, mientras que en la espiración, por ser un proceso pasivo, el ventilador sólo controla el PEEP (5 cmH<sub>2</sub>O); cabe anotar que el comportamiento de estas curvas depende de los parámetros de resistencia y elastancia de la mecánica ventilatoria del paciente. En este modo la variable presión no es controlada, por lo que las curvas de presión en la vía aérea difieren en ambos casos durante la inspiración debido a las diferencias en la mecánica ventilatoria de los dos

**Tabla 2**  
Parámetros utilizados en la configuración de los modos (S)CMV y SIMV, y la actividad del paciente

		Parámetro	(S)CMV	SIMV
Configuración	Modo	Patrón de flujo	Cuadrado	Cuadrado
		Frecuencia	12 resp/min	10 resp/min
		Relación I:E	1:2	1:2
		% Pausa inspiratoria	10%	10%
		Volumen circulante	600 ml	600 ml
		PEEP	5 cmH <sub>2</sub> O	5 cmH <sub>2</sub> O
		Sincronización	Si	Si
		Disparo por presión	1 cmH <sub>2</sub> O	1 cmH <sub>2</sub> O
		P <sub>rampa</sub>	---	125 ms
		P <sub>soporte</sub>	---	12 cmH <sub>2</sub> O
	ETS	---	10%	
Paciente	Frecuencia esfuerzos inspiratorios	15 resp/min	Aleatoria	
	Amplitud esfuerzos inspiratorios	1,5 cmH <sub>2</sub> O	1,5 cmH <sub>2</sub> O	

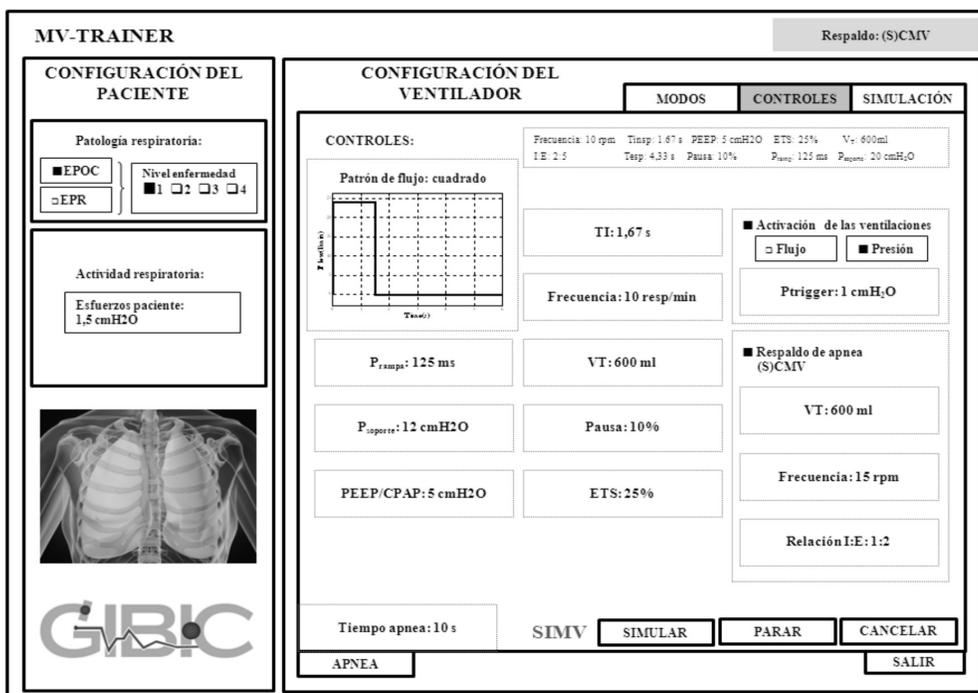
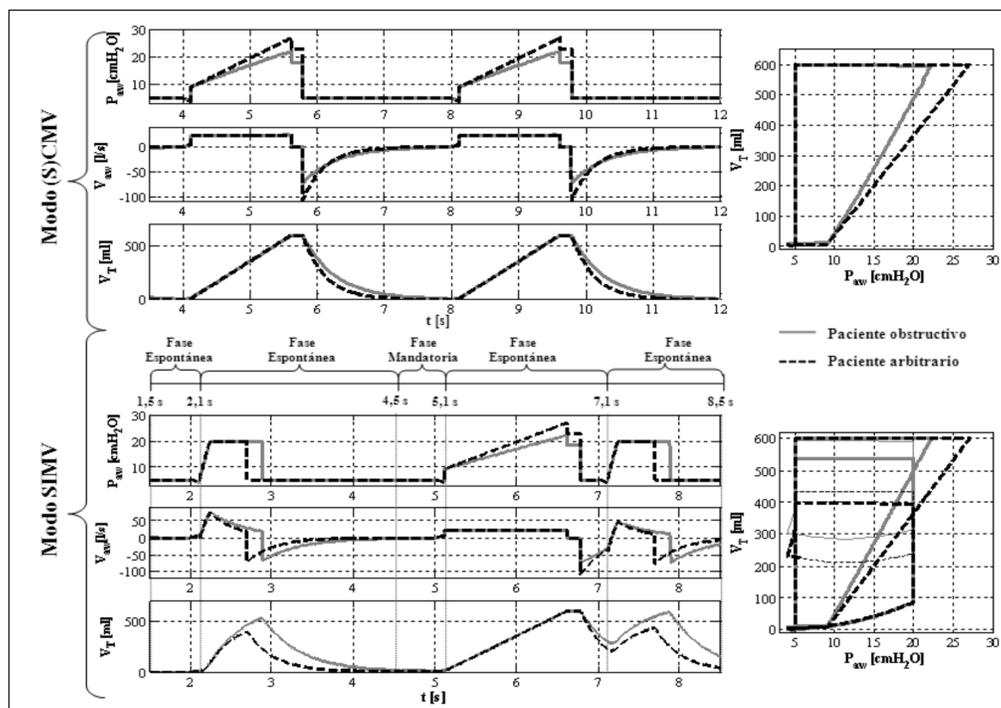


Figura 10. Configuración de los parámetros ventilatorios del paciente y de control del modo SIMV.

pacientes. A pesar de que la frecuencia configurada para el modo ventilatorio es 12 resp/min, la resultante en la simulación es 15 resp/min ( $T_{tot} = 4s$ ), debido a que el ventilador sincroniza las ventilaciones entregadas con los esfuerzos inspiratorios del paciente (15 resp/min, tabla 2). Dichos esfuerzos se visualizan en la gráfica de presión como pequeñas deflexiones por debajo de la presión PEEP. La curva de volumen muestra el fenómeno de hiperinflación dinámica propio de pacientes Epoc, pues durante la fase espiratoria no se consigue evacuar eficientemente el volumen circulante debido a la elevada resistencia en la vía aérea. El bucle de volumen vs. presión indica que el paciente arbitrario (línea a trazos) tiene una elastancia elevada, pues requiere mayor esfuerzo (mayor presión en la vía aérea) para obtener el mismo volumen circulante.

En la simulación del modo SIMV, que combina tanto ventilaciones mandatorias como espontáneas, el tiempo del ciclo respiratorio ( $1/f_R$ ) se divide en dos fases: la primera, que corresponde al 40% del ciclo total, constituye una ventana de activación para las ventilaciones espontáneas ( $T_{espont}$ ) asistidas con presión de soporte, y la segunda (60% restante), una ventana de activación para las ventilaciones mandatorias [5].

El inicio de una ventilación (mandatoria o espontánea) indica el comienzo de la fase espontánea, mientras que la finalización de dicha fase marca el principio de la fase mandatoria (figura 11). Si durante el intervalo mandatorio ( $T_{mand}$ ) el paciente no inicia ninguna ventilación, el ventilador entrega una ventilación mandatoria al final de esta fase. Como puede observarse en las gráficas de la figura 11, la primera ventilación se realiza en  $t=2,1 s$  (correspondiente a menos del 40% del ciclo total), debido a un esfuerzo inspiratorio del paciente, por lo que es asistido con una presión de soporte de 20 cmH<sub>2</sub>O (fase espontánea). El segundo esfuerzo inspiratorio ocurre en  $t=5,1 s$  (fase mandatoria), por lo que la ventilación es totalmente controlada por el ventilador. Dado que el paciente realiza un tercer esfuerzo inspiratorio aún durante la segunda fase espontánea, la tercera ventilación vuelve a ser asistida con presión de soporte. En la gráfica de volumen se observa que la asistencia con presión de soporte beneficia mucho más al paciente obstructivo que al restrictivo (arbitrario), pues en el primer caso se alcanzan mayores volúmenes circulantes. Durante una ventilación mandatoria sincronizada (segunda ventilación en la figura 11), los dos pacientes alcanzan el volumen programado (600 ml); sin embar-



**Figura 11.** Curvas de presión, flujo y volumen obtenidas durante la simulación de los modos (S)CMV y SIMV en un paciente Epop y otro arbitrario con elevada elasticidad pulmonar.

go, el paciente arbitrario (restrictivo) requiere mayores presiones. Por otra parte, la curva de flujo muestra cómo el paciente obstructivo tiene una elevada resistencia, ya que la curva de flujo tiene valores muy inferiores a los del paciente arbitrario. La tercera ventilación ocurre antes de que se inicie una nueva fase mandatoria ( $t=7,1$  s), debido a un esfuerzo inspiratorio del paciente; por tal motivo, la ventilación es asistida con la presión de soporte programada, de modo similar a como ocurre con la primera ventilación.

El bucle de volumen vs. presión muestra las tres ventilaciones de los dos pacientes (la tercera en un trazo más delgado). Nótese que el bucle del paciente obstructivo se desplaza hacia volúmenes superiores, lo que indica que se ha producido hiperinflación dinámica a causa de la incrementada limitación al flujo espiratorio, que es un efecto bastante conocido en pacientes con Epop y suele eliminarse reduciendo el PEEP paulatinamente.

En la figura 12 se presenta una vista de la interfaz gráfica en la que se pueden observar las curvas de presión y flujo en la vía aérea, volumen y presión pulmonar, el bucle volumen-presión, además de los parámetros de control relacionados con el modo ventilatorio y algunos parámetros de monitoreo que tienen que ver con la

mecánica ventilatoria del paciente, como la ventilación por minuto, la resistencia y la elasticidad respiratorias, entre otros.

## CONCLUSIONES

Se ha diseñado e implementado una herramienta interactiva con características gráficas similares a las encontradas en los ventiladores mecánicos de última generación, que permite simular la interacción entre un paciente con una enfermedad respiratoria común y un ventilador mecánico. El sistema cuenta con todos los parámetros y variables útiles en la configuración de los ventiladores mecánicos, y dado que incorpora un complejo modelo del sistema de control respiratorio, permite simular patologías obstructivas como la Epop, restrictivas (EPR) y cualquier otra patología relacionada con la mecánica ventilatoria que el usuario quiera configurar.

La herramienta informática diseñada es completamente gráfica e interactiva, con miras a facilitar su uso por parte de personal asistencial tanto entrenado como no entrenado en temas de ventilación mecánica. Los modelos matemáticos empleados en la simulación

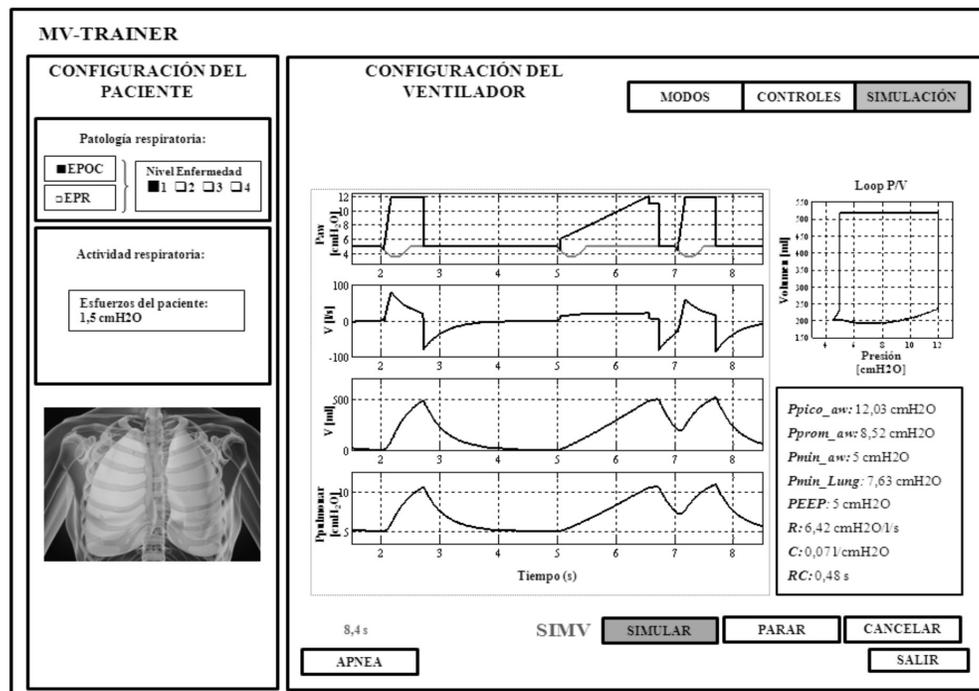


Figura 12. Visualización de las curvas de presión, flujo y volumen, del bucle volumen-presión, y de los parámetros de control del modo ventilatorio y de la mecánica ventilatoria del paciente en la interfaz gráfica.

de la interacción paciente-ventilador subyacen la aplicación informática y están ocultos al usuario, con el fin de no complicar innecesariamente la utilización de la herramienta.

Pruebas preliminares contrastadas con textos científicos y el concepto de médicos intensivistas con experiencia en ventilación mecánica que han valorado satisfactoriamente el desempeño del sistema permiten afirmar que se trata de una herramienta idónea como complemento en cursos de entrenamiento y aprendizaje de la mecánica ventilatoria, así como en la configuración y utilización de la ventilación mecánica. En fases posteriores se espera implementar otros modos ventilatorios y validar el sistema con datos experimentales registrados en pacientes ventilados mecánicamente, con el propósito de habilitarlo para su empleo en la práctica clínica.

REFERENCIAS

[1] Guyton, A.C. (2001). Ventilación pulmonar, *Tratado de fisiología médica*, 10 ed. Madrid: Editorial Interamericana/McGraw-Hill.  
 [2] Hernández, A.M., Mañanas, M.A., Caminal, P., Rabinovich, R. & Benito, S. (2007). Predicción del patrón respiratorio en sujetos

sanos mediante control óptimo y un clasificador estadístico/Bioingeniería, en XXVIII Jornadas de Automática.  
 [3] Johnson, A.T., Lausted, C.G. & Bronzino, J.D. (2000). Respiratory System. J. D. Bronzino [ed.]. *Biomedical Engineering Handbook*, vol. II, 2a. ed. Boca Ratón: Editorial CRC Press LLC.  
 [4] Waugh, J.B., Deshpande, V.M., Brown, M.K. & Harwood, R.J. (2006). Rapid Interpretation of Ventilator Waveforms, 2a. ed. Editorial Prentice Hall.  
 [5] Perel, A. & Stock, M.C. (1997). *Handbook of Mechanical Ventilatory Support*, 2a. ed. Editorial Lippincott Williams & Wilkins.  
 [6] Hess, D.R. & Kacmarck, R.M. (2002). *Essentials of Mechanical Ventilation*, 2a. ed. Editorial McGraw-Hill Medical.  
 [7] Poon, C.S., Lin, S.L. & Knudson, O.B. (1992, May). Optimization character of inspiratory neural drive, *J Appl Physiol*, vol. 72, No. 5, pp. 2005-2017.  
 [8] Younes, M. & Riddle, W. (1981). A model for the relation between respiratory neural and mechanical outputs (I. Theory), *J Appl Physiol*, 51(4), pp. 963-78.  
 [9] Tobin, M.J. (1986, December). The Pattern of Breathing During Successful and Unsuccessful Trials of Weaning from Mechanical Ventilation, *Am Rev Respir Dis*, vol. 134, pp. 1111-1118.  
 [10] Poon, C.S. (2000). Respiratory Models and Controls. Joseph D. Bronzino [ed.]. *Biomedical Engineering Handbook*, vol. 2, 2a. ed. Editorial CRC Press LLC.  
 [11] Mañanas, M.A., Hernández, A.M., Rabinovich, R., Benito, S. & Caminal, P. (2004). Modeling and evaluation of respiratory and muscle pattern during hypercapnic stimulus, en *Conference Proceedings: 26th Annual International Conference of the EMBS*, vol. 6. pp. 3913-3916.  
 [12] Golden, J.F., Jr. Clark, J.W. & Stevens, P.M. (1973, November).

Mathematical modeling of pulmonary airway dynamics, *IEEE Trans Biomed Eng.*, vol. 20, No. 6, pp. 397-404.

[13] Zhao, Y.C., Rees, S.E., Kjaergaard, S. & Andreassen, S. (2005). Simulation of Pulmonary Pathophysiology During Spontaneous Breathing, en *Proceedings of the 27th Annual International Conference of the EMBS*, IEEE.

[14] Barbini, P., Cevenini, G. & Avanzolini, G. (2003, September). Nonlinear Mechanisms Determining Expiratory Flow Limitation in Mechanical Ventilation: A Model-Based Interpretation, *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 31, No. 8, pp. 908-916.

[15] Hernández, A.M. (2007). Análisis del sistema de control respiratorio ante estímulos y patologías ventilatorias. Tesis doctoral. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.

[16] Chatburn, R. (2006). Classification of Mechanical Ventilators. M.J. Tobin [ed.]. *Principles and Practice of Mechanical Ventilation*, 2a. ed. Editorial McGraw-Hill.

# Producción de material compuesto a partir de cenizas volantes y polímeros reciclados

## Production of composite materials from fly ash and recycled polymers

WILLIAM APERADOR<sup>1</sup>, ARNOLDO EMILIO DELGADO<sup>2,3</sup>, ÉDGAR GIOVANNY VILLAMIL<sup>1</sup>,  
DIANA PAOLA FORERO<sup>1</sup>, ANDRÉS PARRA<sup>1</sup>

1. Ingeniería Mecánica, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, D.C., Colombia.

2. Ingeniería Industrial, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, D.C., Colombia.

3. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, D.C., Colombia.

Recibido: 18/05/2009 Aceptado: 22/11/2009  
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

### Resumen

Cenizas volantes procedentes de la central termoeléctrica de Termozipa se combinaron con los polietilenos de baja densidad (*stretch film*) y lineal de posconsumo y polipropileno posindustrial. Se obtuvieron mezclas variando el contenido de cenizas volantes de 0 a 50% en peso en cada uno de los tres materiales poliméricos, dentro de una máquina mezcladora tipo Brabender con capacidad de 60 g. El mecanismo de mezclado generó movimientos de tipo turbulento y convectivo, produciendo mezclas de forma distributiva. Se monitoreó el torque de las tres mezclas y se observó que a medida que el porcentaje de ceniza volante en las mezclas se incrementa, el torque del sistema aumenta.

**Palabras claves:** polímeros reciclados, ceniza volante, material compuesto, torque.

### Abstract

We combined fly ash from a coal power plant with low-density lineal polyethylene (*Stretch film*) of post-consumption and post-industrial polypropylene. We obtained mixtures by varying the content of fly ash from 0 to 50% by weight in each of the three polymeric materials in a Brabender mixer machine with capacity of 60 g. The mechanism of mixing originates convective and turbulent motions, producing a mixture distribution. By monitoring the torque of the three mixtures, we note the torque of the system increases as fly ash percent in mixtures increases.

**Keywords:** recycled polymers, fly ash, composite material, torque.

## INTRODUCCIÓN

Los creadores de los nuevos materiales de ingeniería buscan satisfacer todos los requerimientos mecánicos, de diseño y costo, así como generar un menor impacto al ambiente en su producción o durante el servicio. Con el crecimiento de la industria de la construcción a nivel mundial y el propósito de suministrar materiales cada vez más económicos y que contribuyan a proteger el medio ambiente, ha tenido lugar el desarrollo de materiales alternativos para la producción de paneles de construcción. Dos tipos específicos de dichos materiales son los obtenidos a partir de polímeros reciclados y cenizas volantes.

Los materiales están evolucionando más rápido en la época actual que en cualquier momento anterior en la historia. Nuevos polímeros, elastómeros, cerámicas y materiales compuestos están en desarrollo; las formas de procesamiento son más baratas, y la producción más reproducible en comparación con los materiales convencionales [1-2]. Los materiales compuestos de matriz polimérica se han desarrollado a un nivel de producción comercial en las industrias automotriz, de envasadoras, electrónica, aeroespacial y de aparatos recreativos [3-6].

El rápido crecimiento en el uso de los materiales constituidos por sistemas poliméricos multifásicos (mezclas y compuestos) está relacionado indudablemente con la disponibilidad de métodos que permitan controlar las interacciones físicas y químicas en la interfaz. Los compuestos que actúan como agentes interfaciales son denominados compatibilizadores para el caso de mezclas y agentes de acople en el compuesto. Las propiedades físicas y mecánicas eficaces están relacionadas con la presencia de una fase finamente dispersa con buena adhesión con la matriz y resistencia a la coalescencia [7-9].

Las centrales termoeléctricas generan una alta tasa de ceniza volante, debido a que por cada tonelada de carbón pulverizado que se quema en una central termoeléctrica de carbón se producen aproximadamente 200 kg de cenizas volantes; el consumo del carbón pulverizado origina problemas ambientales debido a la acumulación de cenizas volantes en grandes depósitos en zonas próximas al lugar de consumo. En la mayoría de los casos, se tiende a utilizar los residuos de combustión del carbón reemplazando otros recursos naturales, por lo que se ofrecen beneficios ambientales. A causa de la elevada producción a escalas nacional y mundial

de cenizas volantes es necesario el reciclaje de dicho producto, por lo que actualmente la vía de valorización de este residuo es su utilización en la fabricación de cemento [10-11].

El reciclaje de polímeros en Colombia se encuentra en una etapa inicial, pero en países como Alemania, Estados Unidos, Japón o Dinamarca han desarrollado programas de tratamiento de residuos con el propósito de generar nuevos materiales. La Agencia de Protección Ambiental (EPA, por su sigla en inglés), de Estados Unidos [12], realizó un estudio de residuos sólidos urbanos (RSU) en el que se demuestra que los residuos poliméricos son el tercer componente más grande, después del papel y residuos de material de construcción generados en los RSU, que representan el 9% en peso. El porcentaje de reciclado de polímeros es solamente el 5%, frente al 40% para el papel y el 30% de residuos de material de construcción. Este bajo valor de reciclado de polímeros se debe principalmente a la tecnología y el costo de reciclado. El polietileno de baja densidad (*stretch film*), usado en el hogar y embalaje posconsumo; el polietileno de baja densidad lineal, utilizado como empaque de bolsas de leche posconsumo, y el polipropileno posindustrial, son tipos de polímeros que se encuentran en los RSU.

