

HARMONIC DISTORTION MINIMIZATION OF A PWM MODULATION USING GENETIC ALGORITHMS

MINIMIZACIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA DE UNA MODULACIÓN PWM USANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

Ing. Andrés Fernando Lizcano Villamizar

Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Pamplona - Norte de Santander, Colombia,
Email: aflizcano@gmail.com

MSc. Jorge Luis Díaz Rodríguez

Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Pamplona - Norte de Santander, Colombia,
Email: jdiazcu@gmail.com

PhD. Aldo Pardo García,

Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Pamplona - Norte de Santander, Colombia,
Email: apardo13@hotmail.com

RESUMEN

En este trabajo se describe una estrategia de modulación PWM optimizada por el método directo y la aplicación de Algoritmos Genéticos para la minimización del contenido armónico específicamente el quinto y séptimo armónico del contenido total, basado en la minimización de la distorsión armónica total (THD). Se expone el desarrollo del método, las pautas a tener en cuenta incluyendo el desarrollo del algoritmo, de la estrategia dentro del DSP, y visualizando los resultados obtenidos.

Palabras claves: Modulación por ancho de pulso (PWM), eliminación selectiva de armónicos (SHE), algoritmos genéticos (GA), distorsión armónica (THD).

ABSTRACT

In this work there is described a strategy of modulation PWM optimized by the direct method and the application of Genetic Algorithms for the minimization of the harmonic content specifically the fifth and the seventh harmonic of the total content, based on the minimization of the harmonic total distortion (THD). The development of the method is exposed, the guidelines to bearing in mind including the development of the algorithm of the strategy inside the DSP, and visualizing the obtained results.

Keywords: Pulse Width Modulation (PWM), Selective harmonic elimination (SHE), Genetic algorithm (GA), Total harmonic distortion (THD).

1. INTRODUCCION

La gran evolución de los procesos industriales soportados por máquinas eléctricas ha aumentado la demanda de estrategias altamente confiables para el control y funcionamiento óptimo de las mismas, es por eso, que se hace necesario estudiar e investigar diferentes procesos que permitan suplir dichas necesidades, las cuales dan origen al desarrollo de aplicaciones como la presentada a continuación. Una de las grandes motivaciones es la disminución

del consumo energético de los dispositivos, además de esto la reducción en las pérdidas de conmutación y la reducción del contenido de armónicos.

La utilización de técnicas de inteligencia artificial como los son los Algoritmos Genéticos, establecen una nueva herramienta para la optimización, a pesar de su relativa actualidad no resulta complejo su implementación, por lo que se constituye una herramientas eficiente y atractiva a la hora de solucionar un problema de optimización.

2. MODULACION PWM OPTIMIZADA

Para generar una modulación PWM optimizada se necesita de un determinado conjunto de ángulos (posiciones) de conmutación que se determinan utilizando métodos numéricos y computacionales.

El auge de los dispositivos digitales programables, tales como los Procesadores Digitales de Señales o DSP, han permitido que estas técnicas PWM puedan ser implementadas de una manera cómoda y eficiente, permitiendo así la gran evolución de las estrategias de modulación incluyendo la disminución de costos para su desarrollo.

En la fig. 1 se muestra una señal PWM optimizada por un método directo de 3 pulsos [1].

