

# HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE CONTROL DE MOTORES DC ALIMENTADOS MEDIANTE CONVERTIDORES AC/DC (TAAE'2006)

D. ORTEGA<sup>1</sup>, J.L.VILLA<sup>1</sup>, J.F.SANZ<sup>2</sup> Y J.SALLAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Eléctrica. Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Industrial. Universidad de Zaragoza. España.

<sup>2</sup> Fundación CIRCE (Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos). Universidad de Zaragoza. España.

*Esta Herramienta informática ha sido desarrollada en el departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza con el fin de facilitar la comprensión y posterior análisis del comportamiento de los diferentes tipos de convertidores AC/DC teniendo como carga el motor de corriente continua; como parte importante de la asignatura de regulación y Control de Máquinas Eléctricas perteneciente a los estudios de Ingeniería Técnica Industrial especialidad de Electrónica Industrial..*

## 1. Introducción

En el estudio del control de velocidad de los motores de Corriente Continua se pueden considerar dos partes bien diferenciadas. Por un lado esta el estudio de la etapa de potencia con los diferentes tipos de convertidores (AC/DC o DC/DC) y, por otro, esta el estudio de las diferentes técnicas de control.

En el análisis de las etapas de potencia, existe una cierta complejidad referente al entendimiento de las formas de onda de tensión y corriente en bornes de un motor de corriente continua cuando es alimentado desde un convertidor AC/DC; sobre todo en el caso de que la corriente sea fuertemente discontinua. En esta situación, hay que calcular en primer lugar la ecuación matemática de la corriente para poder determinar los valores medios de dichas magnitudes. Esta es en general la parte más complicada para el alumno.

La bibliografía referente a esta materia es muy abundante, pero en general, el análisis de los convertidores siempre se realiza con carga Óhmico-Inductiva, el cual, solo representa el caso particular de motor DC parado ( Fuerza contraelectromotriz nula) o, cuando se tiene en cuenta esta, se considera corriente continua y sin rizado [1,3]. En muchas situaciones, la corriente consumida por un motor DC es altamente discontinua y, por tanto, el análisis del comportamiento electromecánico del motor DC alimentado desde convertidor no está estudiado en detalle.

Esta herramienta informática, se ha desarrollado con el fin de simplificar, a la vez que dar un enfoque más didáctico, a dicho estudio; presentando de una manera muy visual las formas de onda y el comportamiento del motor para distintos convertidores y diferentes situaciones de trabajo. Este programa se ha desarrollado mediante las siguientes aplicaciones informáticas: VisualBasic.Net para la entrada de datos y resolución de problemas y Matlab 6.5. para la visualización de las formas de onda.

## 2. Diseño de la aplicación.

Los planteamientos iniciales a la hora de pensar en una aplicación informática que ayude al alumno fueron: Sencillez de instalación, para que el alumno pueda instalarlo fácilmente y trabajar en casa; Claridad y orden en la entrada de datos y, facilidad para visualizar los resultados, todo ello bajo un entorno de trabajo hombre-máquina amigable.

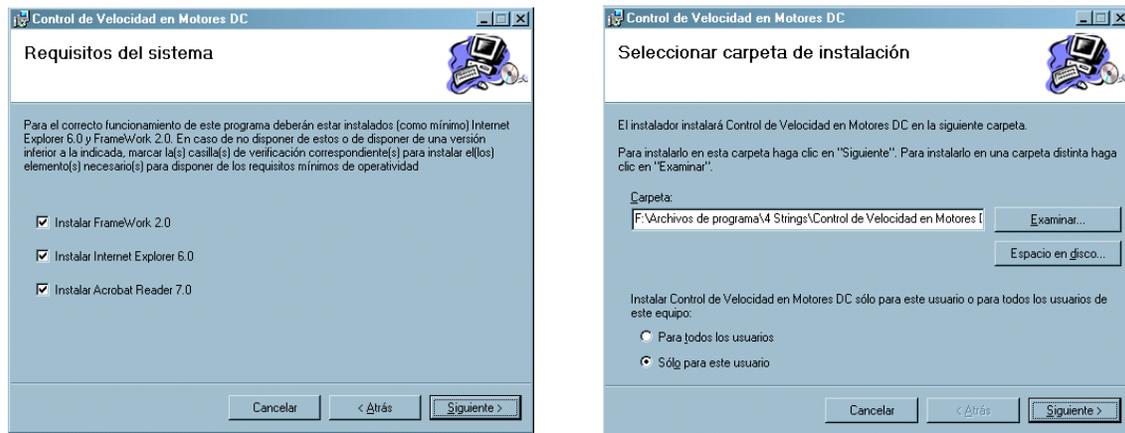
Estas premisas decidieron que el programa de selección de parámetros y cálculos fuese VisualBasic.Net ya que presenta las siguientes ventajas: Entorno Windows, programación por módulos; lo que permite separar la programación en bloques temáticos, posibilidad de exportación