El objetivo de este estudio fue el uso de polímeros reciclados y las cenizas volantes para producir un nuevo material compuesto, con el propósito de utilizarlo en el sector de la construcción civil. Debido a que los materiales empleados en esta investigación son residuos sólidos, su uso beneficia el medio ambiente.

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

### Materiales

Los materiales poliméricos de posconsumo y posindustrial se obtuvieron de diferentes fuentes. El polietileno de baja densidad lineal fue reciclado de los empaques de bolsas de leche, el polietileno de baja densidad (*stretch film*) es parte de la masa de residuos sólidos urbanos, ya que combina empaque con usos varios en el hogar, como protección y empaque, en la conservación de alimentos, trasteos o envíos, etc., en tanto que el polipropileno proviene de los residuos de los procesos de fabricación de telas no tejidas. El carbón utilizado en la central termoeléctrica de Termozipa es triturado, pulverizado y posteriormente introducido dentro de la cámara de

combustión. Los componentes orgánicos son oxidados y volatilizados durante la combustión, mientras una gran parte de la materia mineral es transformada en subproductos residuales sólidos: cenizas volantes y escorias. Las cenizas volantes están compuestas por partículas que debido a su pequeño tamaño son arrastradas por el flujo de gases que se generan durante la combustión del carbón. Para retener las cenizas volantes del flujo de gases que sale de la cámara de combustión y evitar que sean emitidas a la atmósfera se emplea un sistema de retención denominado precipitador electrostático, el cual presenta una mayor eficiencia, por lo general superior al 99,5% [13]. Las cenizas volantes se recogen en las tolvas de los precipitadores electrostáticos, desde donde son transportadas a lugares de almacenamiento, situados en balsas de decantación. Esta ceniza volante se caracteriza como clase F cenizas, según la norma ASTM, especificación estándar C 618 [14]. Las partículas fueron principalmente las esferas, como se muestra en la micrografía electrónica de barrido (figura 1).

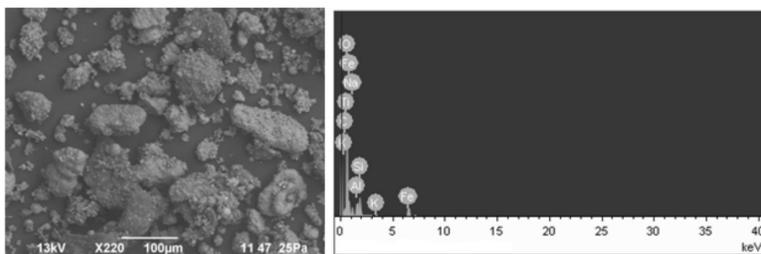


Figura 1. Micrografía y espectro EDS de la ceniza volante.

#### Detalles experimentales

El procedimiento para la obtención de material compuesto incluye tres pasos, principalmente: 1) pesaje de cada uno de los componentes (polímeros y ceniza volante), y la mezcla de polímeros y las cenizas volantes; 2) calentamiento y mezcla de la muestra, y 3) moldeo. Los polímeros utilizados y las cenizas volantes se pesaron por separado, y posteriormente se mezclaron dentro de un recipiente. El contenido de cenizas volantes varió de 0, 10, 20, 30, 40 y 50% en peso. El proceso de calentar y realizar la mezcla se hizo en una mezcladora tipo Brabender (figura 2), la cual es un equipo que cuenta

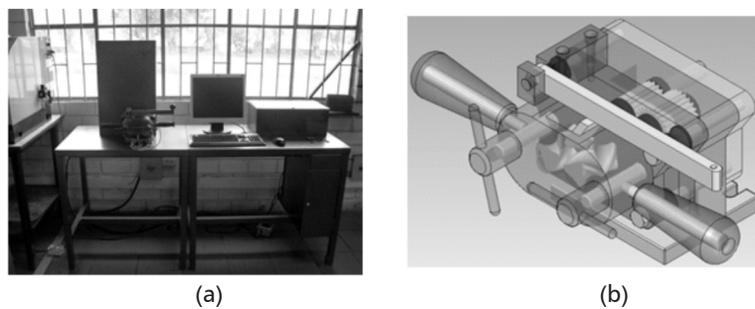
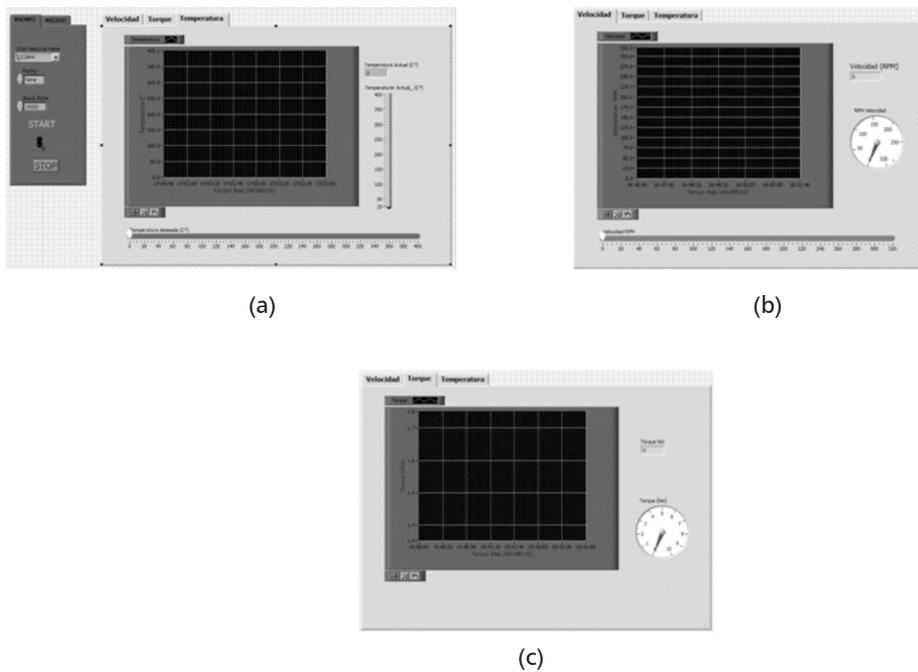


Figura 2. a) Mezcladora tipo Brabender, donde se obtuvo el material compuesto; b) vista frontal donde se observan el sistema de mezclador y el contenedor donde se fusionó el material compuesto.

con mecanismos de mezclado que genera movimientos de tipo difusión molecular, movimiento turbulento y convectivo, generando mezclas en forma distributiva. El mezclador se compone de contenedores, separadores, elementos de transmisión de potencia, sistemas de lubricación, contención de fluidos y de calentamiento. Además, cuenta con un sistema de control y lectura de los parámetros de temperatura y velocidad obtenidos mediante la tarjeta NI PCI 6221 de National Instruments, usando el *software* de instrumentación virtual Lab-View®; la temperatura de procesamiento fue de 200 °C en todos los casos, la velocidad de 50 rpm y la respuesta que se midió del sistema fue el torque generado. Posteriormente se utilizó un molde de acero de 15 x 15 x 0,5 cm, para obtener las probetas.

#### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El material compuesto obtenido en el mezclador se generó a una velocidad constante en las aspas que se encuentran dentro del recipiente de mezclado, así como a una temperatura de 200 °C, durante diez minutos. Los parámetros velocidad, temperatura y tiempo de procesado se fijaron desde una interfaz gráfica en el computador. Su funcionamiento se puede representar por el esquema de la figura 3. El motor se controla en su totalidad a través del variador de velocidad vectorial, en el que se establecen la rampa de aceleración, la cual es de 5 s, y la rampa de desaceleración, de 5 s. El variador de velocidad lleva a cabo un control PID sobre la velocidad deseada. La interfaz gráfica del equipo es realizada mediante Labview 8.0, donde se hizo la visualización en la velocidad motor y temperatura del recipiente y torque

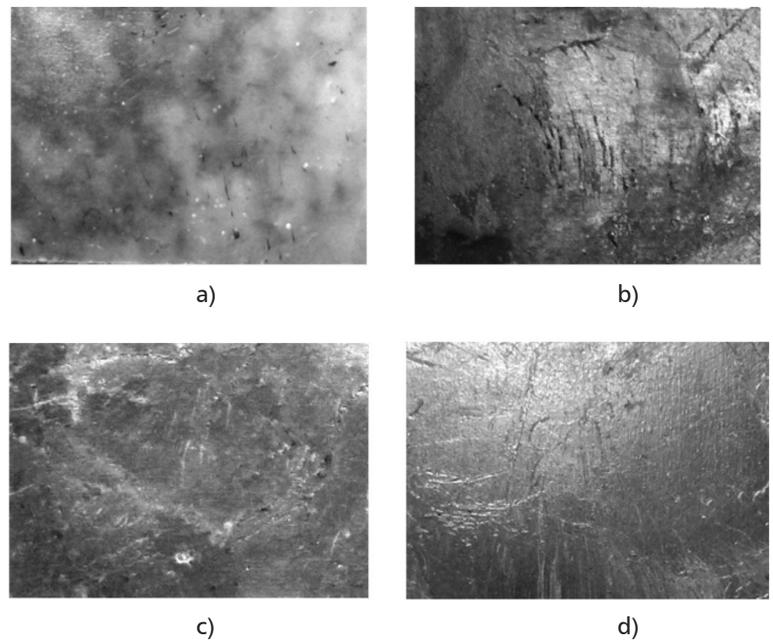


**Figura 3.** Esquema del *software* utilizado para controlar y manipular las variables de a) temperatura, b) velocidad y obtener la respuesta del sistema c) torque del motor.

del motor; en conjunto, esto genera la exportación de datos a Excel de la visualización realizada. La interfaz se encuentra separada en dos fases: la primera es una configuración de parámetros de comunicación con el circuito electrónico de control de temperatura, donde los valores de la imagen son los predeterminados; la segunda es una configuración de parámetros de comunicación con el variador de velocidad. El botón Start, Stop pone en marcha y detiene el variador de velocidad, respectivamente. Se encuentra gráfica de la velocidad del motor vs. tiempo en rpm, así como un Slider para seleccionar la velocidad en rpm deseada (figura 7b); en la figura 7c se visualiza el torque del motor en newtons-metro vs. tiempo; por último, la gráfica de temperatura en grados Celsius vs. tiempo (figura 7d), así como un Slider para seleccionar la temperatura deseada.

Al realizar una inspección visual del material compuesto se observa que en las probetas obtenidas hay una textura muy fina y de superficie lisa en todos los contenidos de las mezclas con cenizas volantes. Como se observa en la figura 4, el color fue cambiando gradualmente con el aumento de la ceniza volante de gris a negro oscuro.

En la figura 5 se puede ver una curva de la mezcla



**Figura 4.** Probetas obtenidas de las mezclas de polímero reciclado y cenizas volantes; a) polímero sin mezclar con ceniza volante; b) polietileno de baja densidad (*stretch film*) mezclado con ceniza volante; c) el polietileno de baja densidad lineal se recicló de los empaques de bolsas de leche, mezclado con ceniza volante; d) polipropileno posindustrial de recorte de telas no tejidas, mezclado con ceniza volante.

polietileno de baja densidad (*stretch film*) que ilustra los cambios en el torque sufridos durante el proceso de mezclado. El máximo en la curva del torque resulta de la carga de la mezcla (cenizas volantes) y es registrado antes de la fusión completa de los materiales. Posteriormente se observa un descenso en cada una de las curvas debido al proceso de fundido y el mezclado homogéneo obtenido en las mezclas, proceso que se demora entre tres y siete minutos. Durante este tiempo, la temperatura de la masa fundida aumenta hasta alcanzar un valor constante. En razón de que el torque y la temperatura de la mezcla se estabilizan, esto indica que se ha alcanzado el equilibrio; además, a medida que se aumenta el porcentaje de ceniza volante los valores del torque corresponden a un incremento debido a que se necesita mayor torque para lograr la fusión, la plastificación y el mezclado completo.

En la figura 6 se representa el polietileno de baja densidad lineal, el cual fue reciclado de los empaques de bolsas de leche y mezclado con cenizas volantes, se observa un comportamiento similar al obtenido en el polietileno de baja densidad (*stretch film*), donde se obtiene que el torque es una magnitud extensiva; por tanto, depende de la masa introducida (a mayor masa, mayor torque). Las mezclas del material compuesto

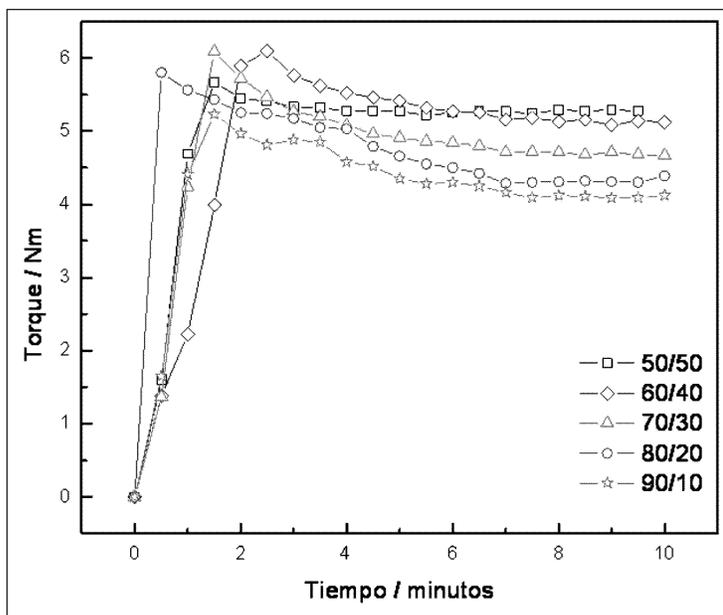


Figura 5. Torque en función del tiempo de mezclado del polietileno de baja densidad (*stretch film*), mezclado con ceniza volante en porcentajes del 0 al 50%.

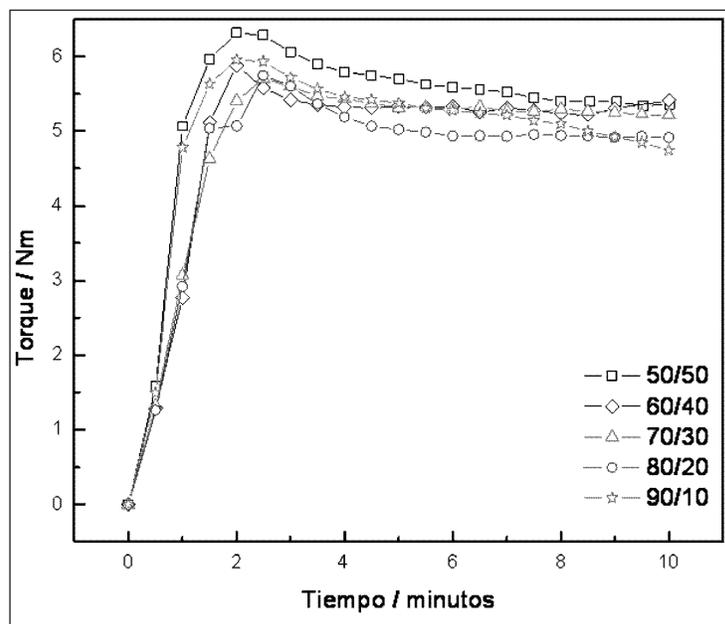


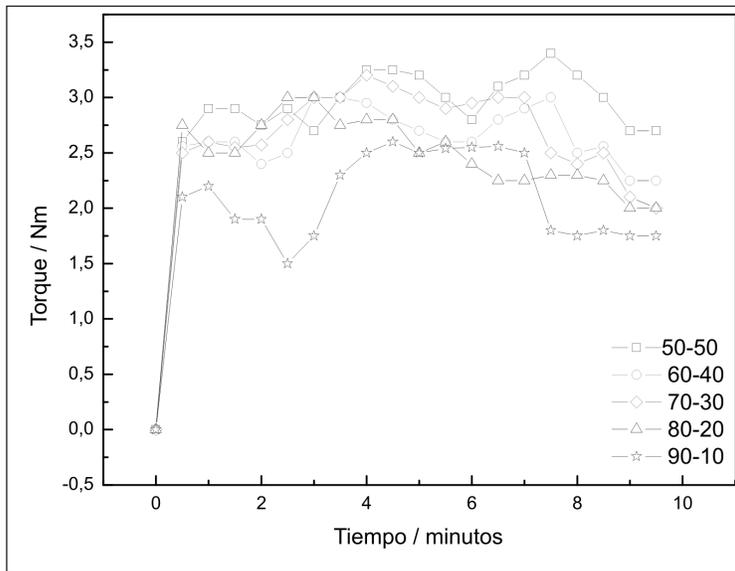
Figura 6. Torque en función del tiempo de mezclado del polietileno de baja densidad lineal reciclado de los empaques de bolsas de leche, mezclado con ceniza volante en porcentajes del 0 al 50%.

dentro de la Brabender generan un comportamiento pseudoplástico, pero a causa de la baja velocidad de cizalla la tensión de cizalladura tiene una dependencia casi lineal con la viscosidad, es decir, se puede aproximar y decir que se comportan como un fluido newtoniano.

En la figura 7 se observa el polipropileno posindustrial de recorte de telas no tejidas; se obtiene una reducción del torque en comparación con las mezclas de polietileno. Las curvas obtenidas muestran un pequeño torque inicialmente, debido a que la carga del sistema no se ha mezclado con el polímero, lo cual es señal de la poca compatibilidad al principio del mezclado. Luego de los dos minutos se obtiene un aumento del torque, lo que indica la fusión completa del material compuesto; posteriormente se observa la disminución del torque. Después de los siete minutos en las mezclas se observa una estabilización del sistema debido al equilibrio alcanzado en la mezcla.

## CONCLUSIONES

Se demostró la factibilidad de la producción de láminas de material compuesto a partir de polietilenos posconsumo y polipropileno posindustrial mezclados con cenizas volantes, generando una buena opción en



**Figura 7.** Torque en función del tiempo de mezclado del polipropileno posindustrial de recorte de telas no tejidas, mezclado con ceniza volante en porcentajes del 0 al 50%.

el uso de estos compuestos como material alternativo de construcción ligero.

Con respecto al torque, se indicó que el material que se mezcla con mayor facilidad es el polietileno de baja densidad; por tanto, se pueden obtener mezclas óptimas para las aplicaciones deseadas.

#### Agradecimientos

Los autores del presente trabajo expresan su agradecimiento a la dirección de investigaciones de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, por el financiamiento recibido para su ejecución.

#### REFERENCIAS

- Xu, Y.L. & Reifsinder, K.L. (1993). Micromechanical modelling of composite compressive strength, *J Compos Mater* 27 (6), pp. 572-588.
- Kenny, J. (2003). Joining Technologies for Polymeric Matrix Composites: Present and Future. *Composit workshop on "Joining Technologies for Composite Transportation Structures"*, Orbassano.
- Argon, A.S. (1972). Fracture of composites, *Treatise of material science and technology*, vol. 1. Nueva York: Academic Press.
- Lagoudas, D.C. & Saleh, A.M. (1993). Compressive failure due to kinking of fibrous composites, *J Compos Mater* 27 (1), pp. 83-106.
- Recasens, J. (2002). Nuevas aplicaciones de los materiales compuestos en la construcción. *16ª Jornadas de Materiales Compuestos/Plásticos Reforzados*. Barcelona.
- Niklewicz, J., & Sims, G.D. (2002, January). Size effects in composite materials. Structural Integrity and Performance Project CPD1, National Physical Laboratory, NPL Report MATC (A) 74.
- Milgrom, J. (1992). Polyethylene terephthalate (PET). In R.J. Ehrig RJ (ed.). *Plastics Recycling: Products and Processes*. Nueva York: Hanser, 45-71.
- Rebeiz, K.S., Fowler, D.W. & Paul, D.R. (1996). Strength properties of unreinforced and reinforced polymer concrete using recycled PET. *Polym Recycl* 2:133-139.
- Alkan, C., Arslan, M., Cici, M., Kaya, M. & Aksoy, M. (1995). A study on the production of a new material from fly ash and polyethylene, *Resour. Conserv. Recy*, 13, pp. 147-154.
- Criado, M., Palomo, A. & Fernández-Jiménez, A. (2005). Alkali activation of fly ashes. Part 1. Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products, *Fuel* 84, pp. 2048-2054.
- Bastidas, D.M., Fernández-Jiménez, A., Palomo, A. & González, J.A. (2008). A study on the passive state stability of steel embedded in activated fly ash mortars, *Corros Sci*, 50, pp. 1058-1065.
- Usepa (2007). Characterization of municipal solid waste in the United States: 2006 Update, EPA 540-R-67-034.
- Smith, I. (1987). Trace Elements from Coal Combustion: Emissions. IEACR/01. *IEA Coal Research*, 87 pp.
- ASTM C618 - 08a (2008). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, West Conshohocken, PA, American Society for Testing and Materials.

# Puente rectificador configurable implementado con sistemas microprocesados para aplicaciones en máquinas eléctricas

Configurable bridge rectifier implemented with microprocessor system for applications in electrical machines

ENRIQUE ESTUPIÑÁN ESCALANTE<sup>1</sup> y LUIS FERNANDO PINILLOS GÓMEZ<sup>2</sup>  
1. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, D.C., Colombia.

Recibido: 20/06/2009 Aceptado: 12/12/2009  
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

## Resumen

Los puentes rectificadores en el control de motores de corriente continua se diseñan a la medida del motor particular que se desea controlar. Un diseño general en el que se usan microprocesadores permite adaptar por *software* diferentes configuraciones posibles para adecuarse al tipo de carga o, incluso, a disturbios en la alimentación alterna proveniente de la red eléctrica. En este trabajo se presenta un algoritmo que permite modificar la configuración del puente rectificador, cuyo circuito de control de fase es operado desde un microcontrolador, de acuerdo con los requerimientos del usuario.

**Palabras claves:** puentes rectificadores, motores, control de motores de corriente continua y microprocesadores.

## Abstract

The bridges rectifiers in the control of DC motors are designed to fit the particular motor you want to control. A design with microprocessors allows software-adapted settings to suit the type of charge or even disturbances in the AC power from the electric network. This paper exposes an algorithm to modify the configuration of the bridge rectifier which phase control circuit is operated from a microcontroller, according to user requirements.

**Keywords:** bridge rectifiers, motors, control of DC motors, microprocessors.

## INTRODUCCIÓN

Si bien los motores de AC han desplazado a sus equivalentes DC en la mayoría de las aplicaciones industriales [1] [2], los accionamientos para máquinas DC continúan vigentes en sistemas de control de velocidad con alta precisión [3]. Los accionamientos para los motores de corriente continua y los circuitos de excitación de generadores sincrónicos hacen uso de la electrónica de potencia [4] como vehículo de conversión y propulsión de energía eléctrica, no sólo por la facilidad de realizar labores de control, sino también por su alto desempeño dinámico [5] [6]. En este artículo se presentan los resultados de la construcción de un puente rectificador que explora diferentes posibilidades de accionamientos sobre un motor de DC.

