

Ingeniería Eléctrica
Facultad: Metalurgia - Electromecánica

Trabajo de Diploma

Para Optar por el Título de

Ingeniero Eléctrico

Título: Laboratorio Virtual sobre Máquinas Eléctricas
para las prácticas de Laboratorio.

Autor: Michel Montero Mosqueda

Tutor: Dr.C. Ignacio Romero Rueda

Pensamiento

El primer deber de un hombre de estos días, es ser un hombre de su tiempo.

José Martí



Agradecimientos

A mi Familia que tanto me ha apoyado a lo largo de estos 6 años de carrera.

A todos aquellos profesores que colaboraron con mi preparación como profesional.

A mis amistades que siempre estuvieron cuando las necesité.

A Liuska que me apoyó siempre en todo.

A los que de una forma u otra colaboraron en la realización de este trabajo.

A mis Padres y hermana, que fueron de vital importancia en el desarrollo de mi vida y que gracias a ellos estoy aquí.

En especial a mi tutor Dr.C. Ignacio Romero Rueda, por su ayuda incondicional.

Dedicatoria

A mis familiares:

A mi hermana:

A mi novia (Liuska Fernández Diéguez)

*En especial a mis padres que siempre me brindaron su
apoyo de forma desinteresada.*

A todos los quiero mucho.

Declaración de Autoría

Declaro que soy el único autor de este trabajo y autorizo al Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, y al Departamento de Eléctrica para que haga el uso por la parte docente que estimen pertinente del mismo.

Para que así conste, firmamos la presente a los ____ días del mes ____ del año 2015.

Nombre Autor: Michel Montero Mosqueda

Firma

Nombre Tutor: Dr. Ignacio Romero Rueda

Firma

Resumen

En la carrera de Ingeniería Eléctrica de nuestro centro se estudia la asignatura Máquinas Eléctricas de forma muy abstracta, ya que los estudiantes no tienen acceso a laboratorios de estos equipos, lo cual influye decisivamente en el aprovechamiento académico de los alumnos.

Los laboratorios virtuales son una representación informática de los laboratorios tradicionales y permiten realizar experimentos, investigaciones, prácticas académicas y científicas, dando la sensación de su existencia real; apoyan y promueven el aprendizaje de los estudiantes y aumentan las opciones de experimentos disponibles en las instituciones educativas.

Las prácticas de laboratorios de máquinas eléctricas suelen desarrollarse en laboratorios en los que se ven involucrados una serie de recursos materiales y humanos que en muchas ocasiones suponen unos desembolsos económicos mayores de los que puede soportar cualquier departamento universitario.

Con el desarrollo de esta investigación, se propone la informatización del proceso enseñanza aprendizaje de la asignatura de Máquinas Eléctricas, a partir de la creación de un Laboratorio Virtual que simule el proceso de dichas prácticas.

Abstract

In the race of Electrical Engineering at our center the subject Electrical Machines highly abstract form is studied, since students do not have access to laboratories of these teams, which strongly influences the academic achievement of students.

Virtual labs are a computer representation of traditional laboratories and allow for experiments, research, academic and scientific practices, giving the feeling of actual existence; support and promote student learning and increase the options available experiments in educational institutions.

Laboratory practices developed in electrical machines are laboratories in which are involved a number of human and material resources that often imply a greater than it can bear any financial outlays university department.

With the development of this research, the computerization of the teaching-learning process of the subject of Electrical Machines is proposed, from the creation of a virtual laboratory that simulates the process of such practices.