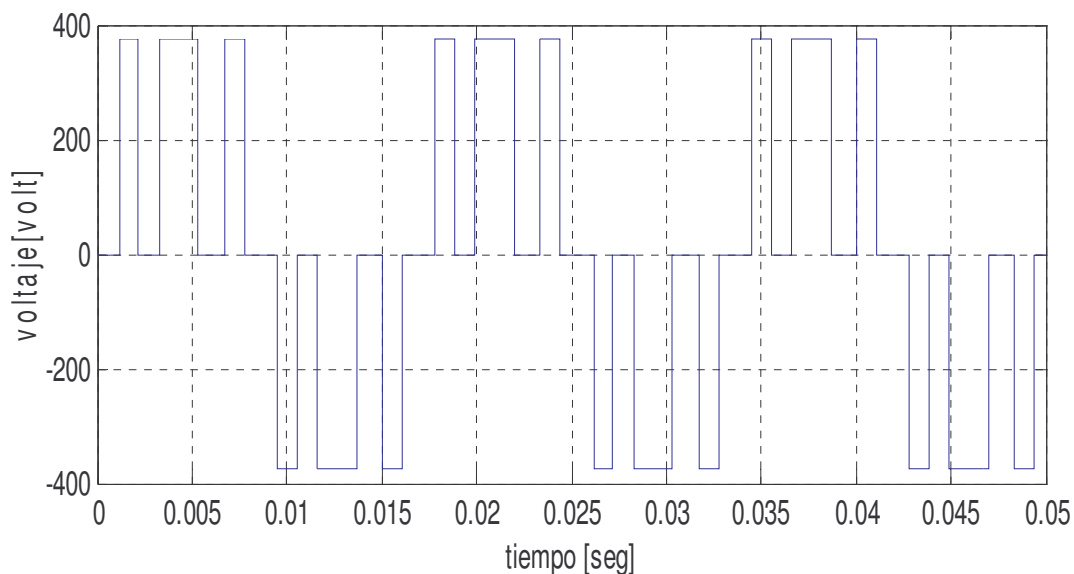


Figura 1. PWM optimizada por el método directo.

La modulación PWM optimizada presenta la ventaja de no hacer uso de una señal portadora, como el caso de la de la modulación PWM sinusoidal (SPWM), ya que el algoritmo genera internamente los ángulos de conmutación desde el dispositivo por medio de la reproducción de patrones de onda debidamente conformados, como los de la fig. 1.

A continuación se comenta el procedimiento utilizado para generar la PWM optimizada, a partir de las expresiones de desarrollo del método planteado [1, 2].

A partir de la expresión que representa la señal de referencia sinusoidal:

$$u = V_m \text{ sen } \omega t \quad (1)$$

Donde:

- u Voltaje de salida deseado
- V_m Valor máximo (Amplitud).
- ω Frecuencia angular ($\omega = 2\pi f$).
- f Frecuencia.

El área de un semiperíodo de (0 a π/ω)

$$A_{seno} = \int_0^{\pi/\omega} V_m \text{sen} \omega t \, dt = -\frac{V_m}{\omega} \cos \omega t \Big|_0^{\pi/\omega} \quad (2)$$

$$A_{seno} = \frac{2V_m}{\omega} \quad (3)$$

Esto se puede dividir en n_p intervalos de tiempo regulares como se muestra a continuación:

$$\left. \begin{array}{l} t_0 = 0 \\ t_1 = \frac{\pi}{n_p \omega} \\ t_2 = \frac{2\pi}{n_p \omega} \\ \dots \\ t_n = \frac{n_p \pi}{n_p \omega} = \frac{\pi}{\omega} \end{array} \right\} \Rightarrow t_i = \frac{i\pi}{n_p \omega} \quad i = 0, 1, 2, \dots, n_p \quad (4)$$

El área para cada uno de los intervalos esta da por:

$$A_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} V_m \text{sen} \omega t \, dt = -\frac{V_m}{\omega} \cos \omega t \Big|_{t_{i-1}}^{t_i} \quad (5)$$

$$A_i = \frac{V_m}{\omega} (\cos \omega t_{i-1} - \cos \omega t_i)$$

Conociendo el área de cada uno de los intervalos y fijando el valor máximo de la onda PWM igual a la amplitud de la señal sinusoidal, se puede determinar el ancho de los pulsos.