El actuador para motores de corriente continua más representativo es el puente rectificador totalmente controlado [7]. En estos puentes, el control del ángulo de disparo a partir de una señal de control se hace típicamente con circuitos de procesamiento de señal analógica, pero el uso de microcontroladores incorpora una serie de ventajas inherentes a los sistemas digitales [8], como el registro y procesamiento de señales, las comunicaciones, la instrumentación con indicación y la configuración de la operación por *software*. La búsqueda de un algoritmo óptimo en tiempo de procesamiento, funcionalidad y recursos de memoria de programa, en un sistema microprocesado que resuelva el problema de disparo de los dispositivos semiconductores en el marco de un sistema de control sobre un motor eléctrico de DC, es un problema ya explorado [9]; es más, ya existen propuestas eficientes para el desarrollo algorítmico del disparo de SCR en puentes rectificadores [10] [11]. En [12] se presenta una implementación de los algoritmos propuestos en [11] para una configuración de un puente rectificador en particular, pero no se abordan configuraciones diferentes para los puentes rectificadores. En este proyecto se redefinen algunos conceptos para ampliar su cobertura a cualquier tipo de puente y en cualquier tipo de carga motor, y se presentan los resultados de su construcción e implementación.

## PUNTES RECTIFICADORES

Los puentes rectificadores son arreglos de dispositivos semiconductores con la capacidad de rectificar, es decir, convertir una señal de valor promedio nulo en una señal con un determinado valor promedio.

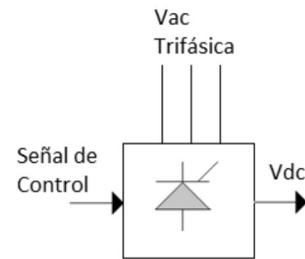


Figura 1. Proceso de rectificación.

En la figura 1 se muestra el proceso de rectificación. La señal de control permite ajustar el valor promedio del voltaje de salida,  $V_{dc}$ . El voltaje de entrada,  $V_{ac}$  trifásico, permanece con valores fijos de frecuencia, aunque puede modificar su amplitud mediante transformadores, para ajustarse a los datos nominales del voltaje  $V_{dc}$  en la carga. La estructura de puente es una topología en la conexión de los dispositivos semiconductores (figura 2).

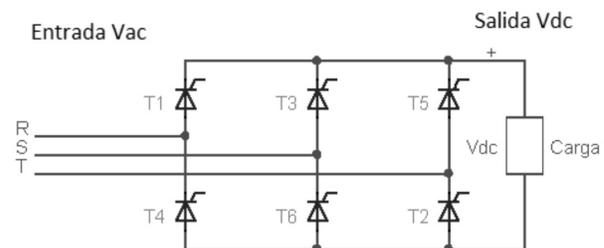


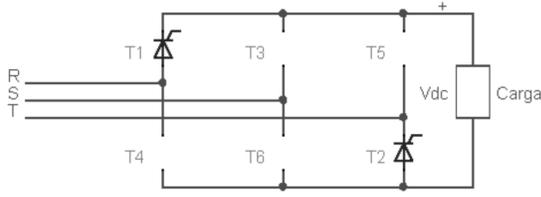
Figura 2. Estructura de puente de SCR.

Para la construcción de los puentes rectificadores puede emplearse una amplia gama de dispositivos semiconductores, pero en el proceso de rectificación los más usados son el diodo rectificador de potencia y el rectificador controlado de silicio (SCR, por su sigla en inglés), conocido comúnmente como Tiristor. A partir de la elección de cada uno de estos dispositivos, la cantidad de fases en el lado de AC, la orientación de los dispositivos en el puente, la sincronización y el lugar

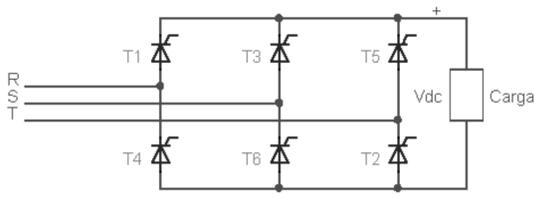
de rectificación de la onda de AC, es posible clasificar los puentes de la siguiente manera [11]:

*Según la rectificación en cada semiciclo*

- Media onda

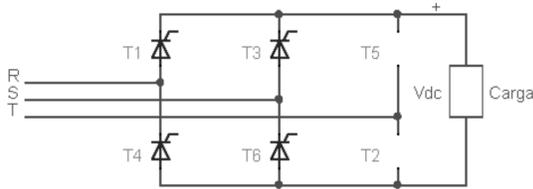


- Onda completa

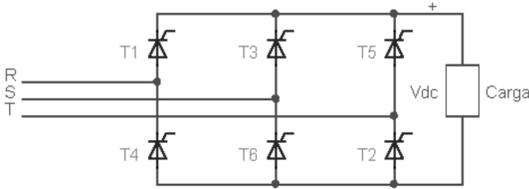


*Según la cantidad de fases*

- Monofásicos



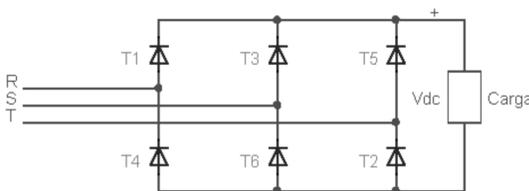
- Trifásicos



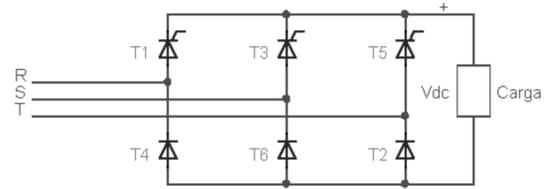
- Hexafásicos
- N - fásicos

*Según el número de elementos semiconductores que configure el puente*

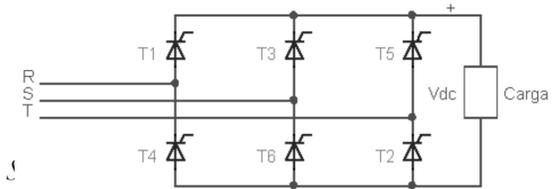
- No controlado



- Semicontrolado



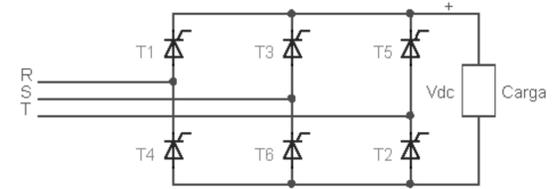
- Totalmente controlado



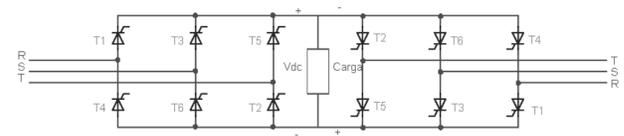
- Simétricos
- Asimétricos

*Según las posibilidades de invertir sentido de la corriente en la carga*

- Puentes simples



- Puentes duales



Un aspecto relevante en los puentes rectificadores es su dependencia del tipo de carga; por eso son representativas para el estudio, cargas netamente resistivas, resistivas inductivas y cargas motor (RL + fuente DC).

## DISEÑO DE EQUIPOS DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA

El diseño de circuitos de potencia tiene tres etapas [7]: 1) diseño de los circuitos de potencia, donde el diseñador elige las estructuras que requiere y especifica los elementos semiconductores; 2) diseño de las etapas de

aislamiento, etapa en la que el diseñador debe garantizar una estrategia que le permita maniobrar sobre el control de los dispositivos semiconductores de potencia, garantizando aislamiento galvánico entre las señales de control electrónico y las señales de control en la etapa de potencia; 3) diseño del control de fase, donde el diseñador debe establecer el momento en que se realiza el encendido de los dispositivos semiconductores en la etapa de potencia.

El diseñador también debe considerar el lugar que ocupa el puente rectificador en el sistema de control de la máquina, como actuador en los diferentes lazos de control. En la figura 3 se deja en claro que el puente rectificador es un mediador entre la señal de control de baja potencia, representado por el bloque “Controlador”, y la señal actuante que trabaja en las condiciones nominales del motor, “Planta máquina CC”, cuya variable de salida es detectada y retroalimentada mediante el bloque “Sensor” para poder obtener la señal de error, que es la entrada al controlador.

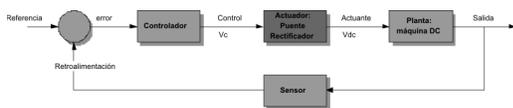


Figura 3. Diagrama de control para una máquina DC.

CIRCUITOS DE POTENCIA

Según el número de elementos semiconductores que configure el puente

Los dispositivos semiconductores son diodos de potencia y rectificadores controlados de silicio (SCR). Los símbolos para cada uno de ellos se muestran a continuación (figura 4).



Figura 4. Símbolos del diodo y del SCR.

Los SCR y los diodos no distinguen su funcionamiento entre ánodo y cátodo, salvo por la presencia del terminal de compuerta. Cuando una pequeña corriente, denominada corriente de enganche, circula durante un corto periodo de tiempo (tiempo de enganche) entre la

compuerta y el cátodo, con una tensión positiva entre ánodo y cátodo, se establece una corriente entre ánodo y cátodo que depende de la carga y que se sostiene durante el tiempo que la polaridad ánodo-cátodo permanezca positiva, aun cuando desaparezca la corriente de enganche. Si la polaridad entre ánodo y cátodo es negativa, no existirá corriente de carga, a pesar de garantizarse la presencia de la corriente de enganche entre compuerta y cátodo. Si se garantiza la corriente de enganche para todo instante en el cual el SCR tiene polaridad positiva ánodo-cátodo, el SCR no hará distinción con el funcionamiento de un diodo.

Al seleccionar SCR, podemos establecer cuáles de ellos tendrán funciones como SCR o como diodos, y en consecuencia determinar si el puente es no controlado (todos los SCR actúan como diodos), semicontrolado (algunos de los SCR actúan como diodos) o totalmente controlado (ninguno de los SCR actúa como diodo).

Según la cantidad de fases y el tipo de onda

Si un SCR no recibe nunca una corriente de enganche, los terminales entre ánodo y cátodo se comportan como un circuito abierto, y su presencia dentro del puente se puede ignorar.

Si se cuenta con un puente rectificador de seis SCR, es posible determinar cuáles SCR van a formar parte del puente y cuáles serán ignorados, y en consecuencia, transformar el puente trifásico de onda completa de seis SCR, en un puente monofásico de onda completa de cuatro SCR, o incluso en un puente rectificador de media onda de dos SCR.

Si se tiene además otro puente rectificador trifásico de onda completa totalmente controlado, los dos puentes pueden funcionar como un solo puente rectificador hexafásico, o bien como un solo puente rectificador dual (figura 5).

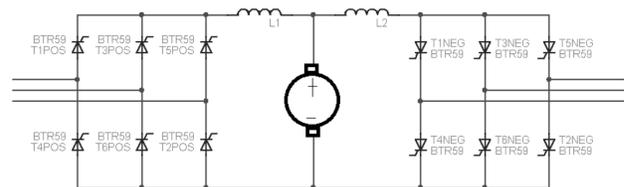


Figura 5. Puente rectificador trifásico totalmente controlado dual.

En la figura 6 se observa un puente rectificador monofásico de media onda no controlado, pero construido a partir de un puente trifásico totalmente controlado, donde los SCR T1 y T2 permanecen activos en su entrada de compuerta, mientras los demás permanecen sin señal de control.

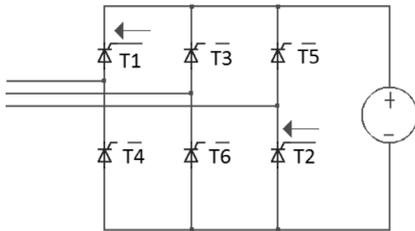


Figura 6. Puente rectificador monofásico no controlado de media onda.

CIRCUITO DE AISLAMIENTO

Para garantizar la activación o enganche de cada SCR, se debe garantizar un pequeño pulso de corriente entre los terminales de compuerta - cátodo. Un requerimiento adicional estriba en garantizar aislamiento eléctrico entre la señal de control para el enganche del SCR y la señal compuerta - cátodo del respectivo dispositivo. El circuito mostrado a continuación garantiza un pulso modulado en la entrada ENT1, amplificado en las dos etapas de transistores y convertido en pulsos a la entrada del transformador de pulsos (figura 7).

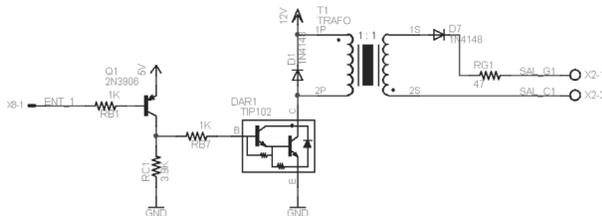


Figura 7. Circuito de aislamiento para activación de un SCR.

La entrada ENT1 se encuentra modulada sobre frecuencias típicas de portadora de 2 a 5 KHz, con el propósito de evitar el calentamiento del transformador de pulsos, que se encuentra conmutando con tensiones de DC sobre una señal moduladora de 120 Hz.

CIRCUITO DE CONTROL DE FASE

El diagrama de bloques mostrado a renglón seguido ilustra el sistema de control de fase (figura 8).

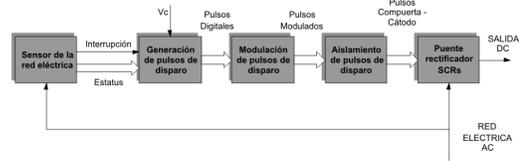


Figura 8. Diagrama de bloques del sistema de control de fase.

En el centro de este diagrama está el bloque encargado de generar los pulsos de disparo, de manera que interprete la ley de control en forma algorítmica en el programa de un microcontrolador, para el control de fase.

El circuito de control de fase es un sistema de control retroalimentado del ángulo de disparo. Este ángulo, medido en unidades de tiempo, grados o radianes, es el tiempo transcurrido desde el momento en el cual el SCR alcanza polaridad positiva de una onda seno de voltaje, hasta el momento en el cual aparece un pulso de disparo de enganche entre compuerta - cátodo del SCR. El voltaje promedio de salida del puente rectificador para un ángulo de disparo tiene la siguiente forma general:

$$V_{dc} = K \cos(\alpha) \tag{1}$$

El valor de la constante  $K$  depende del tipo de carga y el voltaje pico de la onda seno que se rectifica. El circuito de control de fase debe generar los disparos correspondientes en los SCR que conforman el puente, para garantizar un valor de tensión determinada.

Definiciones

Para aclarar la estrategia del algoritmo implementado, se presentan las siguientes definiciones:

**Estatus:** código binario que informa en tiempo real el estado de la red. Para propósitos de control de fase, la información relevante es semiciclo positivo de la fase, semiciclo negativo de la fase y cruces por cero de las ondas alternas que alimentan el puente en su lado de AC.

**Cruce por cero:** la ocurrencia de un cruce por cero en cualquiera de las señales senos que alimentan cada una de las fases de la parte de potencia del puente se representa con flancos de reloj sobre una señal cuadrada.

**Señal de control  $V_c$ :** señal de entrada que interpreta cuál es el valor deseado de valor promedio en la salida del puente rectificador.

**Rango:** propiedad del ángulo de disparo mediante la cual es posible establecer el tiempo mínimo de respuesta del puente en función de sus fases de operación. Para los puentes monofásicos, el rango es único y está dado entre  $0$  y  $180^\circ$ . Para el puente trifásico, son tres los rangos de operación:  $0-60^\circ$ ,  $60-120^\circ$  y  $120-180^\circ$ . El rango como variable de programa toma los valores de  $0, 1, \dots, n$  y se obtiene de la división del valor de ángulo de disparo y el tiempo de respuesta del puente, de acuerdo con sus fases.

**Tabla de disparo:** espacio de memoria de programa a la que se accede con direccionamiento indexado y que determina los SCR que se activarán y los que no, ocurrido un tiempo de grados desde un cruce por cero.

**Función arcoseno:** tabla en la memoria de programa o función implementada en líneas de código, que calcula el arcoseno de la señal de entrada  $V_c$  con el propósito de linealizar la entrada  $V_c$  y salida  $V_{dc}$ .

**Máscara:** filtro de bits para determinar el comportamiento como diodos o como SCR en el puente rectificador

**Desplazamiento estatus:** valor indexado a la dirección base de la tabla de disparo, en consideración al estatus particular de la red eléctrica en el momento del cruce por cero.

**Desplazamiento secuencia de fase:** valor indexado a la dirección base de la tabla de disparo, a causa de la secuencia de fase particular en el momento de verificar la red eléctrica en la rutina de configuración del puente.

**Desplazamiento puente:** valor indexado a la dirección base de la tabla de disparo, en consideración al tipo de puente que se desee configurar.

flanco capaz de generar una interrupción en el flujo del programa en el microcontrolador que maneja el disparo de los SCR. En la rutina de interrupción del cruce por cero, el valor de  $V_c$  indica cuál es el ángulo de disparo deseado para obtener la salida deseada  $V_{dc}$ , y con esta información se carga un temporizador con grados en unidades de tiempo o ciclos de máquina del procesador. Adicionalmente, la rutina de interrupción determina los desplazamientos necesarios para buscar la dirección que corresponde a los SCR que se deben disparar al cumplirse el tiempo  $\alpha$ .

Transcurrido el tiempo  $\alpha$  en ciclos de máquina, el temporizador genera una nueva interrupción en el flujo de programa, esta vez para leer en la tabla de disparo la información correspondiente a los SCR que se desean disparar, y poner en los puertos respectivos la información para el disparo del puente rectificador. La señal de salida a los puertos debe filtrarse por la máscara para determinar adicionalmente el comportamiento de los dispositivos asociados al puente rectificador, haciendo de esta manera una distinción entre SCR y diodos de potencia.

#### Circuito sensor de la red eléctrica

Los circuitos mostrados a continuación se utilizan en el manejo de un puente rectificador trifásico simple; sin embargo, los principios de operación se extienden al caso de un puente monofásico.

Los transformadores mostrados en la figura 9 actúan como sensores primarios en el sistema de medida del control de fase. Los valores de la red eléctrica alterna  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  y  $V_{CA}$ , que entran directamente en la etapa de potencia del puente rectificador, son representados por valores digitales en la parte electrónica. La relación de transformación está en  $220/6$  Vrms, para permitir un procesamiento de la señal con dispositivos electrónicos de procesamiento de señal analógica.

#### Estrategia de generación de pulsos de disparo

Los cruces por cero en la red eléctrica ocurren para  $0^\circ$  del ángulo en alguna de las señales de línea de la red eléctrica que alimentan el puente rectificador. La ocurrencia de un cruce por cero en la red eléctrica es interpretada por el circuito de cruce por cero como un

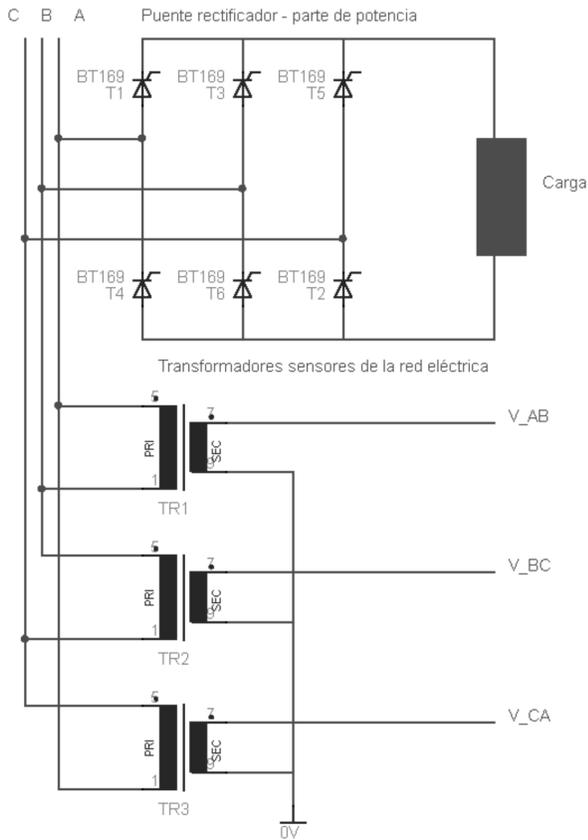


Figura 9. Sensores de la red eléctrica.

En la figura 10 se muestran las tres alimentaciones de alterna presentes en el puente rectificador, desplazadas entre sí 120°.

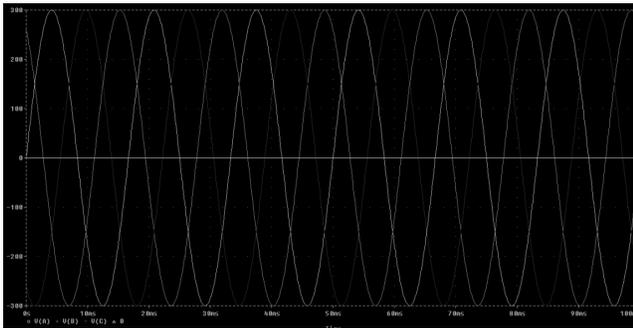


Figura 10. Alimentaciones trifásicas.

El sistema sensor de medida debe convertir las señales de la figura 10 del secundario de los transformadores en señales binarias (figura 11) para cada una de las señales alternas. La señal cuadrada está sincronizada

con la señal AC y su valor de pico está en el rango de tensión de las señales digitales que maneje el sistema.

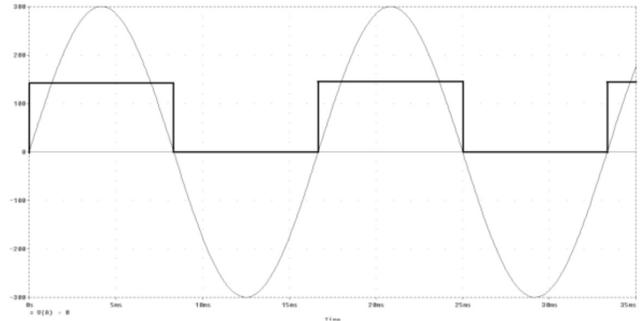


Figura 11. Estatus señal alterna.

El circuito de la figura 12 acopla la señal sensada y proporciona un punto de ajuste para los demás elementos electrónicos de procesamiento que conducen a la señal de estatus y cruce por cero correspondiente.

