



## **Reproducción de ciclo de conducción extraurbana Europea con un motor de inducción mediante simulación**

Pfeiffer, Marcos J. <sup>a\*</sup>, Benítez, Aldo J. <sup>b</sup>, Cabral, Roberto J. <sup>c</sup>

<sup>a</sup> *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.*

<sup>b</sup> *GIDE, FI-UNaM-IMAM-CONICET, Oberá, Misiones, Argentina.*

<sup>c</sup> *LABSE, FI-UNaM, Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina*

e-mails: autor1@fio.unam.edu.ar, autor2@fio.unam.edu.ar, autor3@fio.unam.edu.ar

---

### **Resumen**

El presente trabajo se realiza en el marco del trabajo de Tesis de Maestría en Ingeniería de la Energía, se presenta la implementación del control vectorial de un motor de inducción (MI) trifásico utilizado en vehículos eléctricos (VE), dicha implementación se realiza en el software Psim. El objetivo es verificar la respuesta a la consigna de velocidad impuesta, como modelo de estudio y validación del sistema de control propuesto. La consigna de velocidad impuesta corresponde al ciclo de conducción extraurbano europeo o Extra Urban Driving Cycle (EUDC), modelo de estudio homologado para análisis en vehículos de combustión interna.

**Palabras Clave** – *Ciclo EUDC, control vectorial, sistema de tracción, vehículo eléctrico.*

### **Introducción.**

Antes de la invención del variador de frecuencia, el motor de inducción asíncrono nunca fue pensado para operar con velocidad variable. Los primeros días de los accionamientos del motor de inducción de velocidad variable se pueden registrar en la década de 1960, suministrado por el rectificador controlado de silicio (SCR). En ese entonces el control de velocidad del motor se basaba en la operación en régimen permanente. Luego se han desarrollado diferentes estrategias para el control de las máquinas de corriente alterna (MCA). Hoy día es posible clasificar su control en dos categorías generales, controles escalares y vectoriales. Los controles escalares básicamente consisten en la modificación de la frecuencia y tensión de alimentación para controlar la velocidad del motor, proveen buen funcionamiento en régimen permanente, pero poseen una pobre respuesta dinámica. El desarrollo de los controles denominados vectoriales o control orientado por flujo (FOC, Field Oriented Control) a partir de los años 70, logró obtener un control con buena respuesta dinámica en el control de las variables de velocidad y torque para MCA. Su principio básico de funcionamiento es similar al control de los motores de CC (MCC) con excitación independiente; se trata de controlar el flujo magnético en forma independiente de las demás variables eléctricas del motor. Con estas cualidades el control vectorial es utilizado en accionamientos de altas prestaciones, y es el más adecuado para controlar la tracción de VE impulsados por MCA. [1]

En cuanto a los motores utilizados en los vehículos puramente eléctricos o híbridos, están el motor de imanes permanentes (IP) y el motor de inducción (MI) tipo jaula de ardilla, el de IP es más costoso debido a que se fabrica con tierras raras aunque posee mayor densidad de potencia frente los MI. Los

MI son robustos, baratos, presenta buenas características par-velocidad y bajo mantenimiento, cualidades que los hace muy buena opción para implementar la tracción de los VE;

Actualmente el MI es el motor más utilizado como parte de los accionamientos industriales, es de bajo costo, robusto y de gran disponibilidad en todos los mercados. [2]

En este trabajo se presenta la implementación mediante simulación de un control vectorial desarrollado en el marco de la maestría de las energías con propósito de comprender sus fundamentos y de reproducir el Extra Urban Driving Cycle (EUDC) (tomado de TFM-I-300), que es un ciclo de homologación europeo, el cual representa las condiciones de la conducción en vías interurbanas o autopistas. El objetivo del trabajo es verificar si es posible que el motor simule el EUDC mediante el control propuesto.

### 1.1. *Fundamentos del control vectorial*

En las MCC de excitación independiente se controla el flujo del campo magnético producido en el entrehierro en forma independiente de la corriente de armadura. Cuando dicho flujo se mantiene constante el torque desarrollado por el MCC es directamente proporcional a la corriente de armadura. Debido a la disposición geométrica de las escobillas, las bobinas del rotor se encuentran siempre en el mismo plano del campo produciendo el máximo par en cada momento. De esta forma los MCC logran transmitir el máximo par con un control independiente del flujo.