$$tp_i = \frac{A_i}{V_m} \quad (6)$$

Finalmente, para la conformación de la señal PMW bajo el criterio de optimización antes expuesto, se ubican cada uno de los pulsos obtenidos en el centro de cada uno de los intervalos, expresando matemáticamente este conjunto de pulsos en un plano cartesiano xy, donde el eje x corresponde con el tiempo y el eje y con la amplitud, como se muestra a continuación:

$$Pulso_i = \left\{ (x, y) \left/ \begin{array}{l} \frac{x_{i-1} + x_i}{2} - \frac{tp_i}{2} \leq x \leq \frac{x_{i-1} + x_i}{2} + \frac{tp_i}{2}, \dots \\ \dots \quad 0 \leq y \leq V_m \end{array} \right. \right\}$$

siendo $i = 0, 1, 2, \dots, n_p$

$$(7)$$

2.1 Simulación del sistema

Se hace necesario desarrollar un sistema de simulación para la validación de los resultados, con este objetivo se utiliza el Simulink® del Matlab®, para lo que implementa en un bloque la metodología antes desarrollada, este bloque es el encargado de generar de la modulación PWM optimizada en conjunto con el inversor y el sistema de cálculo y visualización de la distorsión armónica.

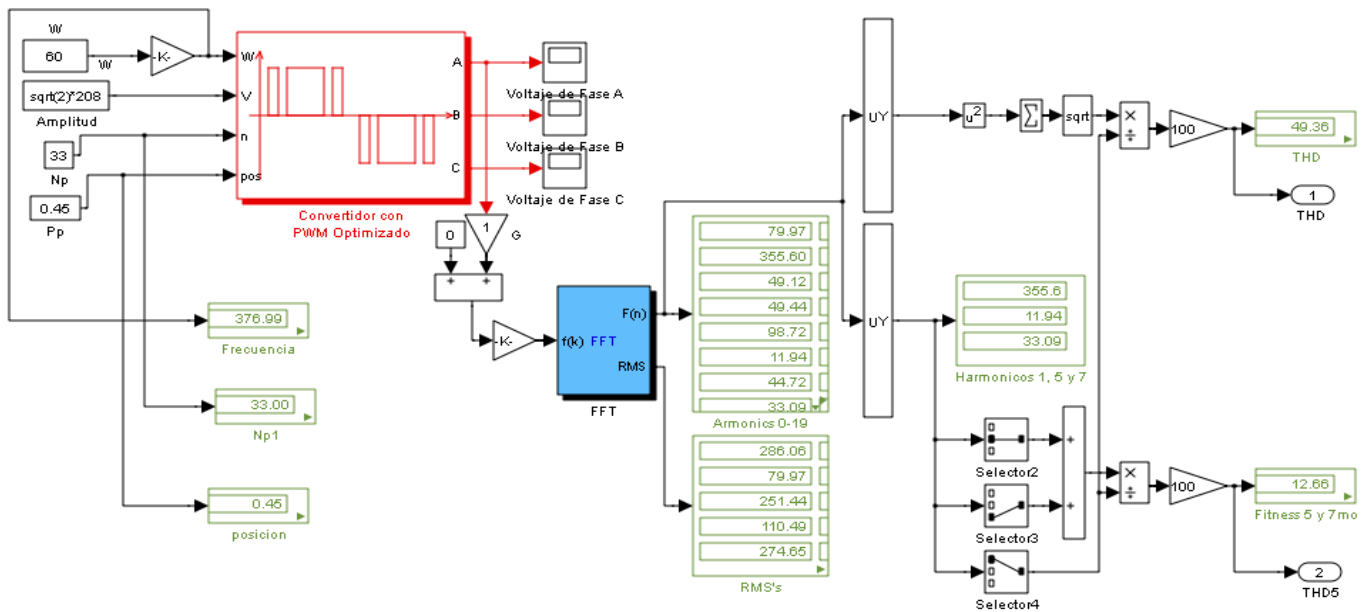


Figura. 2. Modelo en Simulink® para obtener la distorsión armónica (THD) y los armónicos 5^{to} y 7^{mo}.