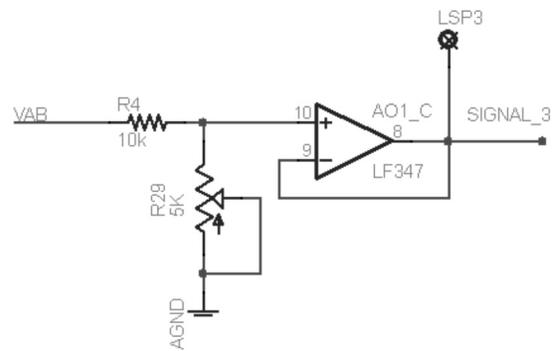
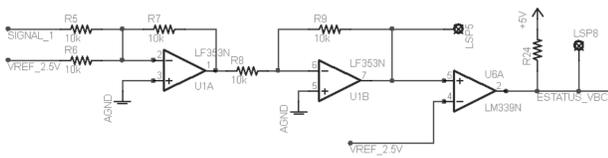


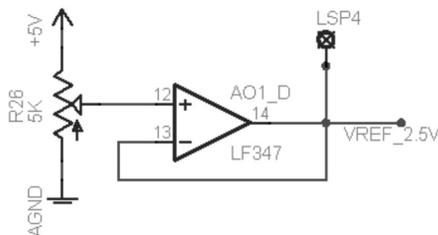
Figura 12. Acople de señal del transformador sensor.

Para determinar el cruce por cero, la señal de la figura 12 debe compararse con la referencia de 0V, pero no es prudente hacer tal ajuste en la referencia por cuestiones de ruido eléctrico. En su lugar, la señal de referencia de comparación se eleva a un valor intermedio del rango de operación. En la figura 13 se presenta el cambio de esta referencia con el sumador inversor en cascada con el inversor. Cabe anotar que el valor que se suma es el mismo con el cual se compara en el comparador LM339 de la figura 13.



**Figura 13.** Montaje de la onda seno sobre un valor de DC y comparación con valor DC.

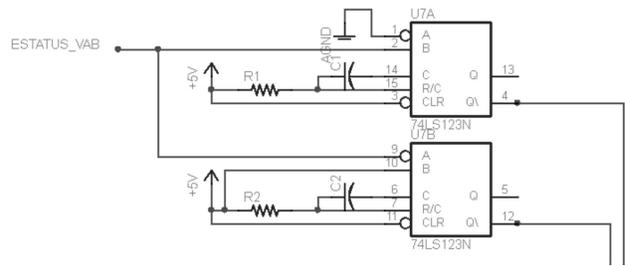
A continuación se ilustra el circuito que ajusta el valor de la nueva referencia, equivalente al cero de la señal seno de la red eléctrica. En este caso se ha establecido un valor de 2,5V, en el centro de las señales TTL que maneja los dispositivos de lógica digital del sistema de control de fase (figura 14).



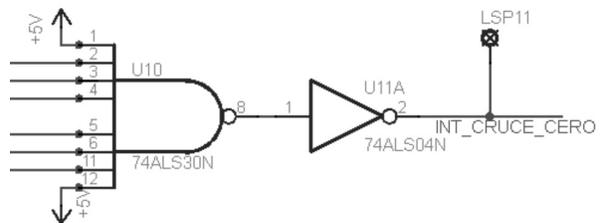
**Figura 14.** Señal DC de comparación.

La señal de salida del circuito de la figura 13 es el Estatus para una sola fase y consiste en una salida de señal cuadrada (figura 11). El proceso es efectuado para cada una de las tres fases. El nivel alto de esta señal se corresponde con el semiciclo positivo de la señal alterna que representa, el nivel bajo con el semiciclo negativo de esta señal, y los flancos ascendentes y descendentes de los respectivos cruces por cero.

En la figura 15 se ilustra cómo se convierten en pulsos (activos bajos) cada uno de los flancos de cualquiera de las señales de Estatus, proceso que se repite en todas las fases. El circuito de la figura 16 suma todas estas señales en el tiempo y permite construir la señal de interrupción única mostrada en la figura 17. Para este caso en particular, interesa reconocer el flanco descendente de la señal de interrupción de cruce por cero (señal de interrupción activa baja), con flancos ascendentes o descendentes en cada una de las señales que conforman el código de Estatus.



**Figura 15.** Monoestables asociados a los flancos de reloj de las señales de Estatus.



**Figura 16.** Suma en el tiempo de las señales de interrupción de cada señal de Estatus.

En la figura 17 también se ponen de presente los valores traducidos de binario natural a decimal del código Estatus. Las señales UAB, UBC y UCA son binarias y en su conjunto forman un valor binario denominado Estatus. Si el bit de mayor prioridad es UAB y el de menor UCA, los valores mostrados en la figura conforman todos los valores posibles para conocer el estado de la señal. En este código se deben destacar dos aspectos:

1. La secuencia de aparición en el tiempo de los valores del Estatus ocurre cada 60° y el orden obedece a la secuencia de fase, que para la figura 17 se entiende en secuencia de fase positiva. La secuencia de fase negativa ocurre con la inversión de dos de las tres líneas de alimentación del puente trifásico de la red de alimentación. Si esto ocurre, la secuencia de aparición 5 - 4 - 6 - 2 - 3 - 1 cambia a 1 - 3 - 2 - 6 - 4 - 5.
2. El código Estatus no admite en este caso los valores binarios 000B (0) y 111B (7) para el puente trifásico. Si fuese así, quiere decir que todas las fases están simultáneamente en su semiciclo negativo o todas

están simultáneamente en el semiciclo positivo. Este análisis resulta importante porque permite detectar fallos de secuencia o fallos del sistema ante la caída de alguna de las fases.

- En el caso monofásico, una de las tres señales ( $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$  o  $U_{CA}$ ) tendrá la forma correspondiente mostrada en la figura 17, mientras las otras dos permanecerán en 0. De esta manera, el código asume solamente dos valores posibles, dependiendo de la fase que continúe viva en el puente: si es  $U_{AB}$ , el estatus toma los valores 100 (4) o 000 (0). Si es  $U_{BC}$ , el estatus será 010 (2) o 000 (0). Y en el caso de  $U_{CA}$ , el estatus será 001 (1) o 000 (0). También resulta importante observar que la interrupción ocurrirá cada  $180^\circ$  y no cada  $60^\circ$ , como en el caso trifásico.

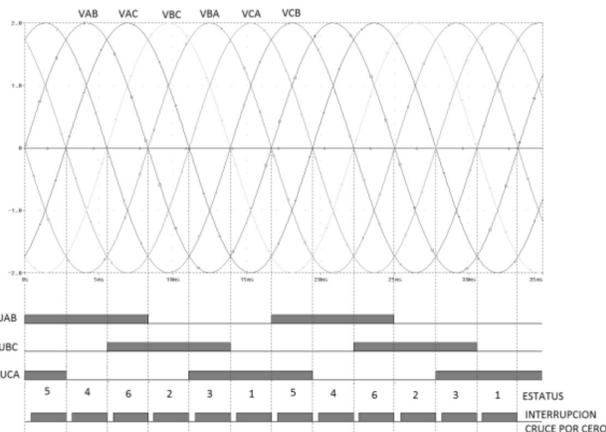


Figura 17. Señales de Estatus, código decimal del código binario del Estatus y señal de interrupción de cruce por cero de las señales AC en el puente rectificador.

### Circuito generador de pulsos de disparo

La generación de pulsos de disparo la determinan el valor correspondiente de voltaje de control, el momento de la interrupción, el tipo de puente que se configure y el estatus obtenido de la red eléctrica. En el circuito mostrado en la figura 18 aparece un microcontrolador AT89C52 tomando toda esta información para determinar cuáles y en qué momento los SCR deben activarse en la parte de potencia del puente rectificador.

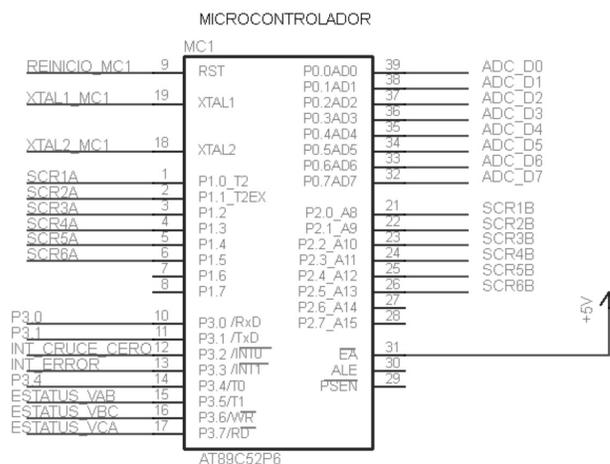


Figura 18. Generador de pulsos de disparo mediante microcontrolador.

El puerto P0 recibe la señal digital de ocho bits proveniente del ADC mostrado en la figura 19, que representa el valor del voltaje de control.

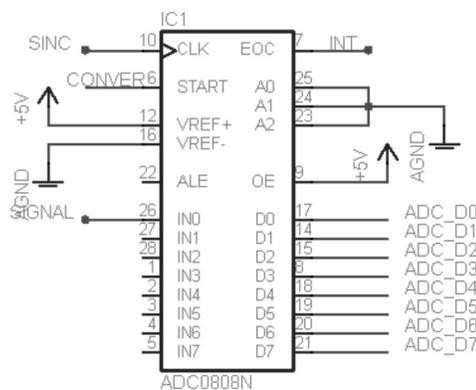


Figura 19. Conversor analógico / digital de la señal de control del puente rectificador.

Los puertos P1 y P2 se utilizan para activar los SCR en dos puentes trifásicos simples. Cada puerto dispone de seis de sus ocho pines para representar a los seis SCR que representan un puente trifásico totalmente controlado. Disponer de dos puertos permite usar dos puentes trifásicos de manera independiente, o trabajando en conjunto como un puente dual.

En el puerto P3 se dispone de las señales detectadas como la interrupción de cruce por cero y las tres señales de Estatus de la red eléctrica.

### Modulación de pulsos de disparo

Las GAL mostradas en la figura 21 modulan cada una de las señales de disparo de los puentes rectificadores con una onda portadora de señal cuadrada que se ajusta típicamente entre 2 y 5 KHz, con el potenciómetro mostrado a continuación (figura 20).

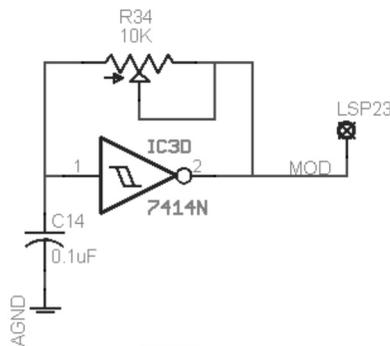


Figura 20. Señal estable para la modulación de los pulsos de disparo.

La modulación permite a los transformadores de la etapa de aislamiento un trabajo menos pesado al conmutar señales de DC.

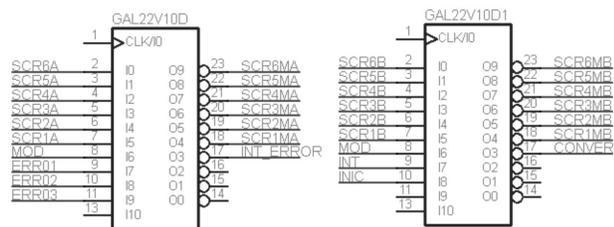


Figura 21. Moduladores de las señales de disparo de los puentes asociados.

### ALGORITMO DE DISPARO

El requerimiento principal que debe cumplir el programa, más allá de resolver el disparo de los SCR, es hacerlo en la menor cantidad de tiempo y con la menor cantidad de recursos. Lo fundamental en esto es ganar valor agregado con las características de un control digital: comunicaciones digitales, registro de información, fiabilidad de funcionamiento, reporte de fallos, entre otras.

La posibilidad de elegir una configuración de puente, por ejemplo, se puede hacer a través del puerto de

comunicaciones seriales por UART que ofrece el microcontrolador AT89C52. A renglón seguido se presentan los algoritmos asociados al puente trifásico totalmente controlado, y luego los cambios que requiere cada parte del programa y sus variables para otras configuraciones. El algoritmo es válido para puentes monofásicos o trifásicos, no controlados, semicontrolados o totalmente controlados, de onda completa o media onda. Los valores que determinan cada tipo de puente en particular serán los que indiquen los registros de máscara, puente y secuencia, que se calculan en la rutina de reinicio o bien las proporciona el usuario a partir de los mecanismos de entrada - salida del sistema.

### Rutina de reinicio

El reinicio está asociado a la operación de Reset físico implementado con el circuito de la figura 22. La red RC garantiza un Reset automático con el encendido de la fuente de alimentación.

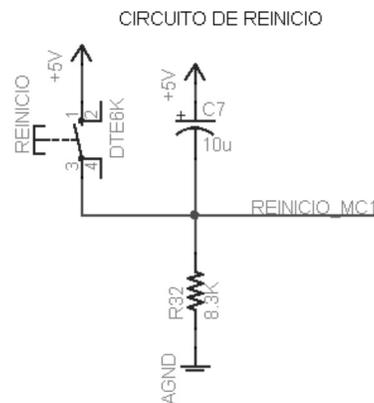


Figura 22. Circuito de reinicio (Reset).

En la rutina de reinicio, que ocurre siempre al encender el sistema, pero que puede ser forzada por *software* luego de una interrupción de recepción por el puerto serial, se inicializan las variables del sistema para obtener un correcto funcionamiento; por ejemplo, la configuración de los registros que configuran la interrupción externa como interrupción activa por flanco (descendente), los modos de funcionamiento de los temporizadores, y las habilitaciones de *hardware* y *software* de las interrupciones asociadas a la interrupción de temporizador.

Otras configuraciones asociadas a la parte de valor agregado, como las comunicaciones seriales, deberán establecer los modos de transmisión y recepción serial por UART, y el manejo de eventos de error mediante la interrupción externa INT1, la cual se ha dejado habilitada por la discriminación hecha en el circuito mostrado en la figura 21.

En cuanto a la inicialización de variables internas del algoritmo, en el caso del puente rectificador trifásico la más representativa es la que determina la secuencia de fase de las señales trifásicas. En este sentido, un algoritmo de control de fase diseñado para una secuencia de fase positiva en el puente rectificador trifásico no puede emplearse para una secuencia de fase negativa; sin embargo, la lectura de los estatus puede indicar al sistema de control cuál es la secuencia conectada y hacer las modificaciones pertinentes para cambiar en la tabla de disparo de los SCR, de modo que extienda su funcionamiento a la conexión en secuencia de fase negativa. Esta particularidad, de poder funcionar correctamente en cualquier secuencia de fase, se presentará más adelante al construir una tabla de disparo particular para cada una de las secuencias, y convierte a los sistemas controlados por procesadores digitales en dispositivos más versátiles que los correspondientes de procesamiento analógico, pues permite al puente conectarse y funcionar independiente de la secuencia de fase conectada.

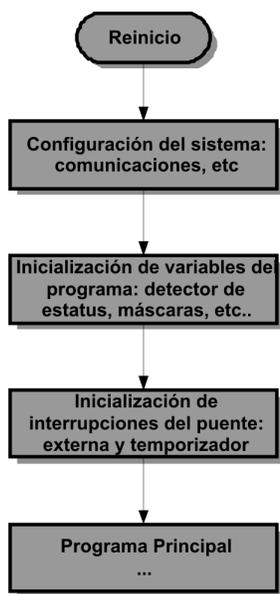


Figura 23. Algoritmo de reinicio.

En la figura 23 se muestran los aspectos más representativos asociados a la configuración en la rutina de reinicio.

El programa principal no corresponde al programa de disparo de los puentes rectificadores, sino a aquellas funciones correspondientes al valor agregado del sistema actuador o a implementar labores de control o mandos directamente, de acuerdo con el diagrama de la figura 3. El manejo del puente rectificador se hace a través de las rutinas de interrupción externa INT0, la rutina de interrupción del temporizador TIMER0 y las subrutinas de apoyo.

El código mostrado en la figura 24 proporciona la configuración de las interrupciones en la rutina de reinicio, y un programa principal haciendo un ciclo infinito en espera de las interrupciones.

```

Enable Interrupts
Enable Int0
Enable Timer0
Tmod = 1
Set Tcon.0

On Int0 Cruce Nosave
On Timer0 Alfa Nosave

Do
Loop
End
    
```

Figura 24. Código de reinicio.

La rutina se ha desarrollado en lenguaje Basic del programa Bascom. La asignación de 1 (0 x 00000001B) en el registro Tmod garantiza el modo 1 (16 bits) para el temporizador TIMER0, y arranque por *software*. Tcon = 1 garantiza interrupción por flanco (descendente) en la señal de interrupción INT0.

En la rutina de reinicio mostrada en la figura 24 se presenta también la vectorización de las dos interrupciones para el manejo del puente rectificador a las etiquetas de memoria de programa Cruce y Alfa para la interrupción externa INT0 y temporizador 0 TIMER0, respectivamente.

Rutina de interrupción de cruce por cero

Cada cruce por cero en cualquiera de las señales de la red eléctrica VAB, VBC o VCA, o las señales inversas VBA, VCB o VAC, generan interrupción. También las producidas como consecuencia de la rectificación en los circuitos tipo puentes. Las interrupciones ocurren con el flanco de reloj descendente de la señal de cruce por cero mostrada en la figura 17 y generada por los circuitos de las figuras 15 y 16. En la figura 25 se presenta el diagrama de flujo de la rutina de interrupción de cruce por cero.

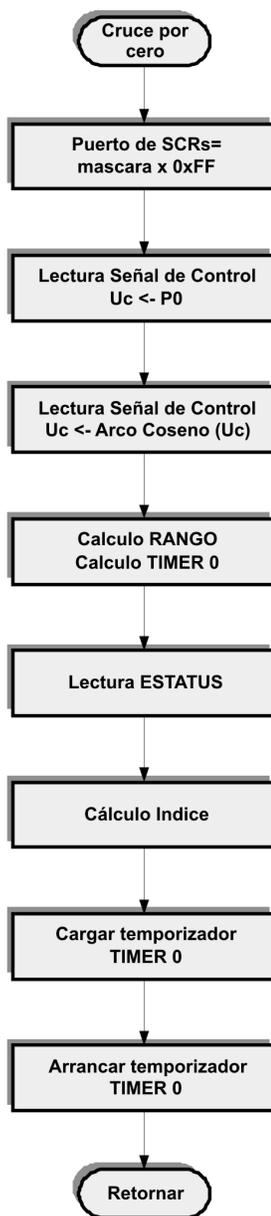


Figura 25. Flujograma de interrupción externa de cruce por cero.

• Tipo de puente según dispositivos

Cuando se produce la interrupción de cruce por cero, el sistema procura el apagado de todos los elementos del puente rectificador, aunque dicho apagado puede ocurrir de manera natural por la inversión de polaridad ánodo - cátodo en cada dispositivo semiconductor. La máscara determina si el apagado se hace efectivo o no, con el requerimiento del usuario de elegir un puente rectificador totalmente controlado, semicontrolado o no controlado.

Al hacer el puerto de salida a los SCR igual a 0 x FFH, se apagan todos los elementos del puente rectificador. Los valores de 0 activan un dispositivo en particular (lógica activa baja), de modo que la máscara determina en este momento cuáles SCR actuarán como diodos y cuáles actuarán como SCR. Si en el puente de la figura 5 se desea tener un puente rectificador no controlado conformado por los SCR T1, T3, T4 y T6, la máscara sería 0 x 11010010 B, donde los valores de 0 del *byte* Máscara representan los SCR que no se apagarán. Si se desea ahora configurar un puente rectificador semicontrolado tomando como diodos a los SCR T4 y T6, la máscara sería 0 x 11010111 B, donde los dos ceros del *byte* de máscara representan los dos SCR que permanecerán siempre con señal de compuerta para que su comportamiento se asemeje al de un diodo. A continuación se presentan las diferentes máscaras en sus valores binarios y hexadecimales necesarias para obtener un comportamiento controlado, semicontrolado o totalmente controlado, en puentes de cuatro (monofásicos) o seis (trifásicos) dispositivos semiconductores (tabla 1).

Tabla 1 Máscaras tipo de puente según los elementos semiconductores usados

Máscara	SCR del puente
<b>Totalmente controlado</b>	
11111111B=0FFH	Todos
<b>Semicontrolado</b>	
11010111B=0D7H	1-3-4-6
11110101B=0F5H	1-2-4-5
11011101B=0DDH	2-3-5-6
11010101B=0D5H	1-2-3-4-5-6
<b>No controlados</b>	
11010010B=0D2H	1-3-4-6
11100100B=0E4H	1-2-4-5
11001001B=0C9H	2-3-5-6
11000000B=0C0H	1-2-3-4-5-6

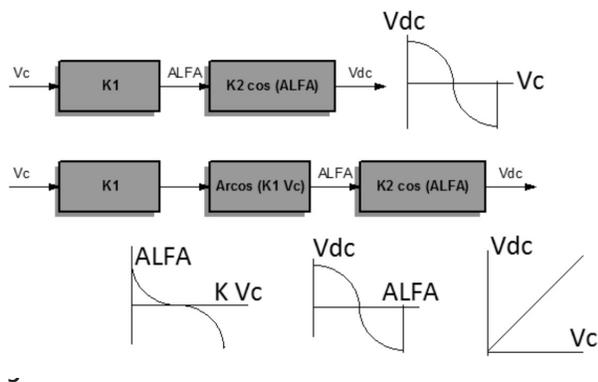
En el código se usa una función AND entre la

máscara y 255, lo que permite la selección del tipo de puente escogido. La variable máscara se ha definido como variable tipo *byte* y en la rutina de reinicio se ha indicado el valor de máscara apropiado, según la tabla anterior y los requerimientos de usuario.

El mismo filtro de bits se debe hacer en el disparo del puente en la rutina de interrupción del temporizador.

• Linealización de Vdc respecto a Vc

Como se puede deducir de la ecuación (1), la relación entre el voltaje de salida Vdc y el ángulo de disparo  $\alpha$  no es lineal. Adicionalmente, en el rango de disparo de entre 0° y 180°, la relación entre dichos voltajes resulta inversamente proporcional. Tratándose de una situación no deseable, buscamos la manera de linealizar las variables calculando la función inversa al coseno que relaciona las variables Vdc y  $\alpha$ . Este proceso se ilustra en la figura 26 con la función arcoseno aplicada en la entrada del voltaje de control.