En las MCA se ha buscado básicamente el mismo objetivo, obtener un control independiente del par y del flujo concatenado por el rotor. Su control es más complejo por el hecho de que requiere trabajar con variables de CA controlando sus magnitudes, frecuencias y fases. Además, dado que el rotor del MI está formado por espiras en cortocircuito sin conexión exterior, el flujo magnético y sus corrientes deben ser controladas a partir de las corrientes de estator.

Un adecuado control del MI requiere del modelado de las ecuaciones que rigen su dinámica. Debido a los materiales magnéticos utilizados para su fabricación y la disposición geométrica de los mismos, estas ecuaciones son no lineales.

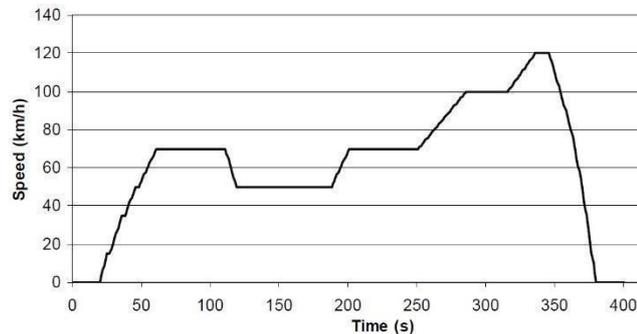
A partir de estas ecuaciones se obtiene el modelo dinámico del MI el cual considera los efectos instantáneos de las variaciones de corrientes, voltajes y perturbaciones de torque. Comúnmente, para el control del MI se utiliza el modelo en coordenadas directa y cuadratura o coordenadas  $dq$ . Aplicando transformaciones no lineales es posible simplificar dicho modelo obteniendo un control más simple del MI. Estas transformaciones permiten desacoplar las variables que controlan el flujo de las del par en el MI.

Con la correcta orientación del flujo es posible obtener el máximo par en todo el rango de funcionamiento. Otra de las ventajas de la utilización de modelos es que permiten estimar variables que no son de medición directa, o donde el lugar físico de su medición no es accesible. [1]EUDC

Para el estudio de la respuesta del sistema de control, se plantea un perfil de velocidad semejante, es decir en otra escala, al ciclo de conducción extra urbano europeo el cual es utilizado para la

medición de consumo y emisiones de gases contaminantes para los vehículos de combustión. Siendo este uno de los ciclos homologados para tal fin internacionalmente.

Los ciclos son realizados en condiciones diferentes a lo planteado en este trabajo. La finalidad del análisis realizado es verificar el comportamiento del sistema de control propuesto.



**Fig. 1 EUDC (Extra Urban Driving Cycle)**

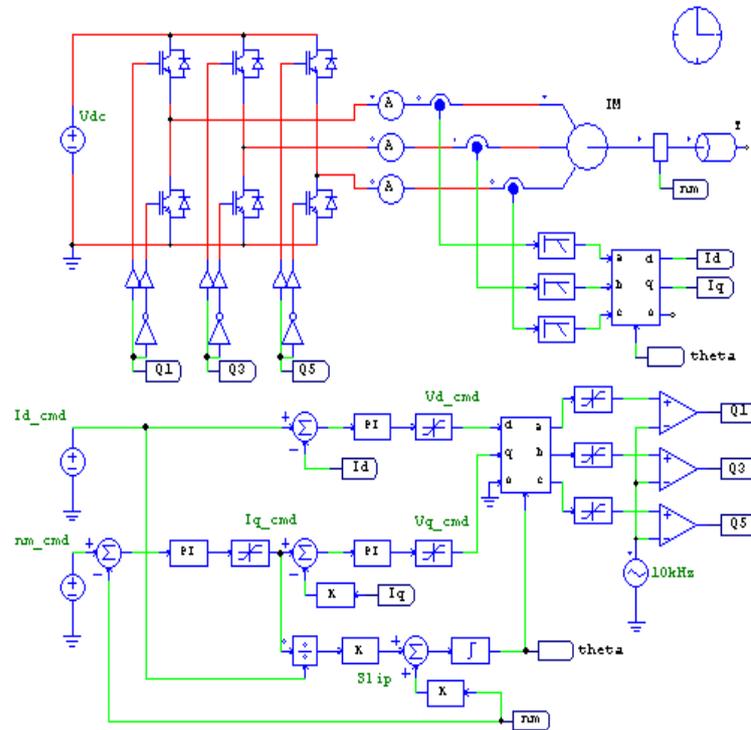
Como se observa en la Fig. 1, el EUDC en uno de sus ejes la velocidad se mide en km/h y el tiempo de duración de la prueba en segundos [2]. Obteniéndose un perfil de velocidad. Este ciclo fue diseñado para análisis de conducción de vehículos, en base a análisis estadísticos.