En la fig. 2 se muestra el bloque de simulación correspondiente a la descripción de la modulación PWM desarrollada y el respectivo cálculo del contenido de armónicos tanto de manera gráfica como de manera numérica. Este bloque posee los siguientes parámetros: la amplitud a la que se desea trabajar, la frecuencia, el número de pulsos de conformación de la onda y además de esto una entrada que me permite generar una asimetría en la señal de salida en un rango comprendido entre -1 y 1 con respecto a un eje de referencia.

La fig. 3 muestra el resultado de la modulación para una de las fases del inversor y la siguiente muestra el espectro de armónicas para una frecuencia fundamental de 60 Hz, un número de pulsos np=33 y posición del pulso de 0.45 asimétrico con respecto al eje de referencia central.

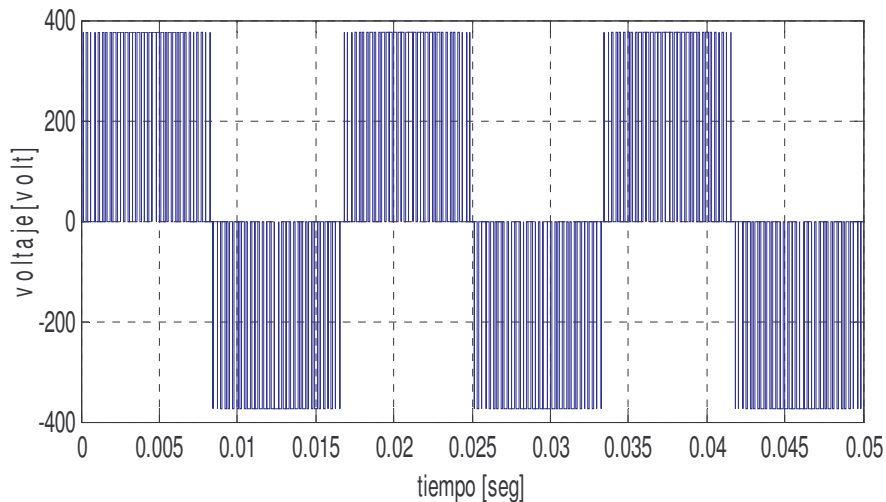


Figura 3. Modulación PWM.

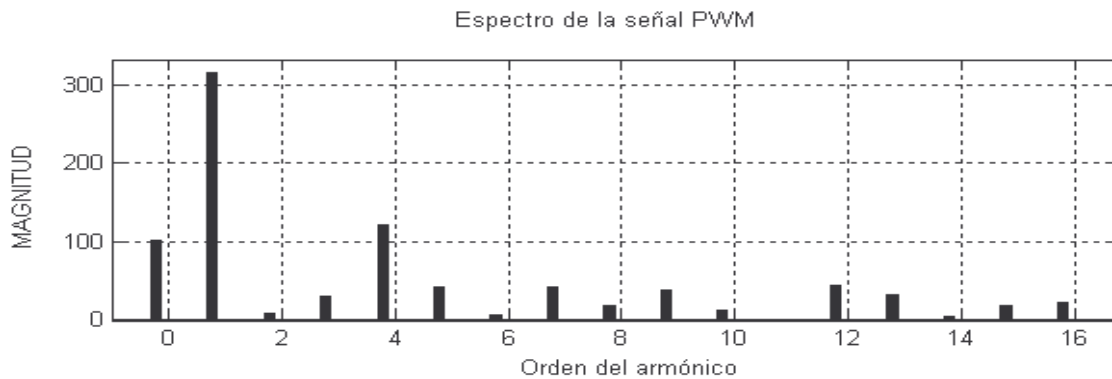


Figura 4. Análisis de armónicos para la señal PWM de salida.