En la figura 26 se muestra primero la relación no lineal marcada por Vdc y Vc, donde se aplica la ecuación (1). En la segunda relación, K1 es una constante negativa que permite escalar apropiadamente los valores de Vc. La relación queda marcada entonces por

$$Vdc = K2 \cos(\text{Arcocoseno}(Vc)) = K1K2Vc = KVc \quad (2)$$

La linealización lograda de esta manera implica el cálculo de la función arcocoseno, lo cual presume un esfuerzo de cómputo inmenso para un procesador de

baja gama como el que se ha usado. Una alternativa de rendimiento más acorde es calcular los valores de la función arcoseno y plasmarlos en la memoria de programa como una tabla. Los valores introducidos de esta manera representarán espacio de memoria EEPROM, pero el costo en tiempo de cálculo se reduce al tiempo necesario para hacer el direccionamiento indexado y leer la tabla correspondiente. Un beneficio adicional se presenta en la posibilidad de saturar o permitir zonas muertas en la señal, situaciones que pueden ser prudentes en los bordes de los rangos del ángulo de disparo: 60° y 120°. La expresión para el cálculo de los valores de la tabla en decimal es la siguiente:

$$\alpha = \arcseno\left(\frac{2 \times ADC}{255} - 1\right) \times \frac{255}{\pi} \quad (3)$$

La señal de control marcada en la ecuación (3) como ADC se obtiene directamente del puerto P0 donde se encuentra conectada la salida del conversor analógico / digital de ocho bits. La lectura es la representación digital de un voltaje de control analógico entre 0 y 5 Vdc presente en el canal 0 del ADC0808. El código de programa mostrado en la figura 27 permite leer el valor de la tabla arcoseno, y el código de la figura 28 representa el inicio de la tabla de 256 *bytes* de memoria de programa EEPROM que implementa directamente la función arcoseno, según la ecuación anterior.

```
Restore Arcos
Acc = P0

$asm
movc a,@a+DPTR
```

Figura 27. Código de cálculo del arcoseno.

```
Arcos:
Data 255, 245, 241, 237, 235
```

Figura 28. Valores de la tabla para el cálculo del arcoseno.

Los códigos mostrados en las figuras 27 y 28 están implementados en el lenguaje ensamblador del dispo-

sitivo microcontrolador, para garantizar de esta manera velocidad de procesamiento.

- Cálculo del rango y del tiempo del temporizador

La señal digital correspondiente al ángulo de disparo puede admitir rangos de operación, para garantizar el mínimo tiempo de respuesta del puente. La cantidad de rangos depende directamente de la cantidad de fases del puente y los rangos se determinan a partir de la expresión para el rango mínimo

$$Rango_{\min} = \frac{180}{\text{Número fases}} \quad (4)$$

Los rangos quedarán fijados entonces por

$$\begin{aligned} \text{Rango } 0 &= [0, Rango_{\min}] \\ \text{Rango } 1 &= [Rango_{\min} \times 1, Rango_{\min} \times 2] \quad (5) \\ \text{Rango } 2 &= [Rango_{\min} \times 2, Rango_{\min} \times 3] \\ \text{Rango } 3 &= [Rango_{\min} \times i, Rango_{\min} \times (i + 1)] \end{aligned}$$

Para el puente trifásico de la figura 5 los tres rangos se ilustran en la tabla 2. El valor por *software* corresponde al contador  $i$  de la ecuación (5).

**Tabla 2**  
Rangos de operación en el puente rectificador trifásico

Rangos	Valor software
0° - 60°	0
60° - 120°	1
120° - 180°	2

La operación de módulo del valor del ángulo de disparo y  $Rango_{\min}$  indica cuál es el valor por *software* para el rango en el que se encuentra el ángulo. La operación de residuo de esta división permitirá calcular el valor del temporizador. La expresión que hay que tener en cuenta es:

$$\alpha = \text{rango} \times 60 + \text{temporizador} \quad (6)$$

Donde

$$\text{rango} = \alpha \bmod 60 \quad (7)$$

$$\text{temporizador} = K \times (\alpha \bmod 60) \quad (8)$$

El rango y el estatus indicarán los SCR que se requieren después del cruce por cero para realizar el disparo de los dispositivos semiconductores, pero será el temporizador que determine el momento exacto del disparo de éstos en el rango correspondiente.

La constante  $K$  está relacionada con la frecuencia de la red alterna. El máximo valor en grados que puede disponer el temporizador es de 60 grados (para el puente trifásico), y esto representa un tiempo en segundos de acuerdo con la frecuencia de la red. Si la frecuencia es de 60 Hz, el periodo de la señal alterna es de 16,666 ms = 16.666 us, lo que equivale a 360 grados. En consecuencia, 60 grados representarán 16.666 us / 6 = 2777 us. Por otra parte, los 180 grados que representa el ángulo de disparo son equivalentes al valor decimal de 255, provenientes de la función arcoseno; por tanto, los mismos 60 grados representan un valor decimal de 255 / 3 = 85. Por consiguiente, la constante  $K$  se obtiene de la relación entre 2777 us y 85, es decir, 32,67. Para una frecuencia  $f$  de la red eléctrica, un tiempo de ciclo de máquina  $T_m$  y un valor máximo de conversión en el ADC máx (ADC), el valor de  $K$  estaría dado por la expresión:

$$k = \frac{1}{2 f T_m \text{ máx} (ADC)} \quad (9)$$

Los valores decimales de  $K$  representarán un error cuando el dispositivo microprocesado sólo opere la multiplicación entre valores enteros. Para evitar sobrepasar los rangos, el valor entero de  $K$  debe ser siempre el valor entero (redondeo por debajo), y se deben corregir los efectos de error acumulado en el ángulo de disparo en la tabla del arcoseno.

El código presentado en la figura 29 muestra el cálculo del rango y el cálculo del temporizador. Se observa que una parte de este código se ha codificado directamente en lenguaje ensamblador, mientras otra parte se encuentra en Basic; esto obedece a la necesidad de otorgar al código la rapidez en el cálculo para evitar errores de sincronización por retardos en el cálculo del temporizador.

```

Acc = P0
$asm
  mov DPTR, {Arcos}
  movc a, @a+DPTR
  mov b, {Divirango}
  div ab
  mov {Rango}, a
  mov a, b
  mov b, #32
  mul ab
$end Asm
Low(alpha) = Acc
High(alpha) = B

T0 = 65535 - Alpha
Th0 = High(t0)
Tl0 = Low(t0)
    
```

Figura 29. Cálculo de rango y carga del temporizador.

• Cálculo del índice

El índice calcula la posición relativa en la memoria de programa en la tabla de disparo, el valor concerniente a los SCR que se deban activar en la interrupción del temporizador. A su vez, la tabla se ha diseñado para actuar en diferentes modos de operación, de acuerdo con el estatus de puentes monofásicos o trifásicos, secuencias de fases y rangos de operación en el caso de puentes trifásicos. La expresión general para el índice es

$$\text{índice} = \text{puente} + \text{secuencia} + \text{rango} + \text{estatus} \quad (10)$$

En la tabla 3 se presenta una relación de los índices, los SCR que se activan en cada caso de estatus, rango y secuencia. Las líneas de código que aparecen en la figura 30 muestran el cálculo del estatus. El valor del rango se determina según lo presentado en el apartado anterior, y la secuencia se calcula para puentes trifásicos en la rutina de reinicio. En la figura 31 se puede apreciar cómo se implementa la tabla de disparo sólo para la secuencia positiva y diferentes configuraciones de puentes rectificadores monofásicos.

Tabla 3  
Índices en la tabla de disparo

Ind	SCR	Descripción
0	3, 4	Estatus 0 monofásico
1	1, 6	Estatus 1 monofásico
2	4, 5	Estatus 0 monofásico
3	1, 2	Estatus 1 monofásico
4	5, 6	Estatus 0 monofásico
5	2, 3	Estatus 1 monofásico
6		Est 0 Rango 0 Sec Pos
7	4, 5	Est 1 Rango 0 Sec Pos
8	2, 3	Est 2 Rango 0 Sec Pos
9	3, 4	Est 3 Rango 0 Sec Pos
10	1, 6	Est 4 Rango 0 Sec Pos
11	5, 6	Est 5 Rango 0 Sec Pos
12	1, 2	Est 6 Rango 0 Sec Pos
13		Est 7 Rango 0 Sec Pos
14		Est 0 Rango 1 Sec Pos
15	3, 4	Est 1 Rango 1 Sec Pos
16	1, 2	Est 2 Rango 1 Sec Pos
17	2, 3	Est 3 Rango 1 Sec Pos
18	5, 6	Est 4 Rango 1 Sec Pos
19	4, 5	Est 5 Rango 1 Sec Pos
20	1, 6	Est 6 Rango 1 Sec Pos
21		Est 7 Rango 1 Sec Pos
22		Est 0 Rango 2 Sec Pos
23	2, 3	Est 1 Rango 2 Sec Pos
24	1, 6	Est 2 Rango 2 Sec Pos
25	1, 2	Est 3 Rango 2 Sec Pos
26	4, 5	Est 4 Rango 2 Sec Pos
27	3, 4	Est 5 Rango 2 Sec Pos
28	5, 6	Est 6 Rango 2 Sec Pos
29		Est 7 Rango 2 Sec Pos
...	...	....

```

Estatus = P3 And 224
$asm
  mov a, {Estatus}
  rr a
  rr a
  rr a
  rr a
  rr a
  mov {estatus}, a
$end Asm
Indice = Estatus + Secuencia
Indice = Indice + Rango

Start Timer0

Return
    
```

Figura 30. Cálculo del estatus y del índice.

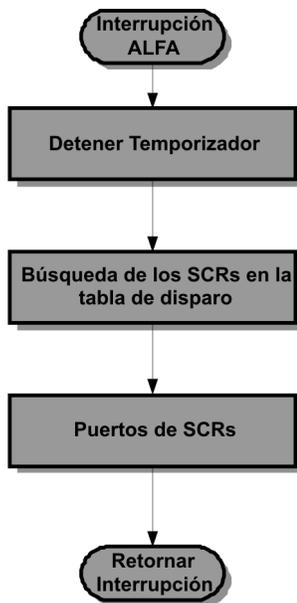
*Tabla:*  
*Data 252 , 231 , 207 , 255 , 249 , 243 , 255 , 255 , 255 , 222*  
*'Puentes monofásicos*  
*Data 255 , 231 , 249 , 243 , 222 , 207 , 252 , 255 'Trifásico*  
*Secuencia Positiva, Rango 0*  
*Data 255 , 231 , 252 , 249 , 207 , 231 , 222 , 255 'Trifásico*  
*Secuencia Positiva, Rango 1*  
*Data 255 , 249 , 222 , 252 , 231 , 243 , 249 , 255 'Trifásico*  
*Secuencia Positiva, Rango 2*

**Figura 31.** Tabla de disparo.

La rutina de interrupción de cruce por cero termina con la instrucción de arranque del temporizador.

Rutina de interrupción del temporizador Alfa

La interrupción del temporizador ocurre grados después de la interrupción de cruce por cero. La función principal de la rutina de interrupción es poner en los puertos de salida asociados a los SCR la activación de los semiconductores de potencia que se activarán en cada caso. Seguidamente se muestran el diagrama de flujo de la rutina de interrupción (figura 32) y el código de implementación (figura 33).



**Figura 32.** Flujograma de la interrupción del temporizador.

*Alfa:*  
*Stop Timer0*  
*Restore Tabla*  
*Acc = Indice*  
*\$asm*  
     *movc a,@a+DPTR*  
     *mov P1,a*  
*\$end Asm*  
*Return*

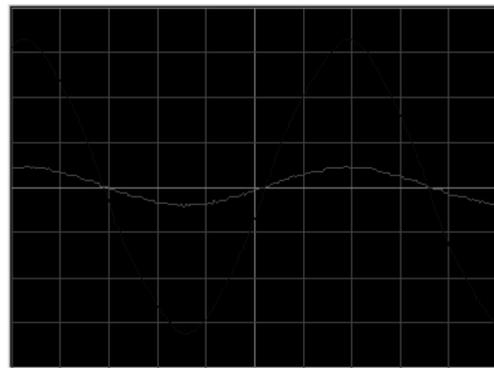
**Figura 33.** Código de atención a la interrupción del temporizador.

El fragmento del código implementado en lenguaje ensamblador procura una forma rápida para obtener el valor de la tabla de disparo. La acción de apagado de la interrupción es solo preventiva.

RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN

En las figuras presentadas a continuación se muestra la forma de onda de las señales en diferentes partes de la implementación y el tratamiento de señal.

En la figura 34 se observa una de las señales detectadas (azul) y la señal acoplada (en verde), que se corresponden con entrada y salida en el circuito de la figura 9.



**Figura 34.** Señal detectada en los transformadores.

*----Source Parameters*  
*Ch1/Ch2 : CH1*  
*Vertical Scale : 5.000E+0*  
*Vertical Position: 0.000E+0*  
*Coupling : DC*

```

Horizontal Scale      : 2.500E-3
Horizontal Position   : 0.000E+0
Ch1/Ch2              : CH2
Vertical Scale       : 5.000E+0
Vertical Position: 0.000E+0
Coupling             : DC

Horizontal Scale      : 2.500E-3
Horizontal Position   : 0.000E+0
    
```

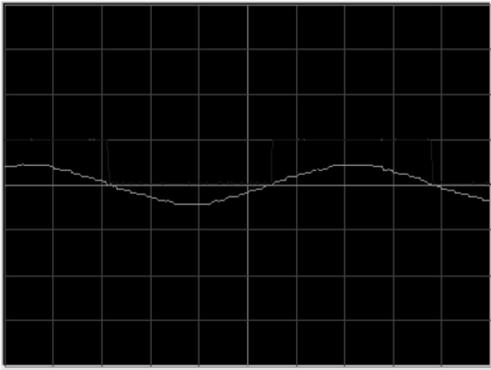


Figura 36. Estatus generado con señal acoplada.

En la figura 35 se aprecia el resultado del procesamiento de la señal analógica para obtener el estatus de la señal seno de una de las fases.

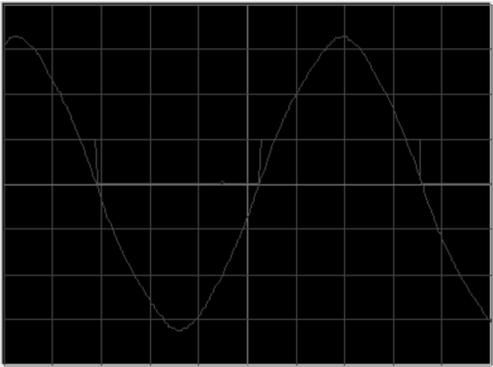


Figura 35. Señal detectada y estatus generado.

```

----Source Parameters
Ch1/Ch2              : CH1
Vertical Scale       : 5.000E-1
Vertical Position: 9.600E-1
Coupling             : AC

Horizontal Scale     : 2.500E-4
Horizontal Position  : 0.000E+0

Ch1/Ch2              : CH1
Vertical Scale       : 5.000E-1
Vertical Position: 9.600E-1
Coupling             : AC

Horizontal Scale     : 2.500E-4
Horizontal Position  : 0.000E+0
    
```

```

----Source Parameters
Ch1/Ch2              : CH1
Vertical Scale       : 5.000E+0
Vertical Position: 0.000E+0
Coupling             : DC

Horizontal Scale     : 2.500E-3
Horizontal Position  : 0.000E+0
Ch1/Ch2              : CH2
Vertical Scale       : 5.000E+0
Vertical Position: -2.000E-1
Coupling             : DC

Horizontal Scale     : 2.500E-3
Horizontal Position  : 0.000E+0
    
```

En la figura 37 se aprecian los resultados del procesamiento de la onda al momento de entrar al comparador para generar la señal de onda cuadrada del estatus de la figura 13. Obsérvese que la señal de referencia está montada sobre un valor de 2,5 V, dejando este valor como una nueva referencia.

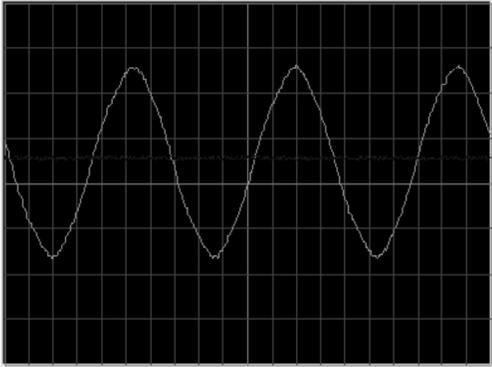
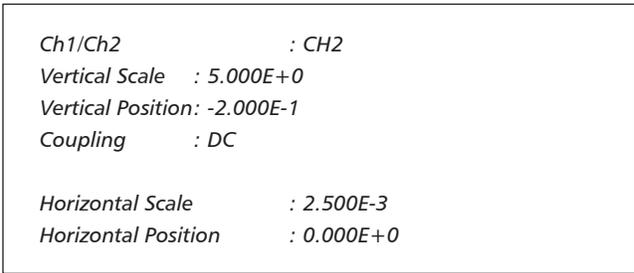
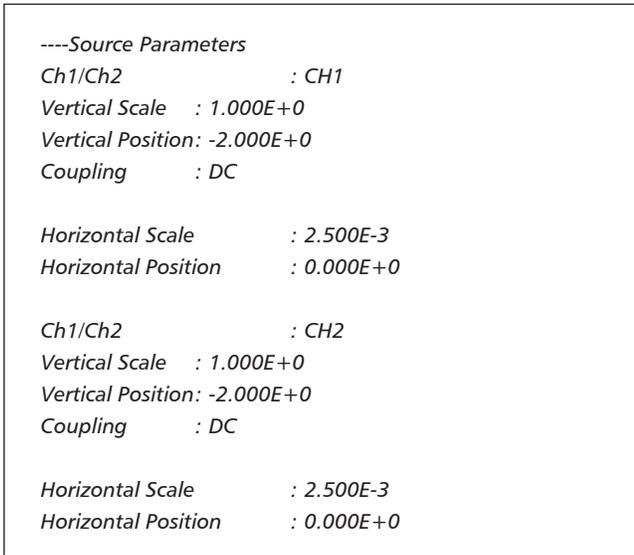


Figura 37. Señales en el comparador para generar estatus.

La figura 36 es una etapa intermedia donde se muestra la señal seno ya detectada con el estatus respectivo. Se corresponden con la señal SIGNAL\_1 y ESTATUS\_AB en la figura 13.



En el caso de una onda trifásica, las interrupciones llegan cada 60 grados, y cada una de las tres señales de estatus son responsables por dos de los seis flancos de reloj que ocurren en un periodo completo. En la figura 39 se ilustra este hecho comparando la señal de estatus de la figura 13 y la señal proveniente de la compuerta en el circuito de la figura 16.

En la figura 38 se muestra la señal de interrupción generada por el estatus, correspondientes a la señal de ESTATUS\_AB y la salida de la compuerta en la figura 15. En este caso, el estatus corresponde a una onda monofásica y por consiguiente la señal de interrupción sólo está habilitada para generar interrupciones cada 180 grados.

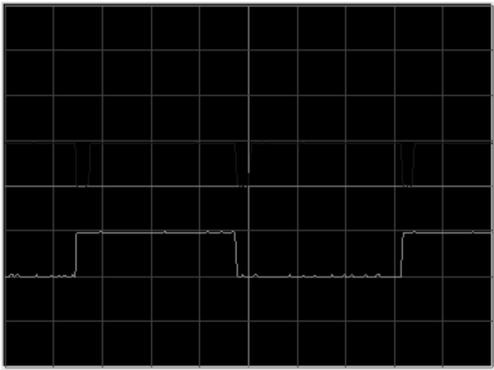


Figura 38. Interrupción y estatus.

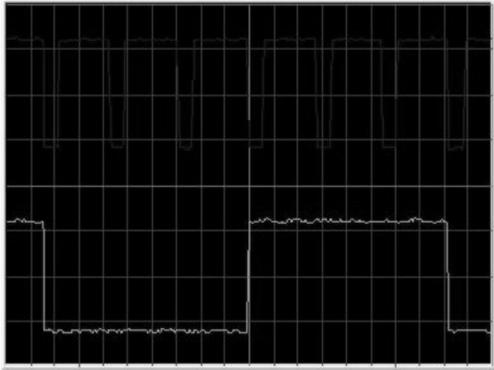
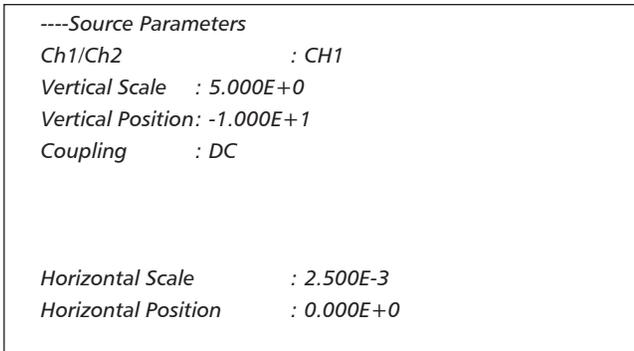
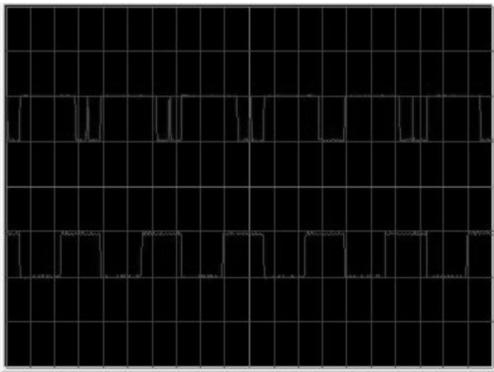


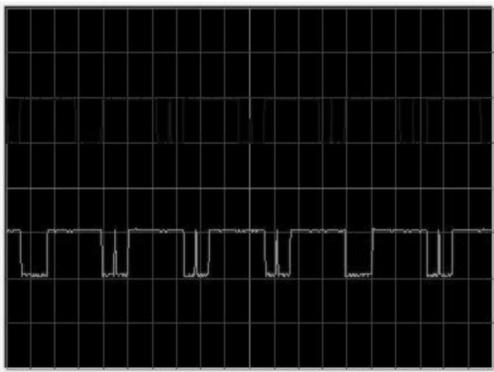
Figura 39. Interrupción cada 60 grados y estatus UAB.

En la figura 40 se comparan una de las señales de Estatus y la salida para uno de los SCR entregada por el microcontrolador. Obsérvese que la señal de salida al SCR presenta en realidad dos salidas en el tiempo, situación que se explica por la forma como están nombrados los SCR en el puente rectificador, lo cual permite que, sin importar el rango, cada SCR opere de manera consecutiva durante dos valores de Estatus que se encuentren consecutivos. En la figura 41 se pone de manifiesto el mismo principio sobre dos salidas diferentes de SCR del microcontrolador.



