

# Relevamiento de tecnologías de control para manejo de motores de imán permanente de aplicación en robótica industrial

Leandro H. Jaimes Soria, Alejandro J. Martínez, Nahuel O. Nieva  
 Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas  
 Universidad Nacional de La Matanza  
 San Justo, Buenos Aires, Rep. Argentina  
 gilp@unlam.edu.ar

**Resumen** – El presente documento resume un estudio comparativo de diversas tecnologías que posibilitan el procesamiento digital en tiempo real de datos de alta densidad, permitiendo obtener soluciones más eficientes a problemas como el control de motores trifásicos de alta precisión. El mismo se desarrolla dentro del ámbito de la Universidad Nacional de La Matanza, como parte de un proyecto de investigación cuyo objetivo es el desarrollo de un brazo robótico de alta eficiencia y bajo costo.

**Palabras clave**— *Motor de imán permanente; procesamiento de señales; eficiencia de control; selección de controlador.*

## I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo es una etapa inicial de un proyecto de investigación y desarrollo, cuyo objetivo es el diseño de un sistema de control para un motor de imán permanente. El motor controlado será parte esencial de un brazo robótico industrial. Este proyecto se encuentra actualmente en estado de desarrollo dentro del programa PROINCE implementado en la Universidad Nacional de La Matanza.

Es importante destacar que en la actualidad los robots industriales de este tipo son las herramientas más flexibles y potentes disponibles. Para fines prácticos de estudio este dispositivo se puede separar en dos unidades principales: un conjunto electromecánico y un sistema de control, siendo este último, básicamente, el objeto del presente trabajo.

Para realizar un adecuado sistema de control de motor es necesario conocer en detalle el comportamiento de las variables implicadas (por ejemplo, variaciones de los campos magnéticos internos), además de los dispositivos necesarios para medirlas y modificarlas de manera eficiente. De esta manera, el informe comenzará con la descripción del motor seleccionado y sus técnicas de control, continuando con un análisis de los dispositivos que cumplen con las exigencias del algoritmo a emplear. Por último, se concluirá con un relevamiento de las alternativas tecnológicas que los fabricantes brindan actualmente en el mercado.

## II. MOTOR SINCRÓNICO DE IMÁN PERMANENTE

A través de un análisis detallado de los diferentes tipos de motores disponibles en el mercado (motor CC sin escobillas, motor CA de inducción, etc.), se determinó que el tipo de

motor más apropiado para dar movilidad a un brazo robot industrial es un **motor sincrónico de imán permanente** (PMSM). Su selección se debe a que tiene numerosas ventajas con respecto a otras máquinas que se utilizan habitualmente en servomecanismos: tiene una mayor relación torque-inercia y potencia desarrollada, en comparación con un motor de inducción o un motor sincrónico de rotor bobinado, lo que lo hace adecuado para determinadas aplicaciones de elevada performance como la robótica [1]. Además, es posible lograr un control apropiado de posición y una rotación suave sin perturbaciones de torque.

Un PMSM es una máquina eléctrica rotativa con un estator tradicional de tres fases pero con un rotor compuesto por imanes permanentes. La utilización de un rotor de estas características produce **un flujo magnético sustancial del entrehierro, lo que posibilita el diseño de motores de gran eficiencia**. La Figura 1 muestra una descripción de los componentes principales del motor.

En cuanto a las características constructivas, un importante criterio distintivo es la ubicación de los imanes. Los PMSM con imanes interiores o incrustados, llamados IPMSM (Interior-PMSM), tienen una densidad de campo magnético más elevada que aquellos con imanes montados en la superficie (Surface-PMSM), representando así el estándar en aplicaciones industriales hasta el momento. Esta ventaja se puede atribuir a reluctancias fuertemente asimétricas en los IPMSM, que hacen, sin embargo, que el modelado y el diseño del control sea más complejo.