En el EUDC el vehículo se acelera hasta los 50seg. La velocidad se mantiene constante hasta los 100seg. donde se desacelera hasta los 50km/h, la velocidad máxima del ciclo es de 120km/h, el ciclo tiene una duración de 6.9km.

## **2. Sistema propuesto**

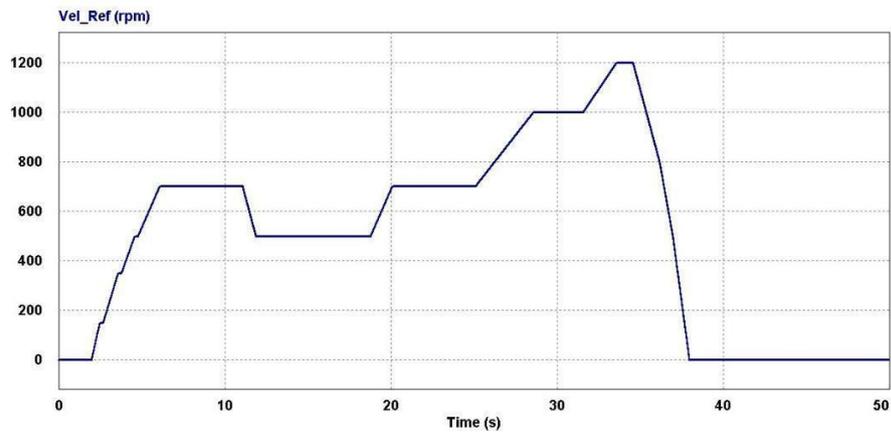
El sistema de planteado para el análisis en este documento es el FOC, el cual será descrito a continuación. La estrategia de control vectorial, consiste en asemejar a la máquina de corriente alterna asíncrona, a uno de corriente continua. Para desarrollar este estudio, se considera un modelo realizado en el software Psim, en el cual se acopló un convertidor CC/CA trifásico a un MI. Al eje de la MI se le adosó un sensor de velocidad de manera de medir la velocidad de giro de esta. Por medio del lazo de control se le impone una velocidad de referencia al variador de velocidad, el cual se lo impone a la MI, y se mide la respuesta por medio del mencionado sensor de velocidad.

A continuación se describen las partes que constituyen el diagrama general del sistema propuesto, el cual se muestra en la Fig. 2.



**Fig. 2. Modelo de control para la MI propuesto, FOC.**

La referencia de velocidad que se le impuso al variador corresponde a un perfil de velocidad semejante al ciclo extraurbano EUDC, que se puede observar en la Figura 3.



**Fig. 3. Ciclo EUDC en unidades de velocidad en rpm y tiempo en segundos.**

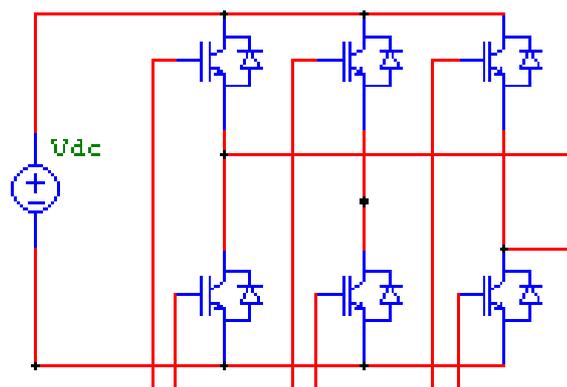
### 2.1. Inversor

En la Fig. 4 se puede ver el circuito esquemático del inversor que será descrito a continuación. En la electrónica de potencia son utilizados como un convertidor de CC/CA, que generalmente