**Figura 40.** Salida para activación de un SCR y señal de Estatus.

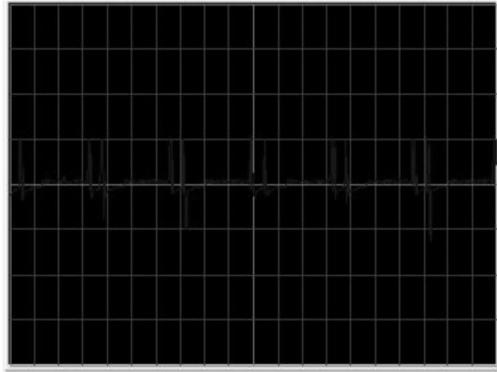
----Source Parameters	
Ch1/Ch2	: CH1
Vertical Scale	: 50.0V
Vertical Position: 50.0V	
Coupling	: DC
Horizontal Scale	: 5.000ms
Horizontal Position	: 0.000s



**Figura 41.** Salidas de activación del SCR1 y SCR2 en el microcontrolador.

----Source Parameters	
Ch1/Ch2	: CH1
Vertical Scale	: 50.0V
Vertical Position: 50.0V	
Coupling	: DC
Horizontal Scale	: 5.000ms
Horizontal Position	: 0.000s

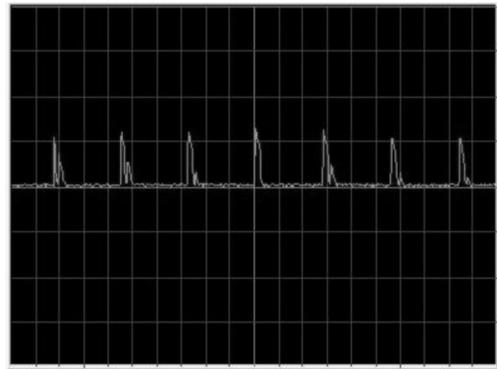
Las salidas del microcontrolador, luego de pasar por el proceso de modulación, amplificación y aislamiento, toman la forma mostrada en la figura 42, que se corresponde con el valor compuerta - cátodo en uno de los SCR del puente.



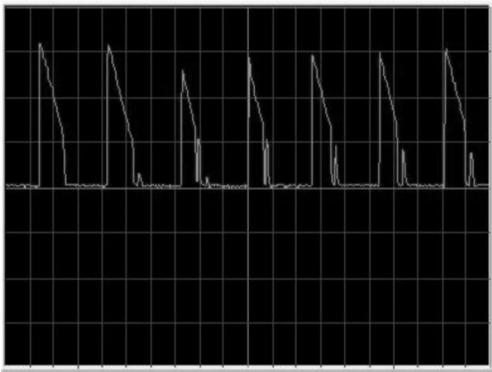
**Figura 42.** Salida del transformador de pulsos para la activación de un SCR.

----Source Parameters	
Ch1/Ch2	: CH1
Vertical Scale	: 5.00V
Vertical Position: -200mV	
Coupling	: DC
Horizontal Scale	: 5.000ms
Horizontal Position	: 0.000s

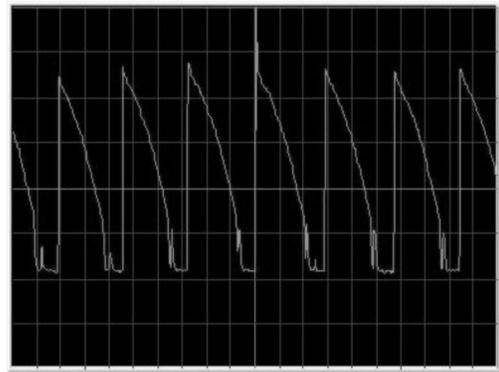
Sobre la carga, la señal de tensión para diferentes valores de  $V_c$  puede apreciarse en las figuras 43 a 49. Como se puede observar, en la medida en que  $V_c$  crece, el ángulo de disparo se hace menor y el valor de voltaje promedio  $V_{dc}$  aumenta.



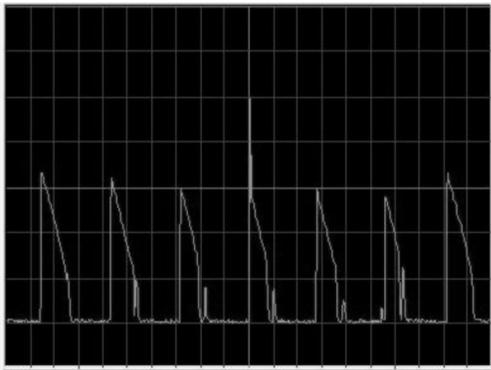
**Figura 43.** Tensión sobre la carga para voltaje de control  $V_c=1,5V$ .



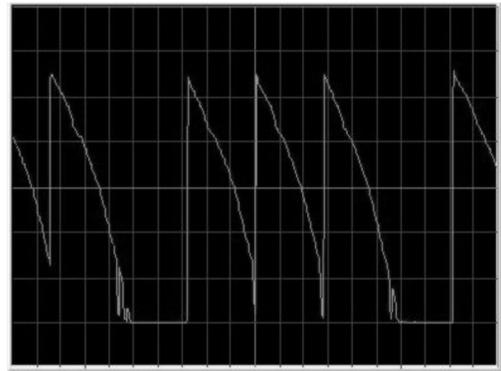
**Figura 44.** Tensión sobre la carga para voltaje de control  $V_c=2,0V$ .



**Figura 47.** Tensión sobre la carga para voltaje de control  $V_c=3,5V$ .



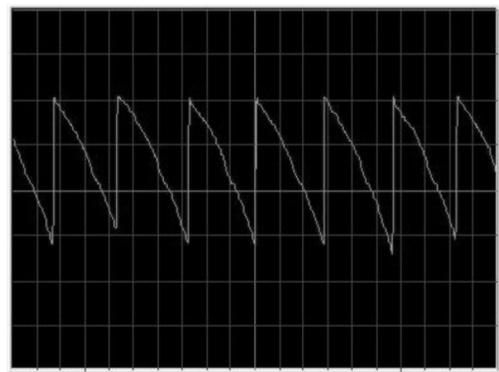
**Figura 45.** Tensión sobre la carga para voltaje de control  $V_c=2,5V$ .



**Figura 48.** Tensión sobre la carga para voltaje de control  $V_c=4,0V$ .



**Figura 46.** Tensión sobre la carga para voltaje de control  $V_c=3,0V$ .



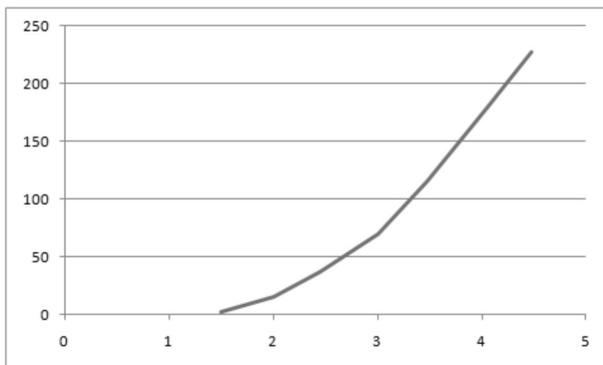
**Figura 49.** Tensión sobre la carga para voltaje de control  $V_c=4,5V$ .

Los efectos de la linealidad conseguida pueden observarse en la siguiente tabla:

**Tabla 4**  
Relación de voltaje de control y tensión de salida en DC

Vc	Vdc
1,5	2,5
2	15
2,45	37
3	70
3,48	116
4,05	180
4,47	228

En la figura 50 se indica que existen valores del voltaje de control donde las tensiones de salida son nulas. Esto es por el efecto del tipo de carga sobre el cual se realizó la medición, aunque estos resultados se pueden mejorar con una carga altamente inductiva, en cuyo caso se tendría un voltaje de salida lineal para tensiones de Vc entre 2,5V y 5,0V correspondientes a ángulos de disparo entre 90° y 0°. Los valores entre 0V y 2,5V del voltaje de control servirán para garantizar entonces un frenado dinámico.



**Figura 50.** Relación entre Vc y Vdc.

### CONCLUSIONES

1. Los dispositivos microprocesados son una alternativa válida para la generación de pulsos de disparo de los SCR en puentes rectificadores totalmente controlados, semicontrolados o no controlados. A nivel funcional, se distinguen las siguientes ventajas:
  - a) Es factible discriminar el tipo de puente de acuerdo con sus dispositivos (diodos o SCR), configurando el *software* desde una etapa de E/S del usuario, y sin cambiar *hardware* o *software*.

- b) La discriminación por rangos permite tener un tiempo de respuesta del ángulo de disparo de máximo 60° en puentes rectificadores trifásicos, lo cual constituye ventaja sobre los sistemas de control analógicos que generan pérdida de un pulso de disparo cuando el ángulo se encuentra entre 60° y 120°, y de dos pulsos de disparo entre 120° y 180°.
  - c) El concepto de Estatus no sólo permite verificar la secuencia de la red eléctrica AC trifásica conectada al puente, sino que además otorga la posibilidad de proponer una alternativa diferente en la tabla de disparo, de modo que a pesar de tener secuencia de fase contraria a la de diseño, en la parte de potencia se obtenga el mismo funcionamiento. Esto permite conectar el puente trifásico sin importar la secuencia de fase, situación que generalmente reviste problema en la conexión de estos dispositivos
  - d) La liberalización entre las señales de entrada Vc y salida Vdc.
2. El sistema de control mediante dispositivos microprocesados presenta desventajas superables:
  - a) El sistema es altamente sensible al balance de las tres ondas de AC de alimentación, ya que el desbalance en una de ellas puede generar disparos tempranos, o anular disparos cuando el ángulo de disparo se encuentre en los límites de 180°. Una alternativa de solución a este problema consiste en configurar el Timer no como temporizador sino como contador, y generar los pulsos de conteo a partir de una señal ajustable en frecuencia, de acuerdo con el valor de voltaje de la señal AC (oscilador controlado por voltaje)
  - b) El valor de K para escalar los valores del ADC a los valores de ciclos de máquina en el temporizador puede contener valores decimales. En un sistema microprocesado de baja gama, que implemente multiplicación y división entre enteros, se generarán errores en el cálculo de los ángulos de disparo. Estos errores se hacen más pronunciados en las fronteras de los rangos, ya que un mal cálculo puede generar disparo de los SCR que corresponden a un rango vecino con el mismo estatus. Para dar solución a esto se puede elegir, en la medida en que se pueda, una frecuencia de operación en el sistema microprocesado

de modo que se garanticen valores enteros de  $K$ , o sistemas que implementen multiplicación y división en punto flotante.

- c) El valor de  $K$  en la aplicación fue de 34 ciclos de máquina. Cuando el ángulo de disparo es de  $0^\circ$ , tan pronto como se produce la interrupción de cruce por cero el circuito generador de pulsos de disparo debe generar la señal correspondiente a los SCR adecuados, pero esto no ocurrirá debido a que el algoritmo necesita un tiempo para hacer los cálculos, el cual puede estar por encima de los 34 ciclos de máquina. Sin embargo, el valor de  $0^\circ$  resulta en la práctica un valor teórico, incluso para los diodos de potencia, y un valor de  $5^\circ$  resulta razonable como el valor de  $\alpha$  más acertado. En consecuencia, mientras el tiempo para el cálculo de  $\alpha$  y los SCR en las dos rutinas de interrupción esté por debajo del mínimo valor de  $\alpha$  aceptable por límites reales de los SCR o por conveniencia del usuario, el algoritmo no reviste problema
3. Es factible reducir la circuitería de adecuación de señal para generar la señal de interrupción, incluso en el mismo dispositivo microprocesado. Tecnologías de DSPIC implementan en su estructura comparadores analógicos y ADC con varios canales multiplexados que bien podrían reducir significativamente el *hardware* necesario para desarrollar esta implementación.
  4. El recurso sacrificado en esta implementación es la memoria del programa. En el AT89C52 se dispone de ocho *kilobytes* de memoria de programa, y con un ADC de ocho bits, se requieren 256 *bytes* para implementar la tabla para el cálculo del arcoseno. Esto representa el 3% de la EEPROM disponible. No obstante, incrementar la resolución del ADC a diez bits implica el uso de 1024 *bytes*, es decir, el

13%. La implementación de las rutinas de reinicio, de interrupciones y rutinas de apoyo puede representar alrededor del 5%. Lo anterior deja un espacio de maniobra para aplicar en el programa principal entre el 80 y el 90%.

## REFERENCIAS

- [1] Aller Castro, José Manuel (2004). *Máquinas eléctricas rotativas Introducción a la teoría general*. Venezuela: Universidad Simón Bolívar.
- [2] Wildi, Theodore (2007). *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*, 6a. ed. México: Pearson.
- [3] Sen, P.C. (1990). Electric motor and drives and control: past, present and future. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. IE37, No. 6, pp. 562-575.
- [4] Harashima, F. (1983). State of the art on power electronics and electrical drives in Japan. Suiza: 3er Ifac Symposium on Control in Power Electronics and Electrical Drives, pp. 23-33.
- [5] Rashid, Muhammad H. (1981). Dynamic responses of DC chopper controlled series motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentations*, vol. IEC128, No. 4, pp. 323-340.
- [6] Reimers, E. (1972). Design analysis of multiphase dc chopper motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA8, No. 2, pp. 136-144.
- [7] Rashid, Muhammad H. (2004). *Electrónica de potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones*, 3ª ed. México: Pearson Educación.
- [8] Holt, R.G. (1990). Designing intelligent muscle into industrial motion control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. IE37, No. 5, pp. 329-341.
- [9] Best, J. & Mutschler, P. (1983). Control of armature and field current of a chopper-fed DC motor drive by a single chip microcomputer. Suiza: 3er Ifac Symposium on Control in Power Electronics and Electrical Drives, pp. 512-522.
- [10] Tso S.K. & Ho, P.T. (1981). Dedicated microprocessor scheme for thyristor phase control of multiphase converters. *Proceedings IEEE*, vol. B22, pp. 101-108.
- [11] Peracaula Roura, Joan (1990). *Convertidores alterna - continua con tiristores*. España: Marcombo.
- [12] Insuasti, D. & Pinillos, L. (1999). Diseño, construcción e implementación de un puente rectificador totalmente controlado por microcontrolador para un motor de DC de 75 caballos de fuerza. Colombia: Universidad del Valle.

# Navegación de un robot móvil autónomo utilizando el concepto de campo de fuerza combinado

## Navigation of an autonomous mobile robot using the combined force field concept

JOSÉ L. SUSA<sup>1</sup> y DIEGO A. RAMOS<sup>2</sup>

1. Ingeniero electrónico, investigador grupo de investigación Ecitrónica, Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, Colombia. jose.susa@escuelaing.edu.co.

2. Ingeniero electrónico e ingeniero mecánico, grupo de investigación Ecitrónica, Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, Colombia. diego.ramos@escuelaing.edu.co.

Recibido: 29/06/2009 Aceptado: 12/12/2009

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

### Resumen

En este artículo se presentan el desarrollo, prueba y resultados obtenidos de un algoritmo de evasión de obstáculos basado en el método de campo de potencial (PFM, por su sigla en inglés) y combinado con el método de seguimiento de contornos, para resolver el problema del mínimo local que posee el PFM.

Adicionalmente, se divulgan los resultados de la investigación, cuyo propósito fue desarrollar un algoritmo que permitiera a un robot móvil desplazarse en forma autónoma, con el fin de alcanzar una meta, evitando los obstáculos que encontrara en su trayectoria. Los requerimientos para el diseño del algoritmo fueron alta velocidad de respuesta, bajo consumo de recursos de *hardware* y capacidad de respuesta ante situaciones no previstas.

Las simulaciones demuestran que el algoritmo soluciona el problema del mínimo local, inherente al uso del PFM, y puede implementarse en un robot real, cumpliendo con las características citadas previamente.

**Palabras claves:** inteligencia artificial, evasión de obstáculos, método de campo de potencial y navegación autónoma.

### Abstract

This article presents the development, testing and results from an obstacle avoidance algorithm based on potential field method (PFM), combined with the contour following method to solve the problem of local minimum in the PFM.

In this paper, we report the findings of the research, whose objective was to develop an algorithm that allowed a mobile robot to navigate autonomously to reach a goal, avoiding obstacles in its path. Requirements for the design of the algorithm were high response speed, low consumption of hardware resources and capacity answer to unforeseen situations.

The simulations show that the algorithm solves the problem of local minimum-inherent in the use of PFM-and it can be implemented in a real robot, since it fulfills the mentioned characteristics.

**Keywords:** artificial intelligence, obstacle avoidance, potential field method, autonomous navigation.

## INTRODUCCIÓN

Ir de un punto a otro (*path planning*), ir en busca de alimento (*research goal*) y caminar sin tropezar (*avoiding obstacles*) son comportamientos ejecutados fácil y rápidamente por un ser vivo; sin embargo, hasta el día de hoy los intentos por imitar tales funciones en agentes robóticos autónomos han resultado en grandes desafíos para los investigadores, ya que para lograr una navegación autónoma en un robot hay que desarrollar sofisticados algoritmos que deben detectar las condiciones de su entorno y de sí mismo para desplazarse, tratar rápida y eficientemente la información (tiempo real), ser robustos y flexibles (resolver problemas que no se previeron en su programación inicial).

El objetivo de la investigación de que trata este artículo fue desarrollar un algoritmo de navegación autónoma para un robot móvil, con el fin de que éste pueda desplazarse en busca de un objetivo, evite los obstáculos que encuentre en su trayectoria y cumpla con las siguientes características para poder implementarlo en un robot real:

- Flexible (respuesta ante situaciones no previstas, adaptación a cualquier medio).
- Eficiente (bajo consumo de recursos del sistema, ejemplo: “memoria”).
- Rápido (pocas operaciones, respuesta en tiempo real).
- Fiable (respuesta correcta a pesar de los errores de percepción).

Aunque hay diferentes tipos de algoritmos para la navegación autónoma, seguimiento de trayectorias y evasión de obstáculos, éstos pueden clasificarse en cuatro categorías [21]: los algoritmos gráficos, los métodos clásicos, los algoritmos heurísticos y, finalmente, los que hacen uso del campo de potencial. El trabajo realizado en esta investigación se encuentra en el último grupo.

El contenido del presente artículo está dividido en cinco secciones: la primera es el “estado del arte”, en la que se exponen los principales métodos que se basan en el PFM y corrigen el problema del mínimo local; la segunda sección es la fundamentación teórica, donde se explican los dos comportamientos que se usaron en el algoritmo; la tercera sección es la discusión de los experimentos realizados, la cuarta sección son las conclusiones, y en la quinta sección se muestra el futuro de

esta investigación, en aras de implementar los resultados en un entorno real.

## ESTADO DEL ARTE

En esta parte del artículo se introducirán los principales métodos de navegación autónoma para robots móviles desarrollados en los últimos años, que han usado el concepto del campo de potencial para guiar al robot a un objetivo mientras éste evade los obstáculos encontrados en su camino.

Khatib (1985) [1] fue el precursor de la propuesta del PFM (*Potential Field Method*): éste tomó como punto de partida el sistema de fuerzas planteado por Craig Reynolds [3], en el cual se relacionan los obstáculos, un objetivo (punto de llegada) y la dirección del robot con fuerzas vectoriales, de tal manera que la suma de sus magnitudes y direcciones proporcionaba un vector resultante que tiende a apartar al robot de los obstáculos y al mismo tiempo intenta acercarlo al objetivo. En 1990, Borenstein y Koren [7] identificaron claramente la gran limitación de este método, el problema del mínimo local (*Local Minima Problem*, LMP), el cual se presenta cuando el robot, en su trayectoria hacia el objetivo, se encuentra en el interior de un obstáculo cóncavo.

Moravec y Elfes [2] [4] [5] tomaron igualmente el PFM para generar un método capaz de resolver el LMP. Su solución consistió en modelar el mundo del robot en una forma matricial, donde cada celda de la matriz correspondía a un valor de probabilidad de existencia de obstáculos “ $C(i,j)$ ”; cuanto más grande era el valor de la celda ( $C(i,j)$ ), más grande era la certeza de que un obstáculo ocupaba esa celda. La fuerza de repulsión generada por los obstáculos era directamente proporcional al valor “ $C(i,j)$ ” e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre las celdas y el robot, lo que generaba un mapa de trayectorias por donde el robot se podía mover sin chocarse. Este método llamado VFF (*Virtual Force Field*), precedió al VFH [8] y sus posteriores mejoras VFH+ [11], VFH\* [12] en los años 1998 y 2000. En el 2000, Im y Oh [13] hicieron uso del VFF para desarrollar su método extendido (EVFF), que incluía redes neuronales y una metodología heurística para controlar la trayectoria de un robot sin chocarse y sin permanecer en ciclos infinitos.

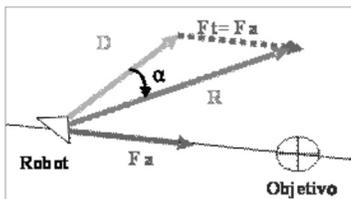
En los años 2000[14] y 2003[15] se plantearon dos algoritmos basados en conceptos abstractos sobre obstáculos y objetivos virtuales. El primero obligaba al robot a usar nuevas trayectorias, cambiando los obstáculos cóncavos por obstáculos convexos virtuales, y el segundo se encarga de cambiar el objetivo principal por subobjetivos temporales que guían al robot fuera de obstáculos cóncavos, y una vez afuera continúa con su objetivo.

**ABEO - BASES TEÓRICAS**

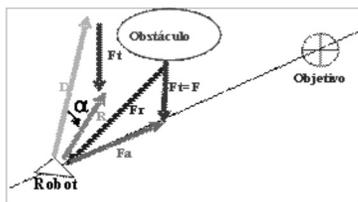
**Método del campo de potencial (PFM)**

Craig W. Reynolds fue el precursor de la idea de representar el ambiente y comportamiento de un robot por un sistema vectorial de fuerzas. En su artículo *Steering Behaviors for Autonomous Characters*[3], él explica la modelización de diferentes comportamientos animales, tales como la búsqueda o evasión de un objetivo estático y móvil, seguimiento de una trayectoria, seguimiento de un flujo de movimiento, separación y cohesión entre individuos.

A renglón seguido se muestra el primer comportamiento Reynolds para buscar un objetivo (figura 1).



**Figura 1.** Búsqueda de un objetivo .



**Figura 2.** Fuerza de atracción y de repulsión mientras se busca un objetivo.

En la figura 1 se puede observar la existencia de dos vectores de fuerza: la fuerza de movimiento del robot  $D$  y la fuerza total  $F_t$ , que representa el entorno, pero

que en este ejemplo sólo es la fuerza de atracción que genera el objetivo. La suma de estas dos fuerzas es la fuerza  $R$ , la cual corregirá la dirección de movimiento del robot y lo hará avanzar hacia el objetivo.