### A. Principio de Funcionamiento

Un PMSM se controla por medio de tensiones sinusoidales vinculadas a la posición del rotor en cada momento. El flujo del estator en conjunto con el flujo del rotor

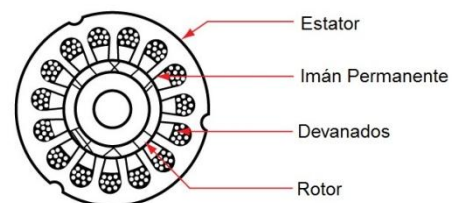


Figura 1. Principales componentes de un motor PMSM.

(que se genera por medio de un imán) definen el torque y por lo tanto la velocidad de rotación del eje. Por esta razón, las tensiones sinusoidales deben ser aplicadas a los devanados de forma tal que el ángulo entre el flujo del estator y del rotor sea cercano a  $90^\circ$ , pues de esta manera se consigue generar un torque máximo. Para cumplir con este criterio, el motor requiere de lógica electrónica para su correcto funcionamiento.

Para operar este tipo de motores se suele utilizar una etapa inversora de potencia estándar de tres fases. Dicha etapa emplea seis transistores de potencia de conmutación independiente, los cuales se conmutan en modo complementario. Por otro lado, las tensiones sinusoidales aplicadas a la etapa de potencia se generan con un controlador apropiado, el que se detallará en el siguiente apartado.

Por último, se analizaron las opciones de motores de imán permanente comercializados por los siguientes fabricantes: Yaskawa, Teco, Elmo, Spinea y Wittenstein. Evaluando factores tales como potencia, rendimiento, disponibilidad, peso, entre otros, se optó por la utilización de motores de las firmas Yaskawa y Elmo. De esta manera, se desarrollará un análisis comparativo de las propiedades y características de cada motor provisto por ambos fabricantes a utilizar en el brazo robot en secciones específicas tales como la articulación de muñeca. A título de ejemplo se incluyen algunas especificaciones en cuanto al motor a emplear en el movimiento rotacional de la muñeca (Tabla 1)

### III. REQUERIMIENTOS TECNOLÓGICOS DE CONTROL

Para realizar el control de un motor se deberán tomar en cuenta los atributos del mismo como también el nivel de precisión que se desea obtener en las variables de salida. Un primer método, utilizado principalmente en motores de corriente continua, es el método conocido como de control escalar. Esta técnica utiliza como medio de control una variación lineal de tensión y frecuencia de la señal de alimentación, sin medir ninguna variable en el motor (método sin realimentación).

Sin embargo, al intentar su aplicación en el campo de los motores de corriente alterna, la simple técnica de control escalar no es útil si se requiere de un desempeño óptimo. Para lograr este objetivo se debe recurrir a algoritmos de control más sofisticados, los cuales se basan en un análisis exhaustivo de las características físicas del motor. Entre estos se pueden nombrar el control directo de torque (DTC), basado en estimaciones de torque a partir de la medición de tensiones y corrientes, y el control vectorial (FOC), en el que se tienen como entrada las mismas variables medidas pero el tratamiento matemático realizado es distinto (ambas técnicas son analizadas en [2]). Aunque la técnica de DTC resulta más simple de implementar, presenta perturbaciones de torque y de corriente que no son deseables en aplicaciones industriales. Por lo tanto, se considerará como adecuada la técnica de FOC debido a las mejores prestaciones que provee.

Características	Yaskawa (SGMCS-05B)	Elmo (SA01ACN)
Potencia Nominal (W)	105	105
Torque Nominal (N.m)	5,0	0,32
Corriente Nominal (ARMS)	1,7	1,4
Máx. Velocidad (rpm)	500	3000
Peso del Motor (Kg)	5,8	0,52

Tabla 1. Tabla de motores de imán permanente

#### A. Control Vectorial

Es preciso aclarar que esta técnica opera de manera directa sólo sobre el torque generado; para mantener fija la velocidad se requerirá de un lazo interno de control, independientemente de la técnica bajo estudio. Sin embargo, la implementación de este algoritmo permite la operación de los PMSM a velocidades bajas sin que se generen perturbaciones en el torque.