Los parámetros de entrada están colocados de forma que se pueden variar de aleatoria, lo que no asegura que el sistema sea lo óptimo posible, como se puede observar el espectro de frecuencia obtenido tiene contenido armónico de componente directa, por supuesto esto no es deseado a la hora de ser implementado. Pero se observa que el quinto y séptimo armónico son bastante bajos en amplitud lo que hace que no sea del todo mala la respuesta obtenida. De manera numérica obtenemos el resultado de una distorsión armónica (THD) correspondiente al quinto y séptimo armónico igual al 23%, la cual es adecuada.

3. OPTIMIZACIÓN DE LA MODULACIÓN PWM CON ALGORITMOS GENÉTICOS

El propósito de la aplicación de Algoritmos Genéticos es la optimización de la modulación PWM, esto se logra a través de la creación de un conjunto de individuos (diferentes valores de frecuencias, número de pulsos y posición del pulso) que representan las posibles soluciones al problema en particular que se quiere optimizar y buscar la menor distorsión armónica del sistema, lo que hace que la función objetivo (fitness) a optimizar sea la distorsión armónica equivalente al quinto y séptimo armónicos de la señal PWM de salida. Cada uno de los valores del THD es sustraído de la constante α que corresponde al máximo valor de distorsión permitido estandarizado dentro del algoritmo genético [3-5]. La función objetivo está dado por:

$$F = \alpha - \frac{\sqrt{v_5^2 + v_7^2}}{v_1} \quad (8)$$

Donde:

- F Función objetivo (*fitness*).
- α Máximo valor del fitness estipulado.
- v_5 Magnitud del voltaje del 5^{to} armónico.
- v_7 Magnitud del voltaje del 7^{mo} armónico.
- v_1 Magnitud del voltaje del armónico fundamental.

En la anterior ecuación se toman solamente las magnitudes del quinto y séptimo armónico, ya que por la forma de la señal sólo se presentan armónicos impares, el tercer armónico por la conexión del motor asíncrono trifásico con neutro aislado no permite su circulación. Por lo que los armónicos más representativos (de magnitud) resultarían el quinto y séptimo armónicos, los otros armónicos por estar alejados de la frecuencia fundamental tienden a no influir considerablemente en el funcionamiento de la máquina.

La fig. 5 muestra el diagrama en bloque de la estructura del Algoritmo Genético implementado [3], como se observar de esta figura. el primer paso que se ejecuta es crear una población inicial que hace referencia a las posibles soluciones al problema, después se hace la evaluación de la función objetivo y sólo los individuos más aptos pasarán a la siguiente etapa, que es aplicarles tasas de mutación y cruce para así generar nuevos individuos con mejores características que serán evaluados de nuevo y así hasta encontrar la mejor optimización posible en 100 generaciones.

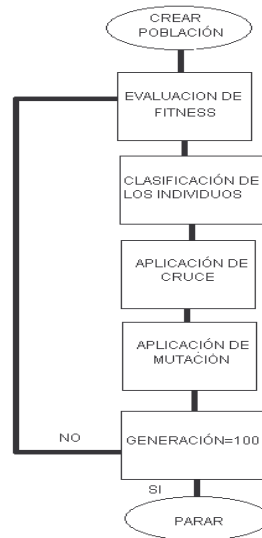


Figura 5. Diagrama del algoritmo genético empleado.

El algoritmo genético puede detenerse de dos maneras, la primera es si cumple la optimización deseada y la segunda si termina de ejecutar el número de generaciones estipuladas.

Una de las grandes ventajas de aplicar un algoritmo genético es que este asegura que así no llegue a encontrar una respuesta de error nulo si logrará al terminar su proceso dar a conocer el individuo más apto para conseguir el menor error posible.

3.1 Resultados obtenidos

A continuación se muestra una tabla con los resultados para algunas de las frecuencias cercanas a 60 Hz de estudio, donde se presentan los parámetros más aptos para la implementación de la modulación.