proporciona una fuente de voltaje sinusoidal de amplitud y/o frecuencia variable a partir de una fuente CC. Los inversores se pueden clasificar según su fuente de alimentación en, fuentes de corriente (CSI) y en fuentes de tensión (VSI). Dentro de estos dos grupos son muchas las configuraciones, sin embargo en sistema de baja y media potencia es común la utilización del inversor trifásico de dos niveles en puente completo, el método de modulación empleado en él método de control seleccionado se denomina escalar o PWM (Pulse Width Modulation). Esta técnica de modulación se emplea en inversor de CC/CA, monofásicos y trifásicos. Se basa en la comparación de una señal de referencia sinusoidal a modular y una señal portadora triangular o de diente de sierra, la comparación genera un tren de pulsos de ancho específico que se utiliza en la conmutación de puentes inversor [2]. Esta técnica es una de las utilizadas para el control de inversores trifásicos, dentro de este método existen muchos algoritmos, desarrollados en búsqueda de mejorar la forma de la señal de salida, disminuyendo las pérdidas por conmutación, la eficiencia de la conversión o el contenido de armónicos [3].

El esquema que se muestra en la Fig., 4, formado por seis transistores de potencia, con seis diodos en anti paralelo, alimentado por una fuente de tensión DC corresponde a dicho inversor.

Cada par transistor-diodo, actúa en los estados de corte o saturación, comportándose como un interruptor bidireccional. A partir del estado de los interruptores, los valores de tensión de los terminales serán de  $\frac{V}{2}$  o  $-\frac{V}{2}$  con respecto al terminal central de fuente de CC. La secuencia de conmutación que siguen los interruptores vienen dados por la modulación, que será la que definirá las características de la señal. Entre ellas la amplitud, frecuencia y contenido de armónicos [4].



**Fig. 4. Inversor.**

## 2.2. Motor

Los sistemas de FOC son utilizados en motores de imanes permanentes o en motores de tipo Jaula de Ardilla, siendo estas últimas elegidas para usos aplicados a vehículos eléctricos, gracias a sus virtudes, robustez, bajo mantenimiento, bajo costo de fabricación en comparación a los de

imanes permanentes. El motor de inducción es el más utilizado para proporcionar tracción a vehículos eléctricos, debido a que tiene una estructura simple, operación confiable, alta eficiencia y gran densidad de potencia, además de ser pequeño, ligero, barato, confiable y casi libre de mantenimiento, comparado con el motor de combustión y el motor síncrono de imán permanente [4] [5]. Para este estudio se utilizó una MI de Jaula de ardilla trifásico simétrico.

### 2.3. Lazos de control

En los sistemas de FOC existen una serie de lazos de control que son encargados del accionamiento de la MI, logrando que esta sea capaz de reproducir la consigna impuesta. Lo cual se puede explicar siguiendo el diagrama de bloques cada uno de los lazos internos (anidados), externos y el objetivo que persigue cada uno de ellos.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente mediante el FOC, reducimos el control de un motor de inducción trifásico al sistema de control de una máquina de CC. Esta máquina será accionada por medio de dos corrientes, la primera llamada corriente en cuadratura  $i_q$ , por estar en cuadratura respecto del vector instantáneo de tensión trifásico, e  $i_d$  o corriente directa, por estar alineada con la tensión instantánea. Siendo la  $i_q$  directamente proporcional a la velocidad y la otra directamente proporcional al torque. Por medio de los lazos de control descritos realizamos el control de la MI de la manera planteada.

En la Fig. 5 se puede ver los esquemas donde se observan los lazos principales de  $i_q$  e  $i_d$ , así como sus retroalimentaciones las cuales corrigen los errores de los valores de consigna.