El control vectorial, ilustrado a través del esquema de la Figura 2, se basa en el análisis de los campos magnéticos que se generan dentro del motor, por lo que hay una relación directa entre el torque que es capaz de producir el motor y el ángulo que se genera entre los campos magnéticos del estator y del rotor. Al girar el rotor, su campo también lo hace, por lo que el ángulo antes mencionado estará variando permanentemente, al igual que el torque. Para evitar este fenómeno, se busca la generación en el estator de un campo magnético giratorio que siga la rotación del campo del rotor, con el fin de mantener constante el ángulo entre ambos. Este efecto se logra independientemente de la velocidad de rotación, lo que le otorga al algoritmo el excelente rendimiento que posee a bajas velocidades.

Para el análisis vectorial de los campos se parte de un sistema en el cual se representan las corrientes medidas en el estator ( $i_a, i_b, i_c$ ) en un marco de referencia de tres ejes y luego, mediante las transformadas de Clark ( $i_\alpha, i_\beta$ ) y de Park ( $i_d, i_q$ ) (Figura 3), se obtiene un sistema rotacional de dos ejes, cuyos valores son lineales.

Este último está orientado respecto a la posición del rotor, la que puede medirse mediante las corrientes antes mencionadas, o estimarse a partir de las corrientes de salida de la transformada de Clark. Cada eje de este nuevo sistema permite controlar independientemente torque y flujo magnético.

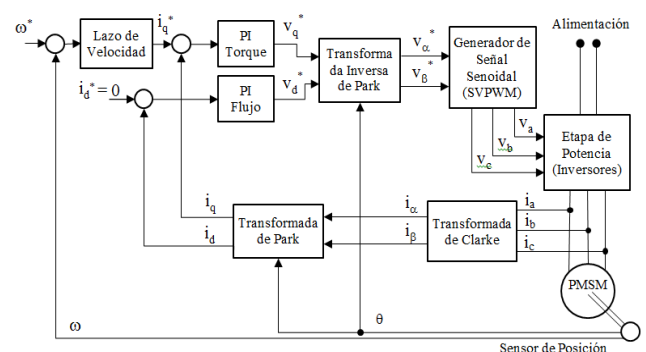


Figura 2. Diagrama en bloques de control de PMSM

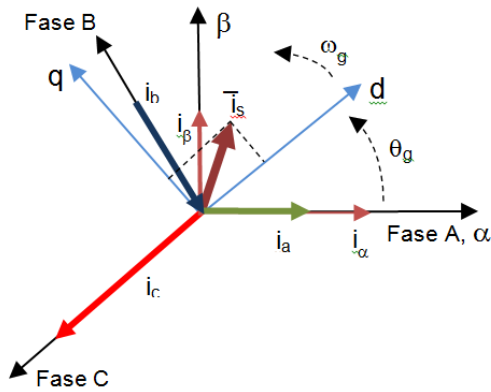


Figura 3. Sistemas vectoriales de referencia de Clark y Park

Una vez utilizado el sistema rotacional para el control se deben obtener las señales de error, que surgen del proceso de transformación inverso (anti-transformadas de Clark y Park), las cuales proveerán los valores de los ciclos de actividad de las diferentes señales PWM, generadas por un controlador digital, que se inyectan en cada bobinado del estator. De aquí el proceso se inicia nuevamente, lo que demuestra que es altamente dinámico y exigente en cuanto a requerimientos de procesamiento.

En resumen, las ventajas de la utilización del Control Vectorial son:

- Transformación de un sistema alterno complejo en uno lineal mucho más simple, con variables de interés independientes entre sí, similar a lo que sucede en motores de corriente continua.
- Rápida respuesta a perturbaciones, sumado a un performance estable y altamente eficiente.
- Elevado torque de arranque, sin generación de un pico excesivo de corriente.
- Amplio rango de velocidades de operación.

#### B. Requisitos de Aplicación

La técnica antes explicada se aplica a los PMSM con el fin de obtener un amplio ancho de banda de respuesta en cuanto a torque generado. Por lo tanto, el procesador que se encargue del control debe ser lo suficientemente potente como para poder implementar algoritmos de procesamiento matemático intensivo. Para lograrlo, han de adoptarse controladores digitales que posean una velocidad de procesamiento entre 32 a 60 MIPS, lo que permitirá asegurar las condiciones necesarias para la aplicación.