de dichos módulos y facilidad de actualización. Por otro lado, la selección de Matlab para la visualización de resultados, fue debido a que los alumnos ya están familiarizados con la utilización de este programa por otras asignaturas.

Para utilizar esta aplicación, hay que seguir 4 pasos: Instalación, Selección del accionamiento, introducción de parámetros y cálculos y por último visualización de resultados.

En primer lugar, la instalación es una de las grandes ventajas que ofrece Visual Basic .Net; la posibilidad de crear el asistente de instalación de la aplicación. Para este proyecto se ha creado un asistente de instalación, el cual guía al usuario durante todo el proceso para asegurar la correcta instalación, así como su posterior funcionamiento (Fig.1)

El primer paso a realizar durante el proceso de instalación, será la de indicar el software del que el equipo carece y que impediría el correcto funcionamiento de la aplicación. Dichas programas son Framework 2.0, Internet Explorer 6.0 y Acrobat Reader 7.0

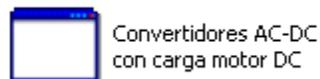


**Figura 1:** Instalación de la aplicación.

El siguiente paso será elegir la carpeta en la que se instalará la aplicación.

Una vez se ha seleccionado la carpeta de destino, se procederá a la instalación de la aplicación y, en caso de ser necesario, de los programas seleccionados en la primera pantalla.

Una vez instalado el programa, abriremos la aplicación pulsando sobre el icono correspondiente (fig.2)



**Figura 2:** Icono de arranque de la aplicación.

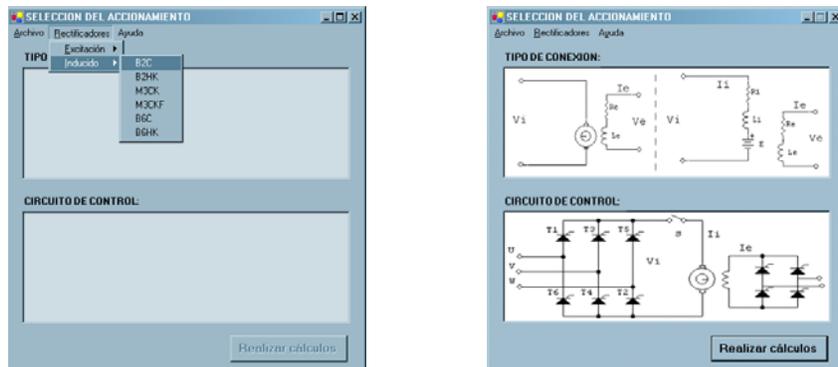
En segundo lugar, para la selección del accionamiento, se ha considerado únicamente el control de velocidad del motor DC de excitación independiente; tanto en zona de par constante o control por inducido como a potencia constante o por debilitamiento de campo; por ello, es necesario seleccionar tanto el convertidor de inducido como el de excitación. La denominación de los convertidores se realiza de acuerdo a la norma IEC 60747.

Para el convertidor de excitación se han considerado 2 posibilidades de control, un puente monofásico totalmente controlado B2C y un puente monofásico semicontrolado ó híbrido de cátodo común B2HK lo que permite en ambos casos alimentar la excitación con corrientes de excitación menores de la nominal, y por tanto trabajar en zona de potencia constante.