En la figura 2 se muestra cómo se aplica el mismo principio pero ahora con un obstáculo y la fuerza generada por éste. En el presente caso la fuerza total ( $F_t$ ) es la suma de las fuerzas de atracción ( $F_a$ ) y repulsión ( $F_r$ ) generadas por el objetivo y el obstáculo, respectivamente; el vector resultante ( $R$ ) se obtiene sumando el vector de movimiento ( $D$ ) con la fuerza total ( $F_t$ ). Este vector  $R$  representa la nueva dirección del robot que lo llevará al objetivo, al mismo tiempo que evita el obstáculo.

La simpleza y, por ende, su rapidez para calcular las fuerzas de repulsión y de atracción fueron las principales razones consideradas para usar el método PFM. A continuación se muestra su representación:

$$\overline{Fr} = \frac{Fcr}{d(i, j)} \left[ \frac{x_{obj} - x_{robot}}{d(i, j)} \hat{x} + \frac{y_{obj} - y_{robot}}{d(i, j)} \hat{y} \right]$$

**Ecuación 1.** Fuerza de repulsión

$$\overline{Fa} = Fca * \left[ \frac{x_{obj} - x_{robot}}{d(i, j)} \hat{x} + \frac{y_{obj} - y_{robot}}{d(i, j)} \hat{y} \right]$$

**Ecuación 2.** Fuerza de atracción

$$\overline{Ft} = \overline{Fa} + \overline{Fr}$$

**Ecuación 3.** Fuerza total

$$\overline{R} = \overline{D} + \overline{Ft}$$

**Ecuación 4.** Fuerza resultante

En la ecuación 1  $Fcr$  y ecuación 2 son constantes,  $X_{obj}$  y  $Y_{obj}$  son las coordenadas del objetivo,  $X_{robot}$  y  $Y_{robot}$  son las coordenadas del robot,  $d(i, j)$  la distancia del centro del robot al objetivo, y en la ecuación 4  $D$  es la fuerza de movimiento o dirección del robot.

A partir de las anteriores ecuaciones se puede notar que cuando el robot está lejos del obstáculo la fuerza de repulsión ( $F_r$ ) generada es baja o nula; en caso contrario, si el robot está cerca del obstáculo la magnitud del vector de repulsión es mayor para evitar que el robot choque. Así mismo, la fuerza de atracción ( $F_a$ ) es inversamente proporcional a la distancia entre el robot y el objetivo, mientras más cerca esté el robot del objetivo, más gran-

de es la magnitud del vector de atracción.

La simplicidad de las operaciones realizadas para obtener los vectores  $F_r$  y  $F_a$  es una ventaja cuando se piensa en aplicar el PFM a un robot real, ya que el procesador tomará menos ciclos para calcular cada vector de fuerza y su consecuente vector de movimiento resultante, y se ganará con esto que el robot tenga reacción en tiempo real.

Método de seguimiento de contornos (wall-following)

La idea en general del método de seguimiento de contornos es mantenerse a cierta distancia de un objeto, moviéndose paralelo a la trayectoria que marca el contorno de éste. Dichos objetos pueden ser tanto convexos como cóncavos. El seguimiento de contornos se realiza de la siguiente manera: primero se debe hacer un acercamiento del robot al objeto hasta alcanzar el umbral de cercanía deseado, es decir, la distancia que el robot debe mantener con el objeto; al conseguirlo, el robot debe buscar orientarse de tal manera que el frente esté libre para poder avanzar y su costado se halle a cierta distancia del objeto; si al avanzar la distancia entre el robot y el objeto es mayor o menor que el umbral definido, éste deberá posicionarse nuevamente a la distancia establecida para seguir avanzando.

Borenstein (1989) [6] y Yun y Tan (1997) [10] plantearon dos algoritmos para resolver el problema del mínimo local con la ayuda del método de seguimiento de contornos. El algoritmo presentado difiere en las condiciones que determinan cuándo dejar el PFM y comenzar a usar el seguimiento de contornos para no caer nunca en los mínimos locales. Estas condiciones se presentan a continuación.

Condiciones de estado cíclico y libre (combinación de los dos métodos anteriores)

Estas condiciones definen cuándo el robot debe usar el PFM o cuándo utilizar el método de seguimiento de contornos, con el fin de que el robot pueda sortear cualquier obstáculo sin importar su forma y llegar a su objetivo, solucionando el problema del mínimo local.

Mediante el siguiente ejemplo se explica el problema del mínimo local inherente al método PFM.

En la figura 4A, la fuerza de atracción guía al robot al objetivo; luego de avanzar una cierta distancia (figura

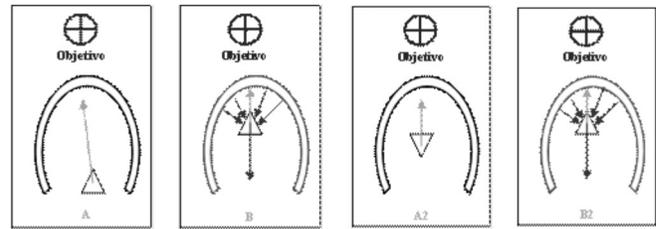


Figura 4. Problema del mínimo local (LMP) generado por usar el PFM con un obstáculo cóncavo.

4B), se encontrará con el obstáculo que lo repele con una fuerza en sentido contrario a la fuerza de atracción. Debido a esto, el robot girará y se alejará del objetivo, evitando el obstáculo; sin embargo, luego de estar nuevamente sin obstáculos (figura 4A2) el robot tratará de dirigirse otra vez al objetivo, regresando al interior del obstáculo y entrando en una condición cíclica (figura 4B2).

Para evitar caer en la trayectoria cíclica ocasionada por el problema del mínimo local se definió la llamada “condición de estado cíclico (CEC)”, que obliga al robot a cambiar de método. La primera condición consiste en que si todos los sensores del robot se activan indicando una distancia menor o igual al radio del robot, éste usará el método de seguimiento de contornos. Seguidamente se muestra un ejemplo:

Cuando la condición de estado cíclico se activa en el robot (figura 5A), se calcula la llamada “recta de detección de estado cíclico (RDEC)”, que pasa por los puntos  $(X_{obj}, Y_{obj})$  y  $(X_{robot}, Y_{robot})$ ,

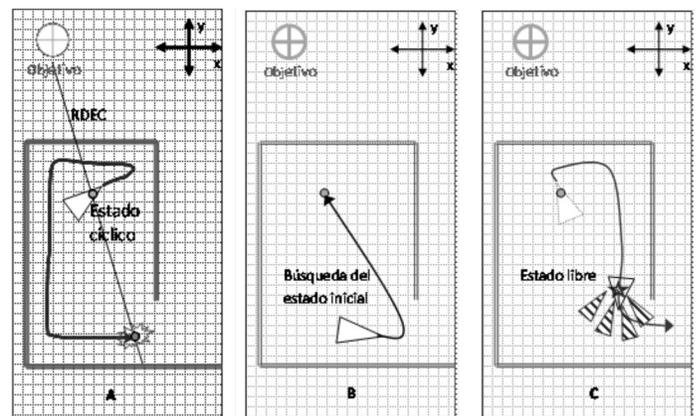


Figura 5. Uso de la recta de detección de estado cíclico, y las condiciones de estado cíclico y libre.

$$y = \left[ \begin{matrix} y_{obj} - y_{robot} \\ x_{obj} - x_{robot} \end{matrix} \right] * (x - x_{obj}) + y_{obj}$$

**Ecuación 5.** Recta de detección de estado cíclico

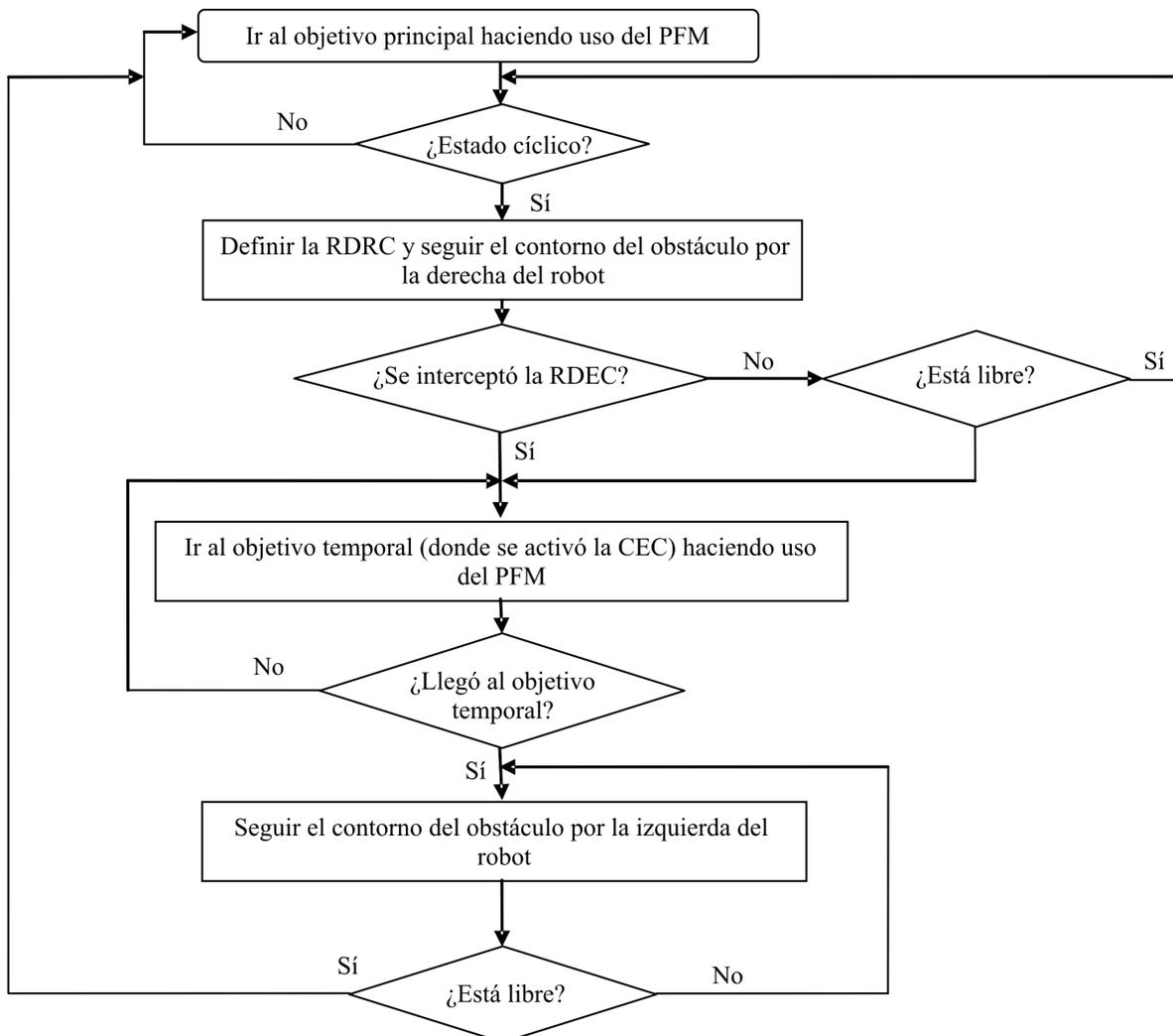
Luego de calcular la RDEC, el robot comienza a usar el método de seguimiento de contornos recorriendo el obstáculo por su derecha; se evalúa si la posición actual cumple, con un grado de tolerancia, la ecuación de la recta RDEC; si cumple, significa que entró en un bucle (figura 5A) y debe regresar al punto en el cual comenzó la condición CEC, usando el PFM para cambiar temporalmente su objetivo, y empieza a seguir el contorno del obstáculo por su izquierda (figura 5B).

No obstante, si esta condición no se activa, a medida que el robot avanza rodeando el muro, cada nueva

posición es evaluada en la RDEC; si en algún momento del recorrido del robot su posición  $(x, y)$  satisface la ecuación de la RDEC, significa que éste la cruzó. Para llegar a este punto se hace uso del PFM, con la salvedad de que el objetivo es el punto de activación de la CEC. En el momento en que el robot llega al objetivo temporal, éste comienza a seguir el contorno del obstáculo por su izquierda (figura 5B).

Si en algún momento del recorrido el robot no detecta obstáculos se generará la segunda condición, llamada “condición de estado libre” (CEL), en la cual el robot volverá a usar el método PFM, dirigiéndose al objetivo principal (figura 5C).

A continuación se muestra el diagrama de flujo del algoritmo:



## DISCUSIÓN DEL EXPERIMENTO

Para probar el algoritmo se empleó el simulador de robots móviles Mobotsim, en tanto que para poder comparar el desempeño del algoritmo se usaron configuraciones de obstáculos similares a las propuestas por otros autores [21].

### Geometría del robot

En la simulación se utilizó un robot con las siguientes características:

- Cinemática de tipo diferencial.
- Diámetro de 40 cm (*platform diameter*).
- Distancia entre las ruedas de 25 cm (*distance between wheels*).
- Diámetro de las ruedas de 20 cm.
- Cuatro sensores, separados un ángulo de 45 grados, con un rango de medición de 4 cm hasta 80 cm (valores similares a los de un sensor de distancia infrarrojo), con un cono de radiación de 15 grados y con error producido por una falsa detección de un objeto (*misreading*) del 5% (un *misreading* del 10% significa que de cien detecciones de obstáculos, diez de éstas son inexistentes).

### Entorno

El *software* MobotSim posee un mapa de coordenadas rectangulares ( $x, y$ ) donde pueden ponerse obstáculos

de diferentes formas, simplemente dibujándolos encima del mapa. En este entorno, el robot puede conocer su posición actual en cualquier momento de manera exacta, la posición del objetivo, y las distancias precisas entre el robot y los objetos por medio de los sensores de distancia.

### Programación

El MobotSim dispone del lenguaje Sax Basic© para programar los comportamientos del robot. Éste se modela como un objeto (entendido éste con la referencia de la programación por objetos) con diferentes funciones para hacer giros y desplazamientos, conocer su posición actual y la del objetivo, entre otras.

### Pruebas

Para comenzar, se hicieron pruebas en ambientes cuyas configuraciones fueron difíciles para otros algoritmos (Ayomoh y Olunloyo [21]):

Como se observa en la figura 6, el resultado de los experimentos demostró que el algoritmo es efectivo en ambientes similares a los probados [21] y sus predecesores. Se observa además que las trayectorias no son siempre iguales, puesto que dependen no sólo de la posición inicial y la ubicación de los obstáculos, sino también del ángulo inicial del robot.

Se efectuaron otras pruebas utilizando los mismos mapas de la figura 6, pero con un porcentaje de error

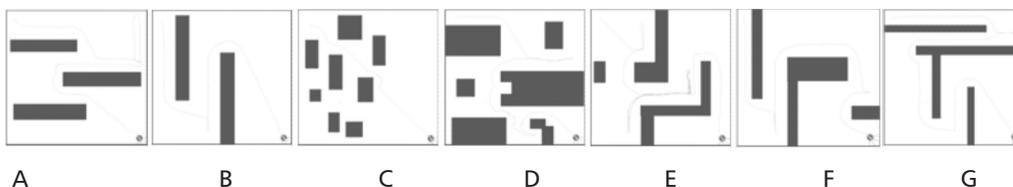


Figura 6. Entornos de prueba comunes a otros algoritmos.

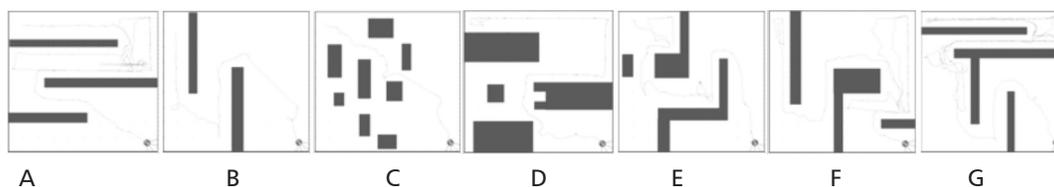


Figura 7. Entornos de prueba comunes a otros algoritmos.

del 10% en las mediciones de los sensores, simulando al error que un sensor infrarrojo podría presentar.

El resultado fue exitoso en todas las pruebas realizadas, lo que demuestra que el algoritmo es capaz de sobrellevar estos errores y hacer que el robot alcance el objetivo, evitando el problema del mínimo local.

El algoritmo propuesto usa sólo cuatro sensores, comparado con los algoritmos basados en el VFF [21] que necesitan 24 o más; por tanto, requiere adquirir menos datos, y realizar menos número de conversiones y operaciones, ya que éstas son simples, por lo que toman pocos ciclos de operación del procesador. A menor cantidad de ciclos de procesador, más rápida es la respuesta del robot, por lo cual se pueden alcanzar mayores velocidades.

La última prueba incluye un ambiente más complejo, como recrear espacios y objetos en una casa.

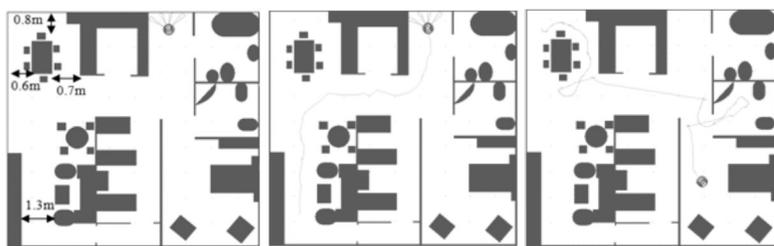


Figura 8. Mundo virtual de prueba, resultado sin error de medición y con error del 10%.

El robot fue capaz de llegar al objetivo luego de pasar por lugares estrechos hasta con error del 10% en las mediciones de distancias y sorteando los problemas del mínimo local.

## CONCLUSIONES

Un robot móvil, que implemente el algoritmo de evasión de obstáculos basado en el concepto del campo de fuerza combinado, está en capacidad de alcanzar un objetivo esquivando obstáculos de cualquier tamaño o cualquier forma sin detenerse, sin permanecer en estados cíclicos debido a espacios semicerrados cóncavos, y respondiendo rápida y correctamente, a pesar de posibles errores de percepción.

De los experimentos realizados se determinó la alta fiabilidad del algoritmo propuesto, ya que con errores de percepción de hasta un 10%, el robot puede evitar obstáculos y llegar al objetivo sin caer en el error del mínimo local.

El método propuesto requiere menos *hardware*, en comparación con otros métodos basados en el PFM como el VFF, el VHF y sus derivados, el VOC, el VGC, o el HVFF. El robot únicamente necesita cuatro sensores, lo que disminuye no solo costos, sino tiempo de procesamiento al requerir menos operaciones de adquisición, conversión, procesamiento de información y cálculo de fuerzas de repulsión.

Comparado con otros algoritmos basados en el PFM que resuelven el problema del mínimo local, el algoritmo propuesto responde más rápido, al efectuar operaciones muy sencillas (sumas, restas y comparaciones) para calcular la condición de estado cíclico, la condición de estado libre y el método de seguimiento de contornos, además de necesitar menos operaciones por usar tan sólo cuatro sensores.

Utilizar como base el método PFM permite al robot tener una respuesta en tiempo real ante cambios en el ambiente, no requiere guardar en memoria la descripción del entorno para generar la trayectoria que lo conduzca al objetivo, y su combinación con el método de seguimiento de contornos permite resolver en una forma sencilla el problema del mínimo local inherente al PFM.

## TRABAJOS POSTERIORES

La investigación posterior se centrará en la aplicación del algoritmo a un robot real diferencial con posicionamiento basado en GPS (*Global Position System*), medición de distancia a los obstáculos utilizando sensores infrarrojos y estimación de la posición angular del robot por métodos odométricos empleando codificadores ópticos.

## REFERENCIAS

- [1] Khatib, O. (1985). Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- [2] Moravec, H.P. & Elfes, A. (1985). High Resolution Maps from Wide Angle Sonar, *IEEE Conference on Robotics and Automation*. Washington, D.C., pp. 116-121.
- [3] Reynolds, C.W. (1986). *Steering Behaviors For Autonomous Characters*, Sony Computer Entertainment America.

- [4] Elfes, A. (1987). Sonar-based Real-World Mapping and Navigation, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-3, No. 3, pp. 249-265.
- [5] Moravec, H.P. (1988). Sensor Fusion in Certainty Grids for Mobile Robots, *AI Magazine*, Summer, pp. 61-74.
- [6] Borenstein, J. & Koren, Y. (1989). Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 19( 5 ): 1179-1187.
- [7] Borenstein, J. & Koren, Y. (1990). Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots in cluttered environments, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Cincinnati, Ohio, pp. 572-577.
- [8] Borenstein, J. & Koren, Y. (1991, June). The Vector Field Histogram - Fast Obstacle Avoidance For Mobile Robots, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 7, No. 3, pp. 278-288.
- [9] Connolly, C.I. (1992). Applications of harmonic functions to robotics, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control*, pp. 498-502.
- [10] Yun, X.P. & Tan, K.C. (1997). A wall-following method for escaping local minima in potential field based motion planning, *Proceedings of International Conference on Advanced Robotics*. Monterrey, pp. 421-426.
- [11] Ulrich, I. & Borenstein, J. (1998). VFH+: Reliable Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots, *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Leuven, Belgium, May 16-21, pp. 1572-1577.
- [12] Ulrich, I. & Borenstein, J. (2000). VFH\*: Local Obstacle Avoidance with Look-Ahead Verification, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. San Francisco, CA, April 24-28, pp. 2505-2511.
- [13] Im, K.Y. & Oh, S.Y. (2000). An Extended Virtual Force Field Based Behavioral Fusion with Neural Networks and Evolutionary Programming for Mobile Robot Navigation, *Evolutionary Computation, IEEE Congress*, vol. 2, pp. 1238-1244.
- [14] Chengqing, L., Hang, M., Krishnan, H. & Ser Yong, L. (2000). Virtual Obstacle Concept for Local-minimum-recovery in Potential-field Based Navigation, *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation*.
- [15] Zou Xi-yong, Zhu Jing (2003). Virtual local target method for avoiding local minimum in potential field based robot navigation, ISSN 1009 - 3095, *Journal of Zhejiang University Science*, vol. 4, No. 3, pp. 264-269.
- [16] Seul Jung, Eun Soo Jang, Hsia, T.C. (2005). Collision Avoidance of a Mobile Robot Using Intelligent Hybrid Force Control Technique, *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Barcelona.
- [17] Zhiqiang Yu, Gao Meng, Huaping Liu, Xiaoyan Deng, Jianhua Liu, Qiurui Wu & Yuewei Liu (2008). Dynamic Obstacle Avoidance in Polar Coordinates for Mobile Robot Based on Laser Radar, *IEEE Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application*.
- [18] Hiroaki Seki, Satoshi Shibayama, Yoshitsugu Kamiya & Masatoshi Hikizu (2008). Practical Obstacle Avoidance Using Potential Field for a Nonholonomic Mobile Robot with Rectangular Body, *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics Qingdao*. China.
- [19] Filliat, D. (2008). Interactive learning of visual topological navigation, Paris: Ensta - UEI.
- [20] Fan Wen, Zhenshen Qu, Changhong Wang & Bin Hu (2008). Study on Real-Time Obstacle Avoidance of Mobile Robot Based on Vision Sensor, *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics Qingdao*. China.
- [21] Ayomoh, M.K.O. & Olunloyo, V.O.S. (2009). Autonomous Mobile Robot Navigation Using Hybrid Virtual Force Field Concept, *European Journal of Scientific Research*, ISSN 1450-216X, vol. 31, No. 2, pp. 204-228, EuroJournals Publishing, Inc., <http://www.eurojournals.com/ejsr.htm>.