Además, debido a la importancia del lazo de control de corriente, el cual maneja el torque electromecánico, se debe garantizar que su procesamiento no disminuirá el desempeño del algoritmo. Por esto, se busca que el lazo de control sea lo suficientemente rápido para alcanzar el torque deseado en el menor tiempo posible [3]. Ésta velocidad está estrechamente relacionada con el tiempo de conversión, la resolución y el ancho de banda de los canales de ADC que posee el controlador. En la práctica la utilización de dispositivos con tiempos de conversión menores a 1  $\mu$ seg y resoluciones de 10 bits son suficientes para asegurar el cumplimiento de lo requerido.

Otro factor clave consiste en la inclusión de una unidad generadora de señales PWM de alta resolución, con el fin de aportar al sistema de una gran sensibilidad en cuanto al torque generado. Además, al ser necesaria la utilización de etapas inversoras entre el controlador y el equipo, es necesaria la inclusión de tiempos de retardo configurables para evitar posibles cortocircuitos en la etapa de salida.

A lo dicho anteriormente se pueden agregar varias funciones adicionales como puede ser la sincronización entre los módulos de ADC y los PWM, propiedad que posibilita métodos más baratos de sensado de corriente, como la utilización de resistores tipo shunt con tiempos de actividad específicos. Otra característica deseable para eliminar retardos en la medición de corriente es la capacidad de capturar de manera simultánea señales múltiples a través de los módulos de ADC.

La sincronización entre la magnetización del estator y el imán del rotor es también un factor relevante. Conocer la posición de este último es crítico para la implementación del control vectorial, por lo que la utilización de **interfaces codificadoras de cuadratura** (QEI) montados sobre el eje del motor es habitual en aplicaciones industriales de control [4]. En resumen, es necesario un módulo QEI como entrada del sistema para determinar la posición, absoluta o relativa, del rotor, dato que será usado por el lazo de control.

También es necesario darle al sistema herramientas para comunicarse con el mundo exterior, tanto para enviar datos como para recibir órdenes de un dispositivo maestro; esto aumentará la seguridad y la confiabilidad que posea la aplicación. Es por eso que los dispositivos de control han de poseer interfaces de comunicación de alta velocidad.

En base a los requerimientos mencionados, en el próximo apartado se realizará la búsqueda del dispositivo más conveniente que reúna todas estas características y además que sean económicos y versátiles.

#### IV. RELEVAMIENTO DE TECNOLOGÍAS

Respecto a las tecnologías existentes aplicadas al control de motores, se encuentra un amplio rango de dispositivos que cumplen con las condiciones de ser rápidos, potentes, de bajo costo y capaces de hacer frente a los problemas de seguridad del personal y de equipamientos. Por lo tanto, este apartado se centrará en la descripción de las alternativas que cuentan con la posibilidad de ser programadas en forma estructurada (en lenguaje C) para compararlas y poder determinar cuál es la más apropiada para alcanzar la meta de control deseada.

Para iniciar esta labor, se comenzará describiendo a los Procesadores Digitales de Señales (DSP, por sus siglas en inglés) como una de las primeras soluciones para lograr el control eficiente de motores. Este tipo de tecnología provee la mayor potencia de procesamiento de datos, pero suelen ser costosos y generalmente requieren de la adición de componentes externos, lo cual aumenta el volumen del sistema y la probabilidad de fallos. Otra alternativa son los Microcontroladores (MCU), dispositivos especializados en diferentes campos de aplicación, pero cuya capacidad de realizar operaciones en tiempo real es más limitada.

Es importante resaltar que en el momento en que fueron desarrolladas estas tecnologías, se podía apreciar de manera

exacta la diferencia entre DSP y MCU, pero con los avances tecnológicos actuales se ha reducido la brecha entre estos grupos, relacionándolos de manera muy estrecha. Esto se debe, principalmente, al esfuerzo de los fabricantes en desarrollar dispositivos que integren tanto la capacidad de procesamiento de los DSPs como la riqueza de periféricos de los MCUs, buscando un aumento en la versatilidad de sus productos. Como consecuencia, no existe en el mercado una norma o estándar de denominación que separe los términos, dejando la nomenclatura de las tecnologías incorporadas en el circuito integrado a la discrecionalidad de los fabricantes. Sin embargo, en el presente informe se utilizarán los términos DSP y MCU como un conjunto de características aisladas por una cuestión didáctica y de fácil comprensión.