Para el convertidor de inducido, se han considerado 6 posibilidades: Puentes rectificadores monofásicos B2C y B2HK, puentes rectificadores trifásicos con punto medio con y sin diodo de inversa M3CK y M3CKF respectivamente y puentes trifásicos de onda completa totalmente controlados y semicontrolados B6C y B6HKF respectivamente.

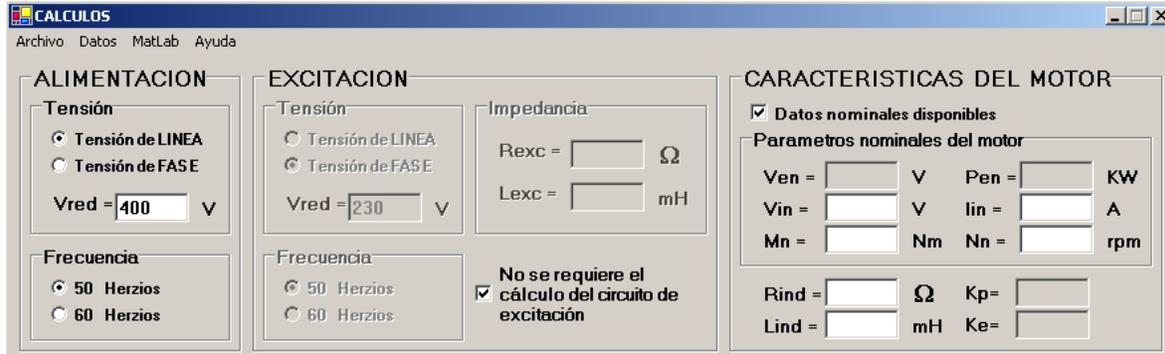
Estas distintas posibilidades permiten al alumno comparar el comportamiento de un mismo motor con una carga determinada, alimentado desde diferentes convertidores.

Una vez seleccionados los convertidores, aparece el esquema de control elegido, y ya se puede pasar a parametrizar el accionamiento y realizar cálculos (fig.3).



**Figura 3:** Selección de los convertidores de inducido y excitación con el esquema de control elegido.

En tercer lugar, la introducción de parámetros y realización de cálculos se realizan en la pantalla correspondiente (fig.4)



**Figura 4:** Pantalla principal de entrada de datos.

Los parámetros necesarios son la tensión de red, bien sea de fase o de línea y la frecuencia pudiendo elegirse entre 50 o 60 Hz, para tener en cuenta el sistema americano; parámetros del circuito de excitación,  $R_{exc}$  y  $L_{exc}$  para poder calcular la corriente de excitación; las características nominales del motor como son la tensión de inducido, corriente de inducido, Par útil, velocidad y los valores de resistencia de inducido  $R_i$  e inductancia de inducido  $L_i$ , normalmente obtenidas de un catálogo comercial.

Una vez introducidos los datos, el programa calcula la constante eléctrica del motor  $K_e$  en unidades de  $V/rpm \cdot A$  y la constante de par  $K_p$  en unidades de  $Nm/A^2$

A continuación, hay que definir los datos conocidos de funcionamiento o datos del problema (fig.5). Para ello, no es necesario conocer todos los datos, si no que dados dos o tres de ellos, el resto son calculados.

DATOS DEL PROBLEMA			
<input type="checkbox"/> Datos Nominales	<input checked="" type="checkbox"/> Dato disponible	<input checked="" type="checkbox"/> Dato disponible	<input type="checkbox"/> Dato disponible
Excitación	Inducido	Motor	Potencias
<input type="radio"/> $\alpha$ $\alpha =$ <input type="text"/> <input type="radio"/> $V_e$ $V_e =$ <input type="text"/> V <input type="radio"/> $I_{exc}$ $I_e =$ <input type="text"/> A	<input type="radio"/> $\alpha$ $\alpha =$ <input type="text"/> <input type="radio"/> $V_i$ $V_i =$ <input type="text"/> V <input type="radio"/> $I_{ind}$ $I_i =$ <input type="text"/> A	<input type="radio"/> $M$ $M =$ <input type="text"/> Nm <input type="radio"/> $E'$ $E' =$ <input type="text"/> V <input type="radio"/> $n$ $n =$ <input type="text"/> rpm	<input type="radio"/> $P_a$ $P_a =$ <input type="text"/> KW <input type="radio"/> $P_e$ $P_e =$ <input type="text"/> KW <input type="radio"/> $P_j$ $P_j =$ <input type="text"/> KW