Tabla 1: Resultados de la optimización para frecuencias cercanas a 60 Hz

Frecuencia (Hz)	Np	Posición	THD (%)
58	129	0.9661	10.9916
59	111	0.9520	5.2787
60	15	0.3392	6.2368

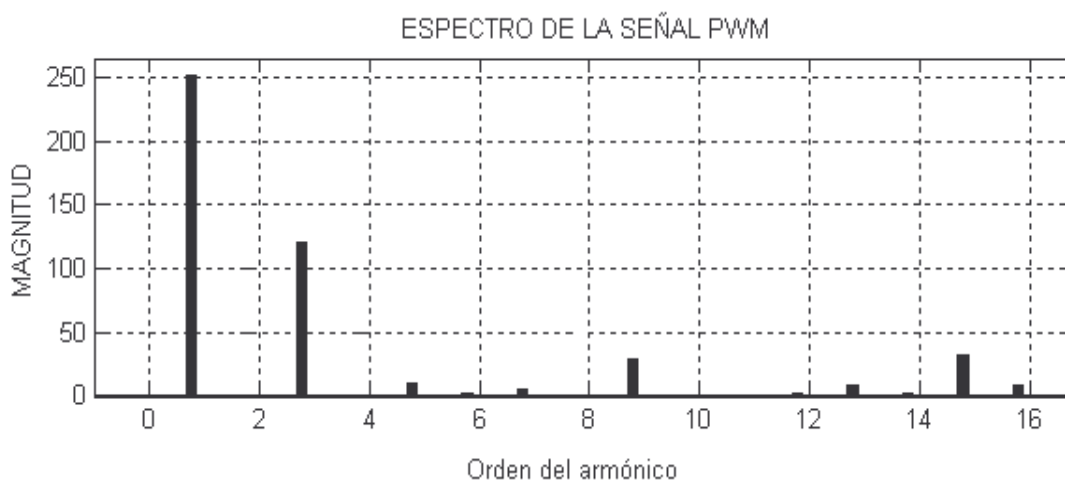


Figura 6. Espectro de la señal PWM para 60 Hz.



Figura 7. Espectro de la corriente del motor para 60 Hz.

Como se ve en la fig. 7 el resultado del algoritmo arroja el individuo óptimo para obtener la menor distorsión posible a esta frecuencia, se observa como el armónico fundamental casi está en su máximo valor, se observa la disminución del quinto y séptimo armónico de una manera considerable y de igual forma la no existencia de armónicos pares. Con el espectro de la señal de corriente se obtiene un porcentaje de distorsión armónica inferior al 1 %.

4. IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRATEGIA EN EL DSP 56F801

Como dispositivo de control se utilizó un procesador digital de señales DSP 56F801 de FREESCALE de punto flotante, ya que en comparación con otro dispositivo, como un microcontrolador, posee mucha más capacidad de cálculo y almacenamiento de memoria; para la implementación de la estrategia se optó por realizar los cálculos dentro del mismo algoritmo del DSP, la fig. 8 muestra un diagrama en bloques del sistema implementado.