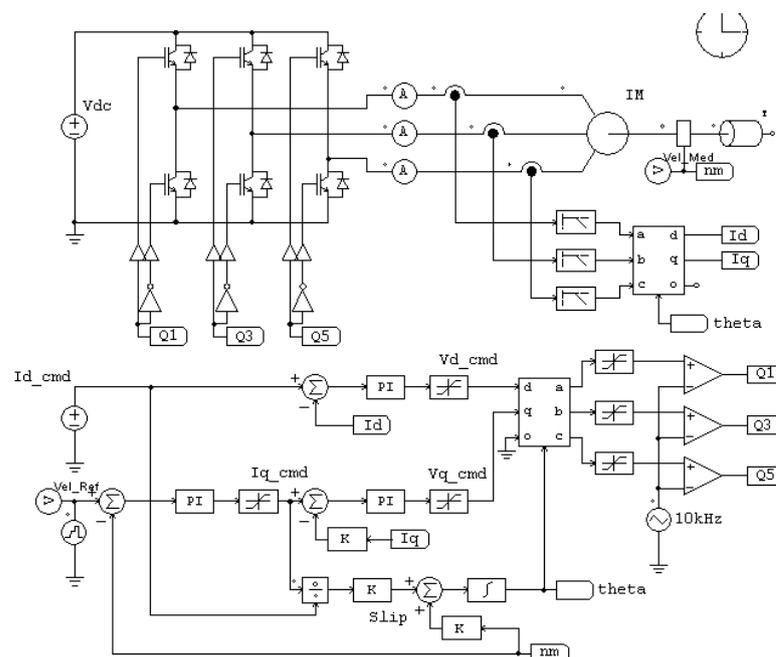


Fig. 5. Lazos de control

El lazo principal al cual se le asigna la referencia “Vel\_Ref” donde se le introduce la consigna de velocidad con el perfil EUDC. Esta velocidad asignada a la MI, es comparada con los valores de velocidad medida por medio del sensor de velocidad del rotor Vel\_nm.

Este valor de consigna Vel\_Ref, es comparado con el valor de velocidad medida “nm”, de esta comparación sale el error de velocidad que a su vez ingresa a un compensador proporcional integral (PI), cuya salida es la consigna de corriente “Iq\_cmd. Esta Iq\_cmd, consigna, es comparada con la Iq, medida, en bornes de de la MI, de donde surge el error que existe entre el valor consigna y el valor medido. En realidad este valor de Iq, no se puede medir de manera directa en virtud de que esta se obtiene como resultado del operador de cambio de referencia “abc” a “dq”.

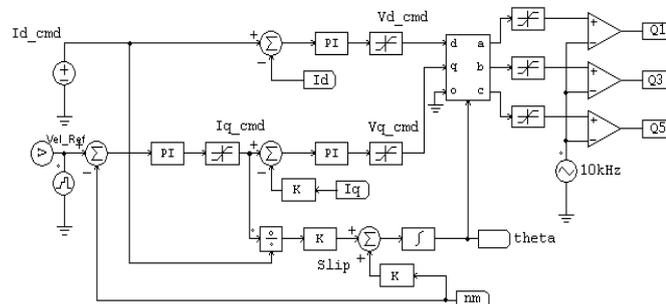
Así como el valor consigna de velocidad se le asigna un valor de id, el cual se hará mediante el lazo, cuya consigna es Id\_cmd la cual es comparada con la señal medida a estrada en bornes del motor y procesado mediante el bloque de conversión dando como resultado la corriente id, que permitirá calcular el error entre el valor consignado y el valor medido.

La clave de este control es determinar en forma precisa la posición del flujo del rotor, dicha posición es necesaria para realizar la transformación de coordenadas “abc” a “dq”. El control vectorial indirecto, determina la posición del flujo del rotor a partir del cálculo de la velocidad de deslizamiento, sin mediciones de corrientes o voltajes, solo a partir de la medición de la velocidad del rotor y de los parámetros de la máquina. [1]

La velocidad angular del rotor mecánico no es, por definición, igual a la velocidad angular del flujo del rotor. De la integración de la velocidad de flujo se obtiene la posición del flujo del rotor.[8]

En la Fig, 5, podemos ver cómo estimamos la posición del flujo del rotor, integrando la velocidad lo que nos permite estimar la posición del rotor “theta”, valor que es necesario ingresar a los bloques de cambio de coordenadas.