Figura 5: Pantalla principal de entrada de datos.

Del circuito de excitación, se pueden tomar los datos nominales o bien, especificar el ángulo de disparo de los tiristores del puente de excitación, o la tensión de excitación deseada o la corriente de excitación deseada. Definiendo uno de ellos los otros dos son calculados de acuerdo a las siguientes ecuaciones [1]:

$$V_{exc} = R_{exc} \cdot I_{exc} \quad (1)$$

$$V_{exc} = \frac{\sqrt{2}V_F}{\pi} (1 + \cos \alpha_{exc}) \quad (2)$$

$$V_{exc} = \frac{2\sqrt{2}V_F}{\pi} \cos \alpha_{exc} \quad (3)$$

Donde la Ec.2 se utiliza en el caso de un puente B2HK y la Ec.3 en el caso de un B2C, ambas ecuaciones en caso de corriente de excitación continua por la carga.

Del circuito de inducido, se puede elegir entre el ángulo de disparo del puente de inducido  $\alpha_i$  o la tensión media en bornes del motor  $V_i$  o bien la corriente media que consume el motor  $I_i$ . Y, es obligatorio especificar otro parámetro de entre dos grupos; o bien un dato del comportamiento mecánico del motor como puede ser el par que está desarrollando  $M$ , o la fuerza contraelectromotriz  $E'$  o la velocidad de giro en rpm  $n$ ; o bien una potencia eléctrica en el motor como pueden ser la potencia electromagnética interna  $P_a$ , o la potencia absorbida  $P_e$  o las pérdidas en el cobre de la máquina  $P_j$ .

En caso de especificar el valor medio de la tensión de inducido o corriente de inducido, el programa determina que se trata del caso de corriente continua por la carga y de rizado despreciable, con lo cual se aplicarán las siguientes ecuaciones para el cálculo del resto de parámetros [1].

$$V_i = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}V_F}{2\pi} \cos \alpha_i \quad (4)$$

$$V_i = \frac{3\sqrt{2}V_F}{2\pi} \left[ 1 + \cos\left(\alpha_i + \frac{\pi}{6}\right) \right] \quad (5)$$

$$V_i = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}V_F}{2\pi} (1 + \cos \alpha_i) \quad (6)$$

$$V_i = 1.35 \cdot V_L \cos \alpha_i \quad (7)$$

En caso de especificar el ángulo de disparo de los tiristores, se calculará la ecuación matemática de la corriente o las dos ecuaciones de corriente que pueden aparecer en los puentes con diodos de inversa o en puentes híbridos de acuerdo a la configuración utilizada; Ec.4 para un M3CK, Ec.5 para un M3CKF, Ec.6 para un B6HKF y Ec.7 para un B6C.

Una vez introducidos los datos conocidos, pulsando sobre "aceptar datos" la aplicación nos indica si son suficientes los datos señalados y si es correcto el rango de valores. En caso de no haber

problemas, aparece un mensaje que indica “Introducción correcta”. A continuación, en el menú desplegable seleccionamos “calcular”, rellenándose todos los campos de la pantalla “Incógnitas” (Fig.6) y generándose automáticamente el fichero de Matlab correspondiente.