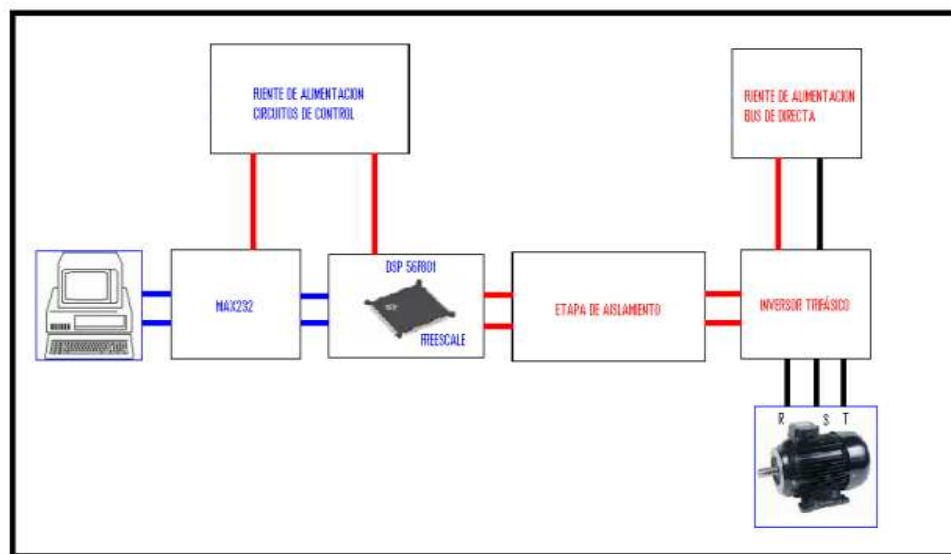


Figura 8. Esquema de la implementación de la estrategia de modulación en el DSP.

Este diagrama nos muestra que los datos, como son el número de pulsos, la frecuencia de trabajo y la posición del pulso, son enviadas desde una interfaz gráfica (PC) hasta el DSP que captura estos datos los procesa y genera las señales de control que irán hacia el inversor trifásico al cual se conecta el motor trifásico a controlar.

En la fig. 9 se observan las señales de control generadas por el DSP y tomadas con el osciloscopio.



Figura 9. Señales de la modulación PWM optimizada generadas con el DSP para un $n_p=4$.

En las fig. 10 y 11 se muestran las seis señales de control que van hacia el inversor, se encuentran las tres señales de activación de la parte alta del puente y las tres señales de activación de la parte baja y desfasadas 120° entre sí.



Figura 10. Señales de la modulación PWM optimizada generadas con el DSP para un $n_p=5$.



Figura 11. Señales de la modulación PWM optimizada generadas con el DSP para un $n_p=15$.

A continuación se muestra el circuito encargado de generar dichas señales.

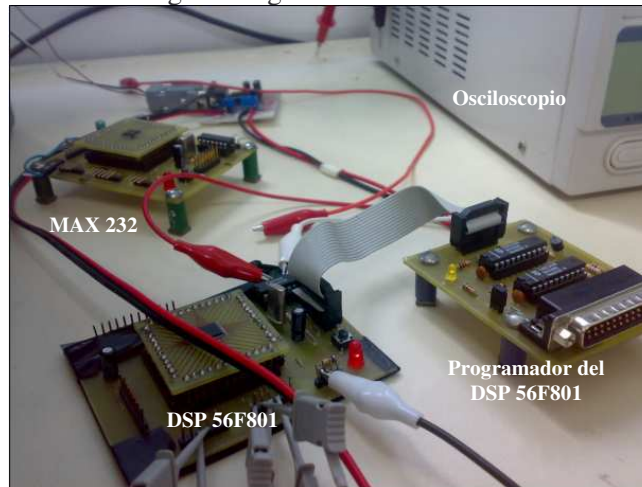


Figura. 12. Circuito correspondiente al Procesador Digital de Señales DSP 56F801.

Como se observa en la fig. 12, el sistema está compuesto por el procesador digital de señales DSP, el programador del mismo el circuito de adaptación de niveles TTL a RS232, construido a partir de un MAX232 y el osciloscopio para registrar las formas de ondas, el sistema empieza a funcionar cuando a través de la interfaz gráfica se envían los datos hacia el DSP que almacena las formas de ondas PWM resultado del proceso de optimización y realiza la construcción y conformación de la modulación cuyas salidas de esta son visualizadas en el osciloscopio (ver Fig.9, Fig.10 y Fig.11).

5. CALIDAD DE LA ENERGÍA

El término calidad de energía esta relacionado con el cumplimiento de especificaciones de diseño de los equipos de uso final, cuando la magnitud de la tensión y de la frecuencia suministrada, así como la forma de onda de la tensión, es la adecuada. La energía entregada debe estar libre de problemas de estabilidad, continuidad y deterioro de la forma de onda [6], de lo contrario los equipos no funcionan como se espera y pueden resultar afectados.