Bajo ambos conceptos se desarrollan los Controladores Digitales de Señales (DSC), híbridos que combinan una amplia variedad de interfaces de control, junto con un gran poder de procesamiento, lo que los hace ideales para aplicaciones de control de motores.

#### A. Procesadores Digitales de Señal (DSPs)

Los DSPs reúnen un conjunto de características que los convierten en dispositivos eficientes para su utilización en aplicaciones que manipulan una gran cantidad de datos tales como el procesamiento de imágenes y de voz, entre otras. Esta tecnología se caracteriza por utilizar una arquitectura Harvard modificada que cuenta con espacios de memorias y buses separados para datos y para programas. Este atributo y la adición de un hardware multiplicador que realiza una operación por ciclo del dispositivo, aumentan significativamente la velocidad de procesamiento.

La arquitectura de los DSPs se complementa con diversas características implementadas por hardware, accesibles a través del set de instrucciones del dispositivo, como módulos de direccionamiento, operaciones aritméticas especiales (como la transformada rápida de Fourier), lazos de control especiales para ejecutar varias instrucciones seguidas, entre otras, las cuales brindan ciertas facilidades al momento de programarlas y de utilizarlas.

Sin embargo, esta tecnología carece de periféricos orientados a control como son los módulos ADC, DAC, PWM u otros dispositivos que resultan útiles al implementar aplicaciones de control a través de sensores. Por lo tanto, es evidente que ésta tecnología necesita de hardware adicional para poder trabajar, lo que vuelve al sistema menos robusto y confiable para tareas específicas, de manera que conviene recurrir a otros dispositivos de control integrados.

#### B. Microcontroladores (MCU)

Los microcontroladores se utilizan tradicionalmente para aplicaciones de control e interfaz en las cuales es más importante la simplicidad del diseño que la velocidad de operación. Muchos de estos dispositivos emplean una arquitectura Von Neumann, que utiliza un espacio de memoria compartido tanto para instrucciones como para datos. Los principales bloques de hardware contenidos en un microcontrolador incluyen:

- ROM, EPROM, EEPROM o memoria flash para almacenamiento de programas y parámetros de operación.
- Interfaces de comunicación serial como: UART, I<sup>2</sup>C, SCI, CAN, etc.

- Periféricos tales como temporizadores, contadores de eventos, salidas PWM y módulos *watchdog*.
- Conversores analógico a digital (ADC) y conversores digital a analógico (DAC).
- Herramientas incorporadas de apoyo para depuración.

Es importante destacar que los microcontroladores son dispositivos con múltiples funciones que además disponen de diversos tipos de interfaces para conectarse con el contexto externo, lo que los provee de una gran capacidad de control en diversas aplicaciones. Con ellos es posible obtener soluciones óptimas en cuanto a procesamiento de señales, pero se debe remarcar que la arquitectura de un MCU no está optimizada para este fin. Esto implica que para aplicaciones que requieren cálculo intensivo y procesamiento avanzado de señales, se deben utilizar rutinas de software complejas, manipulación de grandes cantidades de datos y una mayor cantidad de ciclos de máquina en las operaciones, lo que reduce la eficiencia y la confiabilidad del sistema. Por lo tanto, estos dispositivos no serán tenidos en cuenta, ya que se optará por una solución que permita una óptima adaptación y utilización tanto de software como de hardware con el fin de obtener el mejor desempeño de la aplicación en cuestión.

#### C. Controlador Digital de Señal (DSC)

Un Controlador Digital de Señales (DSC, por sus siglas en inglés), es un dispositivo híbrido que integra los conceptos antes mencionados: MCU y DSP. De esta manera, un DSC combina las características más notables de ambos para lograr la mejor solución que resulte en una gran potencia de procesamiento de señal, facilidad de programación y menor espacio dentro del circuito.