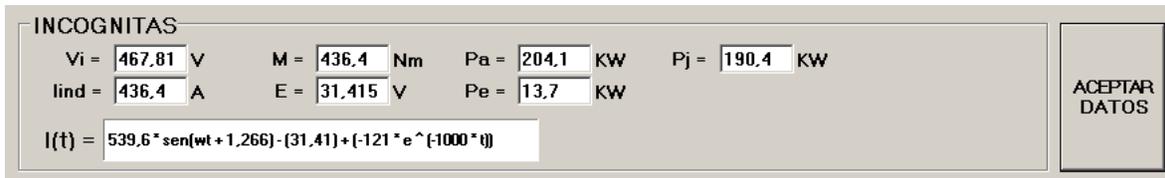


Figura 6: Solución matemática obtenida.

En cuarto lugar, la visualización de resultados es una tarea muy sencilla. Una vez generado el fichero de Matlab \*.mdl, no es necesario abrir este programa para visualizar resultados, ya que desde el propio visualnet se abre la aplicación desde el menú desplegable “Matlab.Ultimo archivo calculado” (Fig.7). Aunque puede abrirse cualquier otro realizado previamente para comparar resultados.

Una vez abierto el fichero de Matlab, aparece el modelo simulink correspondiente al tipo de convertidor seleccionado previamente y el osciloscopio de visualización de tensión de inducido y corriente de inducido. El alumno solo deberá arrancar la simulación para visualizar las formas de onda.

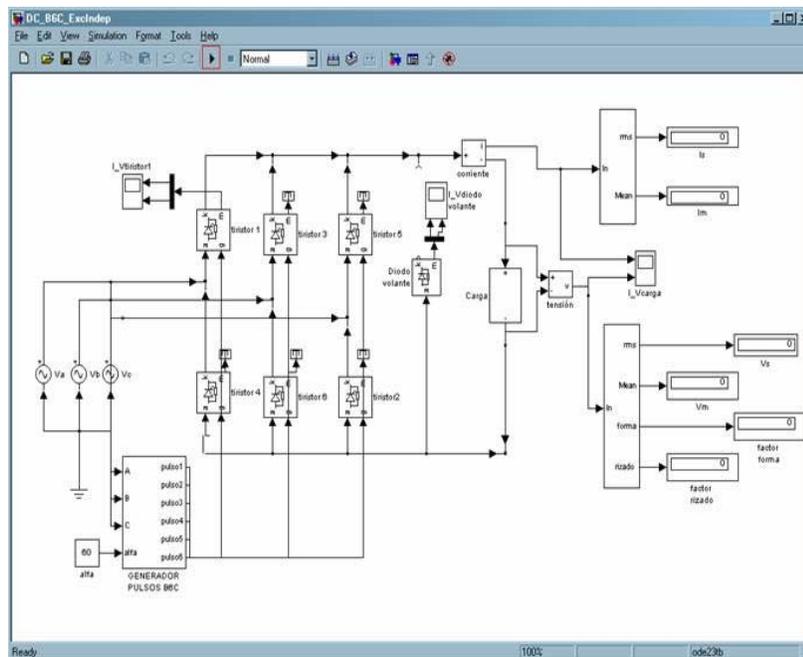


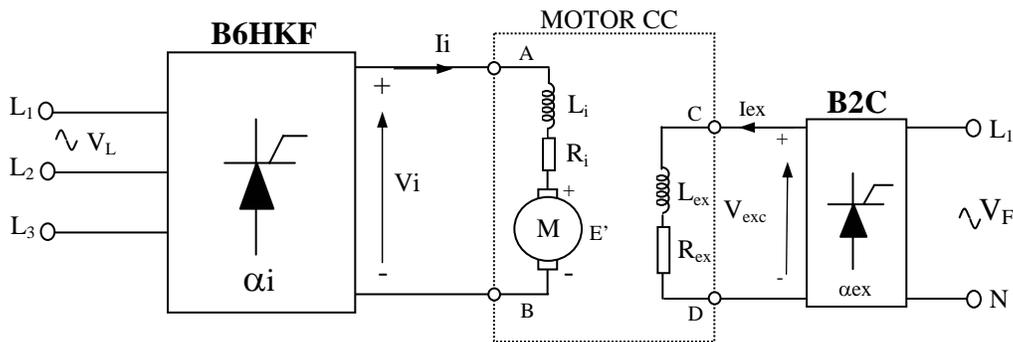
Figura 7: Modelo de Matlab del convertidor seleccionado.