Los valores de las consignas comparados con los valores medidos se los denominó Vq\_cmd, y Vd\_cmd, correspondientes a los valores de corrientes iq e id, respectivamente estos valores se los ingresa a un bloque de transformación de coordenadas, lo que dará los valores de corrientes trifásica ia, ib, e ic los que ingresaran al inversor en forma de consignas Q1, Q3 y Q5. Estas consignas son las realizarán la modulación de manera que la MI sea capaz de reproducir el perfil de velocidad impuesto.



**Fig. 6. Lazos de control**

## 2.4. Sensores

El método de Control Vectorial Directo, sintetiza un vector unitario que determina los ejes referencia sincrónicos de la medida directa del flujo del entrehierro o del rotor. En el caso general, no se dispone de esta medida de forma directa, ya que para ello es necesario introducir sensores en la corona del estator. Por esta razón es necesaria la estimación a partir del resto de variables medibles, que son las tensiones e intensidades del estator, y la velocidad del rotor. El proceso de estimación generalmente conlleva una reconstrucción de la dinámica del motor y la resolución de las ecuaciones que dictan el comportamiento de la máquina. [6]

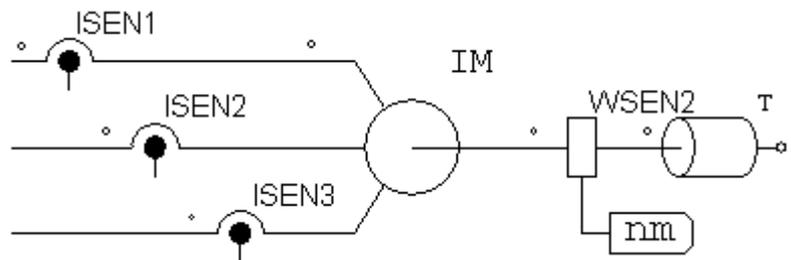


Fig. 7. Sensores

En la Fig., 7 podemos ver los sensores de corriente “ISEN1”, “ISEN2” e “ISEN3”, responsables de censar los valores de las corrientes del estator. Así como el sensor de velocidad del eje del rotor “WSEN2”.

## 3. Resultados de simulación

### 3.1. Respuesta de la curva de velocidad

En la figura 8, se puede observar las curvas de velocidad, en primer lugar en color azul se observa la curva de velocidad impuesta a la máquina, que como se mencionó, corresponde a la EUDC pero en unidades de rpm versus tiempo. En rojo se observa la respuesta de la máquina, es decir la velocidad medida.

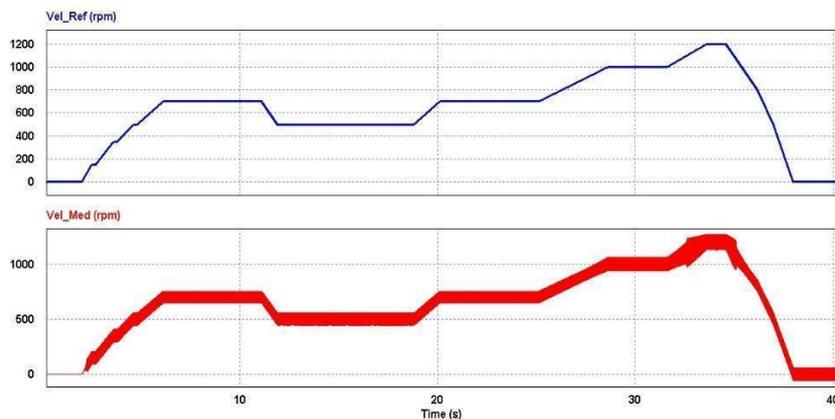
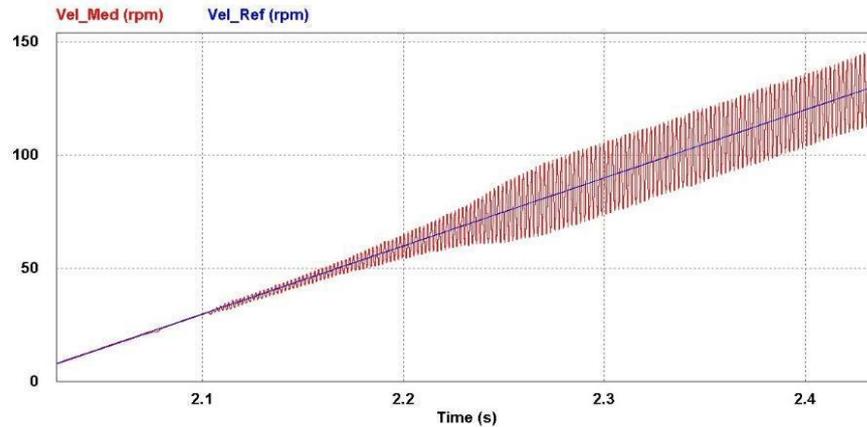