Algunas características heredadas de los MCU son: respuesta rápida a interrupciones, periféricos orientados al control, amplia gama de periféricos de comunicación y programación sencilla en lenguaje C. Por otro lado, esta tecnología incorpora de los DSPs, módulos especializados de hardware tales como: unidad de multiplicación-acumulación (MAC), *barrel shifters*, módulos *Single Instruction Multiple Data* (SIMD) y acumuladores de mayor capacidad para operandos. Ambos, DSC y DSP, frecuentemente presentan como característica en común una arquitectura Harvard. [5]

La ventaja más relevante de esta arquitectura viene dada por sus múltiples vías de datos para flujo tanto de instrucciones como de operandos. Esto permite tener instrucciones conformadas con palabras de mayor cantidad de bits y un amplio set de instrucciones tipo CISC, pero manteniendo a la vez un ciclo de búsqueda y ejecución simple, característico de la arquitectura RISC.

Los buses de datos separados y el largo de palabras empleados reducen el número de ciclos utilizados en la búsqueda de instrucciones. Además, este tipo de palabras mejoran la codificación del conjunto de instrucciones, reduciendo el tamaño del código compilado en C. Así, la arquitectura Harvard permite la unión de los mejores atributos de RISC y CISC.

Por lo descrito anteriormente, se evidencia que en un DSC se incorporan todas las características requeridas para el algoritmo de control necesario para el PMSM, por lo que este dispositivo será utilizado en el presente proyecto.

## V. OTRA CONSIDERACIÓN: PUNTO FIJO Y PUNTO FLOTANTE

Es importante tener en cuenta esta característica al momento de seleccionar un controlador debido a que de ello depende la manera con la que se tratan los datos. En ausencia de una unidad de cálculo en punto flotante (FPU), las funciones de cálculo deberán ser resueltas utilizando subrutinas de software llamadas bibliotecas de punto flotante. Muchas veces se pueden lograr soluciones aceptables utilizando bibliotecas de punto flotante, a pesar de que el hardware no esté preparado para dicho fin. El análisis a realizar deberá definir la necesidad o no de la utilización de cálculo en punto flotante.

La mayoría de los controladores de 32 bits, ya sea con punto fijo o flotante, están diseñados para llevar a cabo cálculos de alta velocidad necesarios para el procesamiento de señales en tiempo real. Ambos cuentan con una alta integración del sistema a nivel de chip además de incluir una variedad de periféricos de alta velocidad para garantizar un procesamiento rápido y flexibilidad de diseño. Por otro lado, los DSCs que incorporan FPU tienen dos características principales: un rango dinámico de representación más extenso y la capacidad de realizar operaciones con números reales a mayor velocidad. Estos factores permiten obtener una mejor performance y una simplificación en cuanto al desarrollo de software para aplicaciones embebidas (como el control de motores), en comparación con un procesador que utilice aritmética de punto fijo. Así, a partir de [6], se puede determinar que un mayor rango dinámico es especialmente importante en procesamiento de conjuntos de datos extremadamente largos o conjuntos en los que el rango puede llegar a ser impredecible [7].

Además de las consideraciones de rango dinámico y precisión que típicamente definen el criterio utilizado por diseñadores para determinar si un procesador con punto flotante o punto fijo son adecuados para una aplicación, se debe tener en cuenta el hecho de que la disponibilidad de instrucciones de punto flotante simplifica la escritura y reduce el tiempo de ejecución del código compilado. Por lo tanto, no implementar FPU en un controlador generalmente produce un aumento del tiempo de desarrollo de una aplicación debido a la manipulación de datos adicionales que se debe realizar para compensar errores de cuantificación.

En base a la meta de control deseada, (el desarrollo de un controlador para motores de imán permanente) (PMSM) y teniendo en cuenta además los algoritmos avanzados involucrados en la técnica de control seleccionada (FOC), es evidente que el agregado de FPU permite algoritmos de cómputo más avanzados que ayudan a mejorar la eficiencia en el control del motor. Asimismo, la representación interna de decimales y el amplio rango numérico implica que las operaciones como la multiplicación, la división y las funciones trigonométricas (muy comunes en este tipo de algoritmos para control de motores), puedan ser llevadas a cabo de manera más eficiente a través del uso de los valores de punto flotante.