### 3. Resolución de problemas

Este programa no pretende sustituir el esfuerzo del alumno en la resolución de accionamientos DC alimentados desde convertidores AC/DC; ya que para el perfecto entendimiento, el alumno debe poder resolver cualquier situación sin ayuda del programa. La mejora que conlleva este programa en la ayuda docente es la posibilidad que tiene el alumno de comprobar los resultados obtenidos tanto numéricos como gráficos. Asimismo, permite al profesor explicar con el ordenador los diferentes montajes evitando el tedioso proceso de dibujar las formas de onda en la pizarra.

El tipo de problemas a resolver en una parte de la asignatura de Regulación y control de máquinas eléctricas consiste en dar al alumno un catálogo comercial de motores de C.C., para que seleccione uno de ellos, anotando todos sus parámetros característicos: Tensión de inducido nominal ( $V_{in}$ ), velocidad nominal en rpm ( $n_n$ ), par útil nominal ( $M_n$ ), potencia nominal ( $P_n$ ), intensidad de inducido nominal ( $I_{in}$ ), Resistencia e inductancia de inducido ( $R_i, L_i$ ), potencia de excitación nominal ( $P_{exn}$ ), tensión de excitación nominal ( $U_{exn}$ ) y resistencia e inductancia de excitación ( $R_{ex}, L_{ex}$ ).

Además, se especifica el tipo de puentes que controlan el motor para trabajo en 1,2 o 4 cuadrantes y los ángulos de disparo correspondientes a inducido y excitación ( $\alpha_i, \alpha_{ex}$ ). Y, se quiere determinar para una velocidad de giro conocida, la corriente media consumida por el motor en esa situación ( $I_i$ ), la tensión de inducido media en bornes del motor ( $V_i$ ) y el par mecánico desarrollado ( $M_u$ ); así como las pérdidas para determinar el rendimiento (Fig.8).



**Figura 8:** Esquema de control con sus correspondientes parámetros.

La principal dificultad que encuentra el alumno, es la de determinar si la corriente que consume el motor con ese convertidor y ese ángulo de disparo es continua o discontinua. Para ello deben calcular la ecuación o ecuaciones de la corriente de inducido (Ec.8) [2], en función de si el puente es híbrido, si entra en conducción el diodo de inversa (Ec.9)....

$$i_i(\omega t') = I_{osen} \cdot (\omega t' + \alpha' - \varphi) - \frac{E'}{R_i} + A_1 e^{-\frac{t'}{\tau}} \quad (8)$$

$$i_{di}(\omega t'') = -\frac{E'}{R_i} + A_2 e^{-\frac{t''}{\tau}} \quad (9)$$

Una vez obtenida, hay que calcular el instante de tiempo, a partir del momento en que comienza la conducción de corriente por el tiristor, donde esta ecuación se anula  $i_i(\omega t' = \theta f) = 0$ , lo cual conlleva la utilización de una calculadora programable. Si la corriente no se ha anulado antes del disparo del siguiente tiristor se dice que es continua y la tensión media se obtiene aplicando directamente la ecuación correspondiente, ya que en ningún momento aparece la fuerza contraelectromotriz  $E'$  en bornes del motor. En caso contrario, se dice que la corriente es discontinua y desde el momento de extinción de la corriente de inducido, hasta el disparo del siguiente tiristor, la intensidad es nula y por tanto en bornes del motor aparecerá la  $E'$ .

Por último, para calcular la tensión media de inducido en caso de corriente discontinua hay que integrar el intervalo de tiempo que le llega la tensión de red y el intervalo en que tengamos la fuerza contraelectromotriz.