Fig. 8. Velocidad consigna y respuesta de la MI.

Como se puede observar en la comparación de ambas gráficas la máquina responde satisfactoriamente a la consigna impuesta la diferencia existente se observa en la Fig. 8, donde se ve que el modelo de control realiza pequeñas correcciones a lo largo de todo el ciclo de manera de que la máquina responda a la consigna impuesta por lo cual aparecen pequeñas oscilaciones a lo largo de todo el ciclo impuesto.



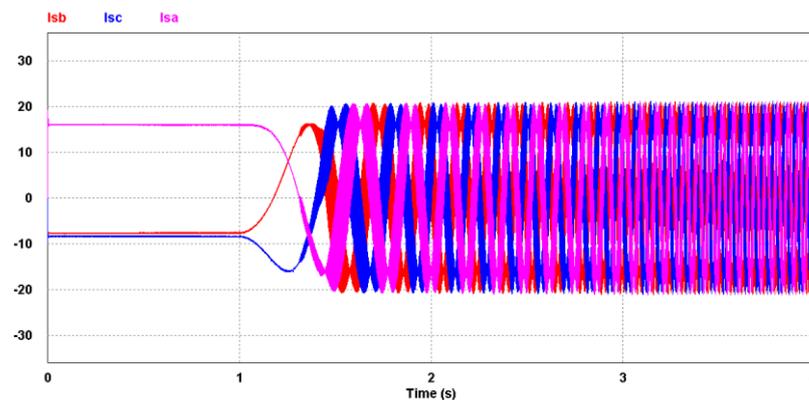
x

**Fig. 9. Vel\_Ref (azul), Vel\_Med (rojo)**

### 3.2. Corrientes de alimentación al MI

A continuación se verá el comportamiento de las corrientes en el modelo para lograr el comportamiento expuesto.

En la Figura 10 se observa los valores de las corrientes mediadas a la entrada de la MI,  $I_{sa}$ ,  $I_{sb}$  e  $I_{sc}$  y su evolución a lo largo de toda la consigna de velocidad. En la Fig. 10, se puede observar un ampliación del primer segmento incremental de la consigna que permite apreciar mejor el desarrollo de las  $I_{sc}$ ,  $I_{sb}$  e  $I_{sa}$ .



**Fig. 10. Ampliación de la evolución de las corrientes en el primer tramo incremental de la velocidad.**

### 3.3. Tensión de Alimentación al MI

En la Fig. 14 se observa el comportamiento de las tres fases de tensión de alimentación de la MI, es de notar, su característica no sinusoidal debida representativa de la modulación por ancho de pulso PWM, así mismo en la Fig. 12, se realizó un zoom que permite apreciar de mejor manera la variación en el ancho del pulso en las zonas de aceleración o cambios de velocidades.

Se puede ver que los módulos de las tensiones se mantienen cerca de sus valores nominales, sin embargo los ancho de los pulsos cambian cuando existen cambios en la velocidad a lo largo del ciclo. [7]

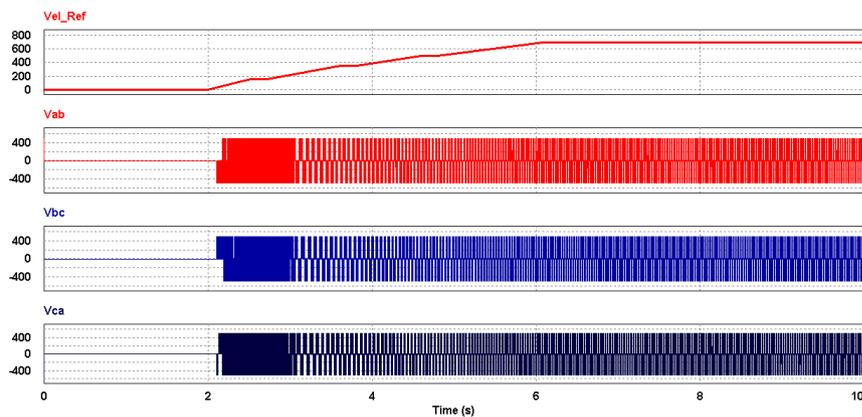


Fig. 11. Tension PWM.