## VI. RELEVAMIENTO DE PROVEEDORES Y SUS FAMILIAS DE COMPONENTES

Una vez realizado el análisis de los diversos tipos de tecnología disponibles para el área de control de motores, se

procederá a mostrar un estudio de las características antes mencionadas y su implementación por parte de diversos fabricantes, ya que no todos lo hacen de la misma manera. En este punto se considerará como una característica ponderable la cantidad de notas de aplicación que existen para cada familia ofrecida, pues es una forma de conocer el servicio de soporte técnico con el que cuenta el producto y la cantidad de desarrollo con respecto a la aplicación en cuestión.

Por todo lo anterior, se realizó un relevamiento de los productos ofrecidos por algunos de los principales proveedores de tecnología en el mercado, con un enfoque a Freescale Semiconductor y Texas Instruments en particular. Se debe destacar que las familias provistas por los fabricantes Microchip, Atmel e Infineon fueron analizadas y posteriormente descartadas debido a la falta de disponibilidad de notas de aplicación, bibliotecas para control de motores y hardware de evaluación por parte de dichos proveedores.

Los dispositivos analizados fueron seleccionados en base a características específicas desarrolladas para servo-aplicaciones tales como arquitectura del núcleo, integración de periféricos e incluso unidades especiales como FPU y MAC.

### A. Freescale Semiconductor

En esta primer selección se desestimaron los dispositivos basados en Power Architecture® a causa de la carencia de bibliotecas para el control de motores desarrolladas para esta familia y debido también a su poderosa arquitectura de núcleo y su extenso set de periféricos, los cuales exceden los requerimientos del desarrollo planteados previamente. Asimismo, las familias de microcontroladores basadas en núcleos de 8 bits, como HCS08/RS08, y los DSC de 16 bits como las 56F800/56F8300/56F8000 no fueron tomadas en cuenta debido a su baja velocidad de procesamiento y adquisición de señales, e incluso debido a su bajo nivel de integración de periféricos y unidades de hardware para implementación de sistemas de control de motores. De esta manera, el relevamiento se limitó a las siguientes tecnologías:

- 
- Familia **MC56F84xxx** basado en núcleo 56800EX (DSC de 32-bits),
- **ColdFire** portfolio (32-bit MCUs),
- **Kinetis** portfolio basado en un núcleo ARM® Cortex™-M4 (MCU de 32-bit)

Debido a que sus bibliotecas están incompletas en cuanto a funciones trigonométricas y de control (necesarias para llevar a cabo el algoritmo FOC), se descartaron los microcontroladores de la familia ColdFire. En cuanto al portfolio Kinetis, el mismo no posee soporte técnico suficiente en cuanto a software y notas de aplicación (necesarios para un desarrollo continuo de aplicaciones de control), ya que está basado en un núcleo reciente de ARM®. Por lo tanto, **el estudio llevado a cabo permitió determinar que la familia MC56F84xxx es la que mejor se adapta a las condiciones de diseño relacionadas al control de motores PMSM**, ya que cuenta con un núcleo potente para procesamiento a gran velocidad, amplia variedad de periféricos de control (PWM, ADC, QEI, etc.) y buena disponibilidad de notas de aplicación además de librerías de software completas para desarrollo del algoritmo FOC.



### B. Texas Instruments

Dentro de las tecnologías relevadas en el repertorio ofrecido por Texas, se consideraron los siguientes dispositivos:

- Familia **MSP430** (MCU de 8 y 16 bits),
- Familia **C2000** (MCU de 32 bits),
- **Hércules** para aplicaciones de seguridad (MCU 32 bits),
- **Tiva**, familia basada en tecnología de ARM (MCU 32 bits).

Se descartaron, en base a las premisas mencionadas al inicio de este apartado, las familias de microcontroladores MSP430 de arquitectura de 8 y 16 bits, pues no ofrecen las prestaciones adecuadas para el algoritmo de control vectorial a realizar; como también la familia Hércules de 32 bits, cuya capacidad de procesamiento, al igual que su costo, excede los requerimientos del sistema deseado. Además, debido a la insuficiencia de material de soporte (como notas de aplicación o software de apoyo), no se tomó en cuenta a la reciente familia Tiva, que emplea el núcleo Cortex M4 de la empresa ARM.