Ilustraremos con un ejemplo un caso complejo:

Los datos de catálogo de un motor CC son  $U_n=520$  V;  $M_n= 111$  Nm;  $n_n=3430$  rpm;  $I_n=85$  A;  $P_{exn}=480$  W;  $V_{exn}= 180$  V;  $R_{ex}=67,5$   $\Omega$ ;  $R_i= 0,189$   $\Omega$ ;  $L_i= 2,9$  mH;

Alimentado por inducido mediante un puente híbrido B6HKF desde una red de 400 V, 50 Hz con un ángulo de disparo de  $\alpha=90^\circ$ ; y por excitación mediante un puente B2C a tensión nominal.

Si el motor en esta situación se encuentra girando a 2100 rpm. Dibujar las formas de onda de tensión y corriente en el inducido y calcular la tensión media en bornes del motor, así como el par que esta desarrollando.

Solución: Aparecen 2 ecuaciones de corriente

$$i_i(\omega t') = 607,96 \text{sen} \cdot (\omega t' + 0,204) - 1632,43 + 1508,9e^{-65,17t'} \quad (10)$$

$$i_{di}(\omega t'') = -1632,43 + 1684,6e^{-65,17t''} \quad (11)$$

La corriente se anula por el diodo de inversa a los  $8,68^\circ$ , y por tanto la representación gráfica aproximada de la tensión y corriente será (Fig.9):

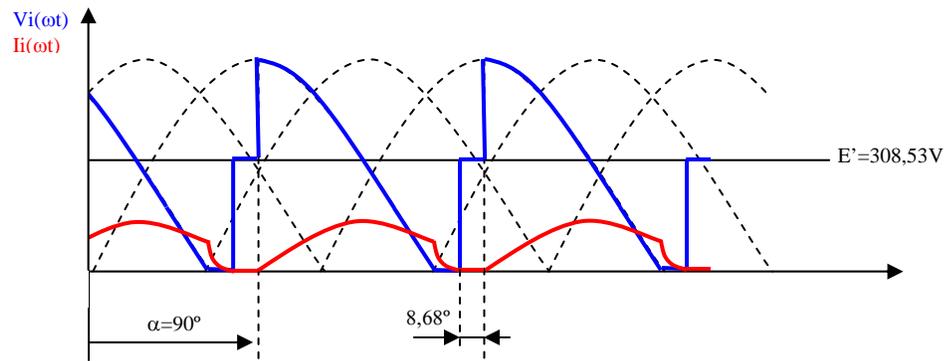


Figura 9: Ondas aproximadas de tensión y corriente de inducido.

Este proceso conlleva perfectamente una hora de explicación. Introduciendo los datos en el programa (Fig.10) para comprobar resultados:

ALIMENTACION	EXCITACION	Impedancia	CARACTERISTICAS DEL MOTOR
Tensión <input checked="" type="radio"/> Tensión de LINEA <input type="radio"/> Tensión de FASE Vred = 400 V	Tensión <input checked="" type="radio"/> Tensión de LINEA <input type="radio"/> Tensión de FASE Vred = 400 V	Rexc = 67,5 Ω Lexc = 0 mH	<input checked="" type="checkbox"/> Datos nominales disponibles Parametros nominales del motor Ven = 180 V Pen = 0,480 KW Vin = 520 V Iin = 85 A Mn = 111 Nm Nn = 3430 rpm Rind = 0,189 Ω Kp = Lind = 2,9 mH Ke =
Frecuencia <input checked="" type="radio"/> 50 Herzios <input type="radio"/> 60 Herzios	Frecuencia <input checked="" type="radio"/> 50 Herzios <input type="radio"/> 60 Herzios	<input type="checkbox"/> No se requiere el cálculo del circuito de excitación	

Figura 10: Entrada de datos del motor especificado y de la red.