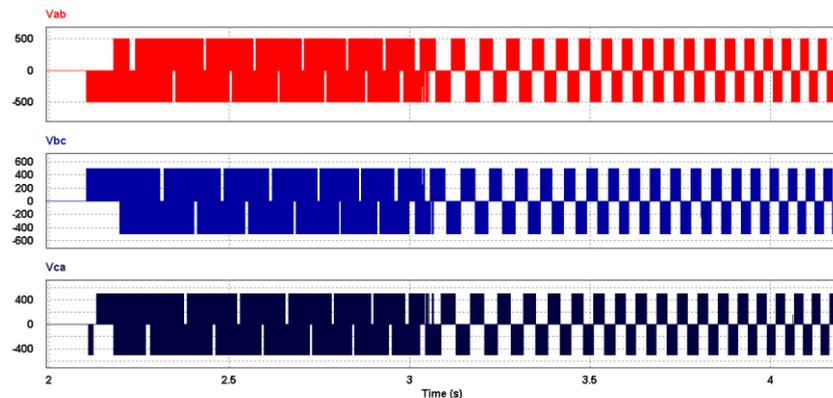


Fig. 12. Ampliación de la Fig. 11.

## 4. Conclusiones

Del análisis realizado se puede concluir que el modelo planteado, permitió obtener resultados favorables. El control vectorial es correcto y responde adecuadamente a la consigna propuesta, además las respuestas de tensión y corriente del sistema de control corresponde al tipo de estrategia empleada.

En las gráficas expuestas en las Fig. 8, se puede observar que responde de manera adecuada a la consigna impuesta, con lo cual podemos inferir que es un modelo adecuado para realizar ensayos en consignas similares y planteadas en el plan de Tesis de Maestría en Ingeniería de la Energía.

## 5. Referencias

- [1] Bilal Akin, Manish Bhardwaj, Sensorless Field Oriented Control of 3-Phase Induction Motors. Texas Instruments, Inc. C2000 Systems and Applications.
- [2] Murillo, FA Valenzuela, and R. Ramírez Betancour. "DETERMINACIÓN DE SEÑALES DE CONMUTACIÓN PARA ACTIVAR UN INVERSOR TRIFÁSICO DE DOS NIVELES." *Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability* 1.3 (2017): 101-122.
- [3] Quiroga, L. Mier, and J. Benitez-Read. "Estado del Arte Sobre el Control de Motores de Inducción en Vehículos Eléctricos." *CONGRESO MEXIQUENSE DE INNOVACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO*. 2011.
- [4] Jimena, López Mesa Diana, et al. "Modulación PWM aplicada a inversores trifásicos dentro del esquema de accionamientos eléctricos AC." *Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET)* (2007).
- [5] Moscardo Fuster, Rafael. "Modelo de un vehículo para la simulación dinámica del nuevo ciclo de conducción europeo (NEDC)." (2015).
- [6] González, Luis Enrique Avendaño, and Juan Pablo González Tamayo. "Simulación de control vectorial a un motor de inducción." *Scientia et Technica* 18.1 (2013): 1-10.
- [7] Dorantes, Daniel Pérez, and Máximo Hernández Ángeles. "Análisis de las técnicas de modulación SPWM y SVPWM en control de inversores trifásicos de dos y tres niveles." vol 1: 587-592.
- [8] Instruments, T. "Digital Motor Control Software Library: Target Independent Math Blocks." (2013).

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido llevado a cabo gracias al apoyo de los directores, sin los cuales se me hubiese sido imposible realizar este artículo. La Facultad de Ingeniería, la maestría etc.