# Modelo de inventarios y espacio en góndola en puntos de venta para productos de abarrotes en una cadena de supermercados (1a. parte)

## Inventory and shelf space model in points of sale for grocery stores chain

CARLOS RODRIGO RUIZ CRUZ<sup>1</sup>, ARNULFO ZAMORA VIVAS<sup>2</sup>,  
CARLOS JULIO VIDAL HOLGUÍN<sup>3</sup>

1. Escuela Colombiana de Ingeniería. Centro de Estudios en Producción, Facultad de Ingeniería Industrial. Bogotá, D.C., Colombia. carlosr.ruiz@escuelaing.edu.co.

2. Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería Industrial y Estadística. Cali, Colombia. cjvidal7@calipso.com.co.

3. Caja de Compensación Familiar del Valle del Cauca (Comfandi). Departamento de Informática. Cali, Colombia. arnulfozamora@comfandi.com.co.

Recibido: 28/11/2009 Aceptado: 22/01/2010

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

### Resumen

La gestión de inventarios es uno de los campos más estudiados desde el punto de vista teórico, pero la aplicación práctica de sus desarrollos aún es limitada. En este proyecto se aplican conceptos y técnicas de la gestión de inventarios al manejo de miles de ítems en una cadena de venta minorista. Inicialmente se analiza el problema desde sus antecedentes y después se estudian diferentes factores que afectan la demanda de los ítems, con el propósito de identificar comportamientos que deban manejarse dentro del modelo propuesto; para esto se utiliza una muestra representativa de ítems del catálogo. A continuación se propone la aplicación de una clasificación ABC de los ítems y de los puntos de venta, con el fin de priorizar con este criterio las decisiones relacionadas. Luego se analizan varias alternativas de pronósticos de demanda, que permitan estimar el comportamiento futuro de ésta y sirvan de insumo principal para la definición del modelo de inventarios. Como elemento adicional e innovador en este proyecto se propone un modelo para establecer el espacio óptimo en góndola que se va a asignar a cada ítem. Por último, plantea un sistema de control de inventarios (R, S), donde se consideran los efectos de los factores previamente identificados, y se proponen acciones administrativas para garantizar el adecuado funcionamiento del modelo.

**Palabras claves:** control de inventarios, ventas al por menor, productos de consumo masivo, espacio en góndola.

### Abstract

Inventory management has been considerably studied from a theoretical perspective; however, we note a limited application in real world. This project is oriented to apply such concepts and techniques to a retail store with several points of sale and thousands of items. First, we have reviewed the background. Then we have studied related factors affecting demand to identify the effects that should be included in the proposed model-for this purpose, we used a sample from the catalog. Next, we have made an ABC analysis to classify both items and points of sale, and to give priority to related decisions. We have proved several demand-forecasting techniques to anticipate its behavior and allow establishing the inventory model. As an additional and innovative proposal, we have developed a model of shelf space allocation. Finally, a (R, S) inventory system is developed, considering all factors previously identified. Managerial issues are proposed to keep the system in good working order.

**Keywords:** inventory control, retailing, mass consumption items, shelf space.

## INTRODUCCIÓN

Alcanzar una alta eficiencia en costos, así como niveles de servicio adecuados en el negocio minorista, representa un reto en momentos en los cuales la globalización de los mercados ha permitido que grandes y poderosas cadenas multinacionales consoliden cada vez más su posición en el mercado gracias a su poder de negociación, su experiencia en diferentes mercados y la utilización de exitosas estrategias de mercadeo para posicionarse en los mercados locales. En un entorno de rápidos cambios, esta nueva realidad condiciona la supervivencia de cadenas locales, de tal manera que se hacen necesarios, más que nunca, sistemas que mejoren el desempeño a nivel operativo y logren soportar las estrategias trazadas por la empresa para garantizar el cumplimiento de su misión. Hacer frente a esta realidad requiere el uso innovador de herramientas y técnicas de la investigación de operaciones que permitan el uso óptimo de los recursos disponibles.

El manejo de los inventarios representa uno de los mayores retos para cualquier empresa, en un mundo en el cual los consumidores demandan mayor calidad, mayor variedad, menores precios y mejor servicio. Estos aspectos son aún más relevantes en los comerciantes al por menor, quienes en últimas tienen el contacto directo con los consumidores o usuarios finales, donde los momentos de verdad se presentan en cada visita del comprador; no existen segundas oportunidades para lograr la venta y la lealtad es muy difícil de conseguir, pero muy fácil de perder. Una cadena de supermercados se enfrenta a diario a esta realidad en sus puntos de venta. Es muy importante en este negocio alcanzar la mayor eficiencia, debido a la feroz disputa por el mercado y a la competencia en precios, que genera bajos márgenes de utilidad. Las soluciones en tales casos pasan por reducir los costos y ganar la lealtad del cliente.

La gestión de los inventarios tiene varias tareas críticas, una de las cuales consiste en determinar la cantidad de inventario que se debe mantener en cada punto de venta, de la que se desprenden otras como definir la frecuencia con la cual se deben hacer los despachos y los espacios asignados en exhibición a cada producto.

Con este proyecto se propone un modelo de despacho desde la bodega central hacia los puntos de venta, basado en los pronósticos de ventas y la frecuencia de despacho. En el modelo se pretende que el manejo del inventario sea desde la bodega y no desde el punto

de venta. Esta centralización de la toma de decisiones reduce la incertidumbre a través del manejo de pronósticos basados en la tendencia de las ventas, sobre todo si se tienen en cuenta factores que aumentan la variabilidad en el comportamiento de las ventas, como la estacionalidad. El resultado último será la reducción del volumen de inventarios en la cadena de suministro de la organización.

## EL PROBLEMA DE REABASTECIMIENTO CONJUNTO

El problema de reabastecimiento conjunto (*joint replenishment problem*, JRP) es uno de los más antiguos y estudiados en la teoría de inventarios. Este tipo de modelos se usan cuando cierta cantidad de ítems están involucrados en un reabastecimiento y es posible que compartan los costos fijos asociados al reabastecimiento. Aunque existen muchas versiones del JRP, las características más importantes de éste son:

- Cada ítem o producto incurre en un costo fijo, es decir, un costo menor de alistamiento, cada vez que es pedido.
- El sistema incurre en un costo fijo, un costo mayor de alistamiento, cada vez que hay un pedido, sin importar el número de ítems del pedido o qué ítems lo componen.

El objetivo consiste en coordinar el reabastecimiento conjunto para minimizar los costos operativos promedio a largo plazo, sujeto a evitar los faltantes de inventarios. En el caso clásico de JRP, no se consideran límites de capacidad ni problemas de ruteo. Los ahorros se logran al reducir los costos de pedido, transporte, al hacer cada pedido de manera conjunta para el grupo de ítems y, en alguna medida, cuando se consiguen descuentos por compras por volumen.

Se han estudiado diferentes configuraciones en el JRP:

- Sistemas multiítem para un solo minorista. En esta configuración se buscan políticas de inventarios encaminadas a minimizar los costos, o maximizar las utilidades, de un solo minorista, quien debe coordinar las órdenes de varios ítems que tiene en su inventario. La demanda puede ser determinística o estocástica, con revisión continua o periódica.

- Sistemas de cadenas de suministro de varios eslabones. En esta configuración se buscan políticas de inventario que minimicen los costos, o maximicen las utilidades, en una cadena de suministro que puede estar integrada por dos o más componentes, como proveedores, productores, mayoristas, minoristas, etc. En general, la literatura se concentra en las relaciones entre centros de distribución, o bodegas, y los minoristas. Se busca coordinar el suministro conjunto, a varios minoristas, de un solo ítem. La demanda puede ser determinística o estocástica, con revisión continua o periódica.

## ANÁLISIS DE LA DEMANDA

Existe una complejidad inherente a la operación de la empresa en el negocio de venta minorista, a causa principalmente de:

- La gran cantidad de ítems en el inventario.
- Tiendas con características diferentes en términos de infraestructura, tamaño y demografía.
- No se conoce con exactitud la demanda de los ítems.

El primer factor plantea retos debido al alto volumen de datos que se genera, y que es necesario procesar para tomar decisiones de operación. Igualmente, el tiempo necesario para el procesamiento, y generación de información y resultados, debe ser razonable y eficiente en términos computacionales.

El segundo factor añade complejidad en virtud de que la demanda, en términos agregados, no sólo refleja los deseos del consumidor en cantidad y oportunidad, sino también en relación con la localización de las tiendas, el espacio y la forma de exhibición de los productos, entre otros.

El último factor se debe a la dificultad de determinar la demanda real, en razón de que en este tipo de negocio el momento en el cual el consumidor satisface su necesidad, es decir, ejecuta su decisión de compra, es totalmente independiente, ya que es él quien, frente a la góndola en la cual se exhiben los productos, escoge según sus preferencias, bien sea de marca, precio u otras, el producto y la cantidad que desea comprar. Por esta razón, los datos con los que se cuenta son realmente de cantidades vendidas, dada la dificultad de establecer mecanismos que permitan cuantificar la demanda no

servida, esto es, cuando no se satisfizo la necesidad del consumidor, por ejemplo cuando no se tiene en existencia el producto. En estos casos, y debido al flujo de clientes que puede tener un punto de venta, se hace casi imposible determinar si un cliente efectivamente encontró lo que estaba buscando, ya que sus alternativas, en el ejemplo propuesto, podrían ser:

- Comprar un producto sustituto, en cuyo caso la demanda se traslada a otro ítem.
- Abandonar la tienda, lo que se traduce en una venta perdida.

En este proyecto se analiza la demanda desde diferentes perspectivas, con el fin de identificar factores que puedan tener influencia sobre su comportamiento y ser causa de perturbaciones en el método de pronóstico que se utilizará posteriormente y, en últimas, en el modelo propuesto de gestión de inventarios y despacho.

## Selección de la muestra

El catálogo de la empresa en la sección de abarrotes está compuesto por más de 8000 ítems. Teniendo en cuenta que la muestra seleccionada debe ser representativa, se decidió seleccionar una muestra de cada una de las categorías que se van a estudiar, alimentos y no alimentos (principalmente artículos de aseo); se excluyeron del análisis alimentos frescos, como refrigerados, frutas y verduras, y se definió como tamaño de muestra 130 ítems. La extracción de la muestra se realizó seleccionando de manera aleatoria el número de ítems determinado anteriormente. Definidos los artículos objeto de estudio, fue necesario seleccionar una muestra representativa de puntos de venta, ya que debido sobre todo a diferencias en factores demográficos, el comportamiento de la demanda de los ítems de la muestra puede variar. En esta forma se escogieron cinco puntos de venta, que se consideraron representativos por su tamaño, composición demográfica y volumen de ventas; en ellos quedaron representados puntos de venta en zonas residenciales, comerciales y mixtas, en distintos estratos socioeconómicos. Se estableció por último que el periodo por estudiar fuera un año, con el objeto de garantizar que la muestra de ítems fuera representativa en términos de temporalidad.

### Análisis del comportamiento estacional

Debido a que las demandas se pueden ver influidas por factores que afectan su comportamiento, generando patrones repetitivos a lo largo del tiempo, se decidió estudiar diferentes variantes posibles de efectos estacionales:

- Estacionalidad semanal, es decir, la diferencia de la demanda de fines de semana respecto al resto de la semana puede ser significativa. La lógica de este análisis consiste en determinar si existen diferencias entre las demandas en los días considerados laborables y no laborables para la mayoría de las personas. Este comportamiento se analizó en forma estadística a través de pruebas de hipótesis y un análisis pareado, confrontando resultados por semana.
- Estacionalidad quincenal, esto es, la diferencia de demanda de los días considerados de quincena respecto al resto de la quincena puede ser significativa. Esta reflexión se hace debido a que se pretende determinar si en los días de quincena, es decir, aquel intervalo de tiempo en el que gran parte de los asalariados reciben sus pagos, se genera un efecto sobre la demanda en los puntos de venta. El análisis se hizo de manera similar al comportamiento semanal.
- Estacionalidad diaria, es decir, cada día de la semana puede tener un comportamiento de demanda diferente. Este comportamiento se analizó aplicando conceptos de factores estacionales utilizados en métodos de pronóstico para demanda con patrón estacional.

### Análisis de estacionalidad semanal y quincenal

Para realizar las pruebas de hipótesis se aplicó la prueba  $t$ , estadístico que permite comprobar la diferencia entre dos medias. A partir de los resultados obtenidos, en general no se pueden establecer conclusiones definitivas acerca de diferencias entre las demandas de los fines de semana frente a los días de semana, ya que el comportamiento puede depender de la naturaleza del ítem y el tipo y ubicación del punto de venta. Por otra parte, sí se puede concluir, con un buen nivel de certeza, que no existen diferencias significativas entre la demanda promedio de los ítems en quincena y fuera de quincena; por tanto, se puede descartar la influencia de

estacionales quincenales dentro del modelo de gestión de inventarios.

### Análisis incremental semanal y quincenal

Otro enfoque utilizado para analizar la posible existencia de factores estacionales semanales y quincenales fue comprobar la hipótesis de que la demanda promedio es mayor en fines de semana o quincenas respecto a los días previos de semana o quincena. Las pruebas de hipótesis se hicieron calculando para cada ítem de la muestra, en cada punto de venta, las demandas promedio. Para cada semana se estableció entonces si la hipótesis era verdadera o falsa, y luego se calculó el porcentaje de semanas de la muestra que fueron verdaderas y el porcentaje de falsas.

Finalmente, para propósitos de análisis se definió como indicador de la influencia de factores semanales, o quincenales, el porcentaje de ítems de la muestra por punto de venta, en los cuales el número de semanas, o quincenas, en las que se validaba la hipótesis era más del 70%. Por ejemplo, el valor de este indicador para el análisis quincenal en el punto de venta 5 fue de 28,9%; esto significa que en el 28,9% de los ítems analizados la demanda promedio en los días de quincena fue superior a la demanda promedio en los días de no quincena en por lo menos el 70% de las semanas estudiadas. Con base en los resultados obtenidos, se observan factores como los siguientes:

- Las quincenas sólo tienen una influencia moderada sobre el comportamiento de la demanda, tal como se había concluido con el análisis a través de la prueba  $t$ .
- La demanda en días de fin de semana, sábado y domingo, sólo se ve influenciada en algunos ítems, siendo más importante la influencia del sábado.
- La naturaleza del ítem y la ubicación del punto de venta son factores que influyen el comportamiento del cliente e inducen su conducta frente al momento en el cual va a realizar la compra.

### Análisis de la estacionalidad diaria

La estacionalidad se define como la tendencia de una serie de tiempo a presentar un comportamiento que se

repite cada  $L$  periodos. El término estación se utiliza para representar el periodo de tiempo antes que el comportamiento se repita. Luego,  $L$  representa la duración de la estación en periodos. En este análisis se aplicaron conceptos de métodos de pronóstico para patrones de demanda estacional, específicamente el método de Holt-Winters multiplicativo.

Para el cálculo de los índices estacionales se aplican las siguientes expresiones:

donde  $m$  es el número de estaciones que se incluyen para inicializar el modelo, así  $\bar{I}_j$  representa el promedio de los datos de la  $j$ ésima estación con  $j = 1, 2, \dots, mL$ .

donde  $\bar{I}_t$  es el promedio de los datos de la estación que contiene el índice  $t$ , y  $j$  es la posición del periodo  $t$  en la estación. Con esta expresión se producen  $m$  estimaciones de los índices estacionales por cada periodo, por lo que es necesario promediar las  $m$  estimaciones,

estos índices deben ser la suma de la longitud de la estación, es decir,

Se aplicó este procedimiento a la muestra de ítems, para cada punto de venta. Ejemplos de los resultados obtenidos se muestran a continuación (figuras 1 y 2).

Estos resultados refuerzan la teoría según la cual la naturaleza del ítem y la ubicación del punto de venta son factores que influyen el comportamiento del cliente e inducen su conducta frente al momento en el cual realizar la compra, por lo que son elementos que hay que considerar en el diseño del sistema.

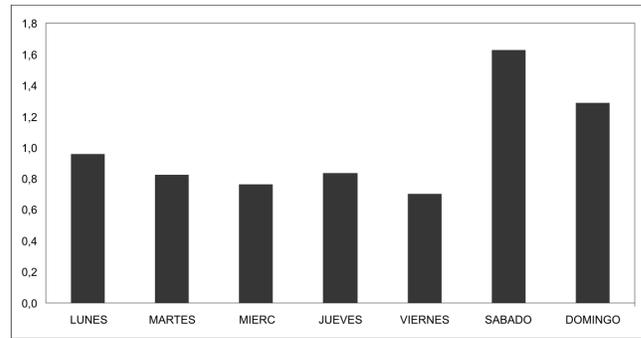


Figura 1. Índices estacionales promedio en el punto de venta 2.

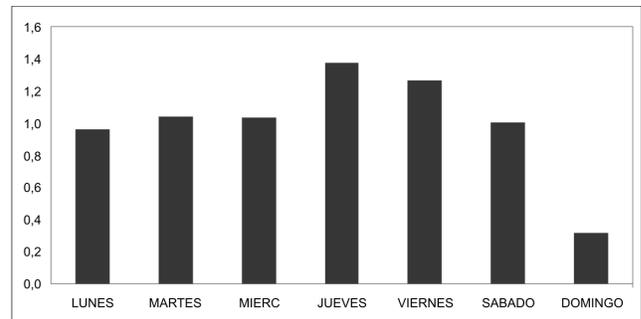


Figura 2. Índices estacionales promedio en el punto de venta 4.

### MODELO DE PRONÓSTICO DE LA DEMANDA

En el entorno actual se hace indispensable que una cadena que pretenda participar en el mercado tenga la habilidad de ajustarse rápidamente a los cambios. Una forma de lograr este propósito es a través de la estimación de factores claves para el negocio, tarea que se logra mediante la aplicación de técnicas de pronóstico; específicamente, este proyecto se centra en los pronósticos de demanda de los ítems que constituyen el catálogo de la sección de abarrotes de la empresa. La adecuada selección y aplicación de técnicas de pronóstico de demanda puede mejorar la eficiencia del uso del espacio disponible, reducir los inventarios, mejorar la flexibilidad a los cambios y disminuir costos. El objetivo es establecer el comportamiento futuro de la demanda de los ítems del catálogo de abarrotes en cada uno de los puntos de venta de la cadena. La integración de la cadena se tiene contemplada con el flujo de información en doble vía entre los puntos de venta y el sistema de

información de la empresa, así como con las personas involucradas en la gestión de los procesos relacionados.

### Modelos aplicados en el proyecto

El altísimo volumen de información que se debe manejar, más de 8000 referencias en alrededor de 30 puntos de venta con transacciones diarias, tiene implicaciones en tiempo y costo en el proceso de pronóstico; esto llevó a la decisión de utilizar modelos de series de tiempo, que generalmente son más simples que otras posibles técnicas y con los cuales se puede obtener un razonable desempeño en cuanto a errores de pronóstico. Los métodos aplicados fueron:

- Promedio móvil simple (PMS)
- Suavización exponencial simple (SES)
- Suavización exponencial doble (SED)

### Agregación de datos

Una decisión relevante en el desarrollo de un modelo de pronóstico es el nivel adecuado de agregación de la información. Esta decisión impacta de manera directa tanto en los volúmenes de información que se procesan, generan y almacenan, como en el tiempo necesario para el proceso de pronóstico. El nivel de agregación en un modelo de pronósticos debe estar de acuerdo con el nivel de toma de decisiones para el cual se desarrolla (Zotteri y Kalchschmidt, 2007). Para ello se probaron varios esquemas de agregación:

- Datos de demanda diaria, que es la forma en la cual se obtienen de los sistemas de información de la empresa.
- Agregando los datos diarios en periodos de siete días.
- Adicionando los datos diarios en periodos de quince días.
- Añadiendo los datos diarios en periodos de 30 días.

### Selección del mejor método de pronóstico

En la tabla 1 se describe la forma de evaluar cada método de pronóstico aplicado.

Los resultados obtenidos para la muestra de ítems no permitieron identificar un modelo que genere de manera consistente mejores resultados que los demás. Así, la decisión debe basarse en criterios adicionales a los errores de pronóstico. Silver et ál. (1998) proponen como criterio para escoger un modelo de pronóstico el costo total relevante esperado, y como elementos para calcular este costo, los siguientes:

- El costo de obtener el pronóstico, es decir, la infraestructura, tiempo y esfuerzo necesarios para aplicar el modelo.
- El costo debido a los errores generados por el pronóstico, es decir, el impacto de mayor incertidumbre y los posibles efectos en el inventario (excesos o faltantes).

La recomendación a la cadena es el uso de información agregada de manera semanal, ya que el volumen de

**Tabla 1**  
Optimización de parámetros para las técnicas de pronóstico utilizadas

Técnica de pronóstico	Criterio de optimización	Parámetro	Método de búsqueda	Rango de búsqueda
Promedio móvil simple	minimizar MAD	n: número de periodos móviles	Enumeración	días: 15 a 45 semanas: 3 a 10 quincenas: 2 a 12 meses: 1 a 8
Suavización exponencial simple	minimizar MAD	alfa: constante de suavización	Solver de MS Excel	0,01 < alfa < 0,3
Suavización exponencial doble	minimizar MAD	alfa: constante de suavización	Solver de MS Excel	0,01 < alfa < 0,3

transacciones diarias elevaría no sólo el tiempo computacional, sino que también aumentaría las necesidades de capacidad de almacenamiento de datos. Se recomienda igualmente realizar los pronósticos con una frecuencia semanal, sobre todo en atención a las frecuencias de despacho que van de una a tres veces por semana, dependiendo del punto de venta. Por último, se sugiere aplicar de manera inicial el modelo de suavización

exponencial simple, con lo que se garantiza un resultado aceptable en términos de desempeño, precisión e implementación, pero buscando a mediano plazo la implementación del modelo de suavización exponencial doble, principalmente en aquellos ítems en los cuales se identifique la presencia de un componente de tendencia en la demanda o los de mayor importancia.