Al diseñar una estrategia PWM que brinde las mejores condiciones en cuanto a disminución de la distorsión armónica se asegura la entrega de una señal adecuada la cual brindará las mejores características de trabajo a la máquina eléctrica o dispositivo que se conecte, lo que se contribuye directamente a la calidad de la energía.

Con la motivación anterior, la estrategia PWM que se plantea en este trabajo aborda a lo largo de su desarrollo a un objetivo explícito: la optimización de la distorsión armónica.

El desarrollo de esta estrategia de modulación PWM con bajo contenido de armónicos genera una gran confiabilidad a la hora de evaluar la calidad de energía entregada por el inversor, permitiendo establecer con esta modulación una magnitud de eficiencia mayor en función de la menor distorsión armónica generada.

6. CONCLUSIONES

Los algoritmos genéticos son estrategias eficientes y robustas para la solución de problemas no triviales que contribuyen en gran medida a la optimización de diferentes procesos donde son requeridos. Gracias a la utilización de estas técnicas se han podido encontrar las mejores condiciones de trabajo para los diferentes barridos de frecuencia donde se trabaja la modulación PWM y llega a inferirse que la modulación obtenida es óptima posible. Al optimizar la señal de modulación PWM directamente se optimiza la distorsión armónica de la señal de corriente del motor en un porcentaje bastante aceptable para la máquina.

Al finalizar el proceso de selección mediante Algoritmos Genéticos, se establecieron los individuos más aptos para encontrar la menor distorsión armónica posible entregada por el inversor a nivel del quinto y séptimo armónico.

A la hora de realizar la implementar la estrategia de modulación en un procesador digital de señales DSP se observa claramente las grandes capacidades de cálculo y desarrollo de estrategias que impliquen proceso complejos y de alto consumo de recursos de memoria que este dispositivo puede suplir con facilidad.

El desarrollo del Algoritmo Genético se hace de manera offline debido a que estas estrategias de inteligencia artificial se caracterizan por su extenso tiempo de generación y alto consumo de recursos de memoria, por lo cual los individuos más aptos son obtenidos a nivel de simulación del algoritmo y entonces programados al DSP.

En los análisis de los resultados a nivel de modulación se muestra un excelente aprovechamiento de los parámetros como son tensión, corriente y forma de onda, resultando lo más importante que los niveles de distorsión armónica entregados hacia la máquina son minimizados, obteniendo el funcionamiento eficiente del conjunto inversor-motor.

REFERENCIAS

- [1]. A. Pardo y J. L. Díaz. *Aplicaciones de los convertidores de frecuencia, Estrategias PWM*. Editorial Java E. U., Colombia, 2004.
- [2]. J. L. Díaz, A. Pardo y E. Y. Ríos. “Implementación de una modulación PWM optimizada para el control de un motor trifásico de inducción usando la tarjeta DSP TMS320C6416 DSK”, *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, Vol. 1, No. 13, 2009.
- [3]. Justus Rabi, B. “Minimization of Harmonics in PWM inverters based on Genetic Algorithms”. *Journal of Applied Sciences* 6 (9): 2056-2059, 2006.
- [4]. K. L. Shi and H. Li. “Optimized random PWM strategy based on Genetic algorithms”, *IEEE Trans. Mag.* Vol. 33, pp. 07-11, 2003.
- [5]. N. Tutkun. “A new modulation approach to decrease total harmonic distortion of the SPWM voltage waveform using genetic optimization technique”. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'08)*, Palacio de la Magdalena de Santander, 12-14 de Marzo de 2008.
- [6]. G. Carrillo, *et al.* “Caracterización, compensación y medición de un sistema de distribución de energía eléctrica con alta polución armónica”. *Primer Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica Bogotá*, Noviembre 2001.

Autorización y Renuncia

Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en los procedimientos de la conferencia. LACCEI o los editors no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito

Authorization and Disclaimer

Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.