Bajo estas consideraciones, **se eligió la familia de microcontroladores C2000 como la adecuada para llevar a cabo un sistema de control de motores PMSM**, pues integra tanto el núcleo C28x, diseñado bajo el concepto de trabajo de un DSP, como un potente conjunto de periféricos especializados en control (ADCs, QEI, etc). Por otro lado, este fabricante incorpora una unidad opcional de co-procesamiento (CLA) para tratamiento intensivo de datos y unidades de punto flotante (FPU), cualidades óptimas para el manejo de motores. Esto permite considerar a los dispositivos de esta familia como DSCs.

La tabla 2 incluye las características más relevantes en cuanto a periféricos y desempeño de las familias seleccionadas.

### VII. CONCLUSIÓN

A partir del análisis realizado a lo largo del presente trabajo, se puede afirmar que existe una amplia variedad de tecnologías disponibles en el mercado que permiten llegar a soluciones óptimas en lo que respecta a control de motores de imán permanente. Sin embargo, cada una de ellas posee características propias que las convierten en más o menos adecuadas dependiendo del enfoque del problema en cuestión. Por medio del estudio realizado en cuanto a las posibilidades que ofrecen los fabricantes, se puede concluir que un DSC sería la mejor alternativa para satisfacer las necesidades planteadas.

Características	Freescall Semiconductor MC56F84xxx	Texas Instruments C2000
Velocidad de Operación (MHz)	100	90
Performance (MIPS)	100	180
Módulos PWM	1 x 12ch	1 x 19ch
Conversores A/D	12 bit (2 x 8ch)	12 bit (1 x 16ch)
Tiempo de Conversión (A/D) (ns)	300	325
Módulos QEI	1	2
Interfaces de Comunicación	I2C, SPI, SCI, CAN	USB, I2C, SPI, SCI, CAN, LIN
FPU	No	Si
GPIO	86	54

Tabla 2. Comparación de características de las familias C2000 y MC56F84xxx.

Al mismo tiempo, dentro de este grupo existen muchas consideraciones que deben analizarse al momento de decidir por un dispositivo en particular. Entre los factores clave están los previamente descriptos: capacidades de cálculo y precisión requeridas, atributos de rendimiento y facilidad de desarrollo e implementación del sistema en su totalidad. A través del balance de estos factores se puede determinar el DSC que mejor se adapte a las condiciones de diseño de la aplicación, en este caso orientada al control de un motor de imán permanente aplicado en robótica industrial.

Una etapa posterior a este informe consistirá en la comparación entre los dispositivos elegidos a través de un *benchmarking*, de manera de observar el rendimiento de ambos bajo diferentes condiciones de operación, para luego comenzar con el desarrollo del sistema de control del motor propiamente dicho.

### VIII. REFERENCIAS

- [1] A. Abdelyazid, Passivity Based Control for Permanent-Magnet Synchronous Motors, Recent Advances in Robust Control - Theory and Applications in Robotics and Electromechanics, Dr. Andreas Mueller (Ed.), ISBN: 978-953-307-421-4, InTech, 2011.
- [2] D. Casadei, F. Profumo, G. Serra y A. Tani, FOC and DTC: Two Viable Schemes for Induction Motors Torque Control, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, vol. 17, no. 5, Septiembre 2002.
- [3] O. Wallmark, On Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor in Hybrid-Electric Vehicle Application, Chalmers University of Technology, Göteborg, Suecia, 2004.
- [4] M. Plachy, Configuring the FlexTimer for Position and Speed Measurement with an Encoder, Application note AN4381, Freescale Inc, 2011.
- [5] T. Schmidt, Factors in choosing a microcontroller architecture, EngineerIT, Octubre 2008.
- [6] G. Frantz, Comparing Fixed- and Floating Point DSPs, White Paper SPRY061, Texas Instruments Inc, 2004.
- [7] A. Soukup, Enabling Greener Embedded Control Systems with Floating-Point DSCs, White Paper SPRY113, Texas Instruments Inc, 2008