Y especificando las condiciones de trabajo (Fig.11):

DATOS DEL PROBLEMA			
<input checked="" type="checkbox"/> Datos Nominales	<input checked="" type="checkbox"/> Dato disponible	<input checked="" type="checkbox"/> Dato disponible	<input type="checkbox"/> Dato disponible
Excitación <input type="radio"/> α α = 30,034 <input type="radio"/> Ve Ve = 180 V <input type="radio"/> Iexc Ie = 2,6666 A	Inducido <input checked="" type="radio"/> α α = 90 <input type="radio"/> Vi Vi = V <input type="radio"/> Iind Ii = A	Motor <input type="radio"/> M M = Nm <input type="radio"/> E' E' = V <input checked="" type="radio"/> n n = 2100 rpm	Potencias <input type="radio"/> Pa Pa = KW <input type="radio"/> Pe Pe = KW <input type="radio"/> Pj Pj = KW

Figura 11: Condiciones dadas de trabajo.

Se obtienen todas las incognitas; ángulo de disparo en la excitación, tensión de inducido, corriente de inducido, par desarrollado, potencia absorbida, potencia entregada, y pérdidas por efecto joule, así como las dos ecuaciones de corriente (Fig.12)

INCOGNITAS										
Alfa e =	<input type="text" value="30,03"/>	I <sub>exc</sub> =	<input type="text" value="2,666"/> A	I <sub>ind</sub> =	<input type="text" value="95,91"/> A	E =	<input type="text" value="308,53"/> V	Pe =	<input type="text" value="29,59"/> KW	
Ve =	<input type="text" value="180"/> V	Vi =	<input type="text" value="326,65"/> V	M =	<input type="text" value="125,24"/> Nm	Pa =	<input type="text" value="31,33"/> KW	Pj =	<input type="text" value="1,738"/> KW	
i(t) =		<input type="text" value="607,9 * sen(wt + 0,204) - (1632) + (1508 * e ^ (-65,17 * t))"/>						Id(t) =		<input type="text" value="- (1632) + (1684,60708104147 * e ^ (-65,17 * t))"/>

ACEPTAR DATOS

Figura 12: Pantalla de resultados obtenidos.

Automáticamente se ha generado el fichero de MATLAB “B6HK\_90°\_2100 rpm.mdl”, con los datos obtenidos. Se abre directamente desde el programa y solo deberemos arrancar la simulación obteniéndose las ondas exactas de tensión y corriente(Fig. 13)

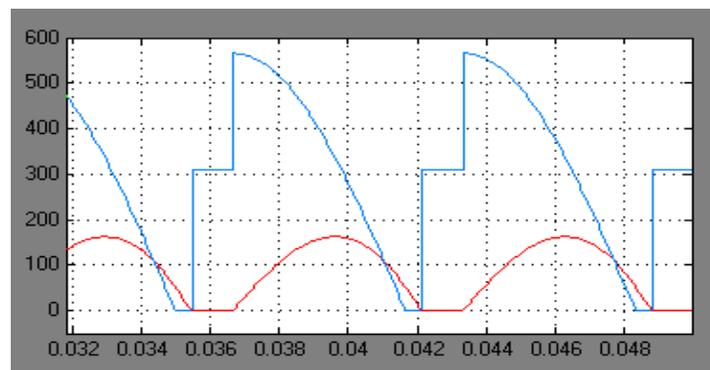


Figura 13: Pantalla de resultados obtenidos.

#### 4. Conclusiones

Con este programa didáctico, se consigue; por un lado facilitar el cálculo matemático de la corriente consumida por un motor DC alimentado desde cualquier convertidor AC/DC normalizado; tanto para rectificación como ondulación, y por otro, la visualización rápida de las formas de onda de tensión y corriente modificando las condiciones de trabajo.

Se ha disminuido notablemente el tiempo dedicado a esta parte, dedicándolo a otros contenidos, incrementando a su vez su comprensión por parte de los alumnos.

Resulta una herramienta muy práctica para la docencia, ya que permite el estudio de diferentes situaciones en poco tiempo y de una manera muy gráfica.

#### Referencias

- [1] R. Chauprade. *Control Electrónico de los motores de corriente continua*. Editorial Gustavo Gili, S.A. 1983
- [2] Muhammad H. Rashid. *Power Electronics. Circuits, devices and applications*. Editorial Prentice Hall 1993
- [3] Daniel W. Hart. *Electrónica de Potencia*. Editorial Pearson Educación, S.A. 2001