Tabla de Contenido

DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	6
1.1- INTRODUCCIÓN.....	6
1.2- TENDENCIAS Y TECNOLOGÍAS ACTUALES	6
1.3- SOFTWARE EDUCATIVO.....	7
1.3-1. <i>Educación Virtual</i>	7
1.3-2. <i>Definición del laboratorio virtual</i>	8
1.3-3. <i>Laboratorios Virtuales. Ventajas y Desventajas</i>	8
1.4- TENDENCIAS EN TECNOLOGÍA DE LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN.....	11
1.5- DESCRIPCIÓN Y FUNDAMENTACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS A UTILIZAR.....	12
1.5-1. <i>MATLAB</i>	13
1.6- MÁQUINAS ELÉCTRICAS.....	14
1.7- CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	17
CAPÍTULO II: APLICACIONES DEL LABORATORIO VIRTUAL A LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS EN LA DISCIPLINA DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS.....	19
2.1- INTRODUCCIÓN	19
2.2- LABORATORIO VIRTUAL DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS.....	19
2.3- PROBLEMAS TIPOS POR ASIGNATURAS.....	24
2.3-1. <i>Máquinas Eléctricas III. (Asincrónica)</i>	24
2.3-2. <i>Máquinas Eléctricas IV (Sincrónicas)</i>	42
2.4- CONCLUSIONES.....	52
CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	53
EN ESTE CAPÍTULO SE REALIZARÁ UNA VALORACIÓN SOBRE EL TRABAJO REALIZADO. SE INICIARÁ HACIENDO UNA VALORACIÓN SOBRE LA REPERCUSIÓN DE LA COMPUTACIÓN EN LA DISCIPLINA HASTA VER COMO SE INCURSIONA EN LOS SISTEMAS DE EVALUACIÓN DE LA MISMA.....	53
3.1- VALORACIÓN FINAL SOBRE EL USO DE LA TÉCNICA DE COMPUTACIÓN EN LA DISCIPLINA.....	53
3.2- VALORACIÓN SOCIAL PARA LOS ESTUDIANTES.....	53
3.3- CRITERIO DE EVALUACIÓN DEL TRABAJO.....	54
3.4- CONCLUSIONES.....	54
CONCLUSIONES GENERALES.....	55
RECOMENDACIONES	56
BIBLIOGRAFÍA	57
ANEXOS.....	59

INTRODUCCIÓN

La informática o computación es la ciencia del tratamiento automático de la información mediante un computador (llamado también ordenador o computadora).[5]

Entre las tareas más populares que ha facilitado esta tecnología se encuentran: elaborar documentos, enviar y recibir correo electrónico, dibujar, crear efectos visuales y sonoros, maquetar folletos y libros, manejar la información contable en una empresa, reproducir música, controlar procesos industriales y jugar. La informática es un amplio campo que incluye los fundamentos teóricos, el diseño, la programación y el uso de las computadoras (ordenadores).

Debido al desarrollo de nuevas tecnologías, nuevos software de programación, nuevos componentes electrónicos y nuevos servicios de telecomunicaciones, ahora es más fácil desarrollar herramientas didácticas que soporten el proceso de enseñanza-aprendizaje en el **entorno digital**, pues se requiere material educativo que capture la atención de los estudiantes y los estimule al aprendizaje a través de escenarios interactivos e incoativos.

En los últimos años se han dado cambios importantes en el ámbito de la investigación relacionada con la enseñanza, combinándose dos líneas diferentes pero complementarias: por un lado, la formulación de nuevos modelos de enseñanza dirigidas hacia la construcción de un conocimiento significativo, y, por otro lado, la aplicación de las nuevas tecnologías de la información (ordenadores, medios audiovisuales y equipos multimedia), las cuales cada vez tienen una mayor influencia en la educación y suponen un nuevo material didáctico que permite a los estudiantes embarcarse en hábitos de aprendizaje interactivos.[11]

En el caso de la Educación Superior en Cuba debe asumir los desafíos de la era digital, pues si no cuenta con ese vital recurso es imposible aspirar a crecer económicamente y ser competitivo. Existe la voluntad política y el capital

humano requerido, solo quedaría trabajar en el mejoramiento de la infraestructura tecnológica y organizativa.

La enseñanza y el aprendizaje, dentro del ámbito de la Ingeniería, de ciertas áreas específicas tales como la fabricación, equipos y tecnologías (entre otras) requieren etapas de formación práctica que ayuden a consolidar el aprendizaje teórico.

Su realización suele desarrollarse en laboratorios en los que se ven involucrados una serie de recursos materiales y humanos que en muchas ocasiones suponen desembolsos económicos mayores de los que puede soportar cualquier departamento universitario o incluso una universidad. Además, la puesta en marcha de las máquinas y los dispositivos para la realización de las sesiones prácticas entraña ciertos riesgos, asociados a la manipulación de los mismos por personas no expertas, que pueden derivar en daños tanto personales como materiales.

Un elemento clave en la enseñanza universitaria de ingeniería es la necesidad de tiempo y equipamientos que permita a los estudiantes familiarizarse con las técnicas de laboratorio de forma coordinada con las clases teóricas impartidas.

Una solución a estos problemas se puede encontrar en la aplicación de los avances tecnológicos a la docencia e investigación, mediante la creación de laboratorios virtuales (LV). Un LV puede facilitar la realización de prácticas o experiencias a un mayor número de estudiantes, aunque alumnos y laboratorios no coincidan en un espacio físico. Permite además, simular muchos fenómenos físicos y modelar sistemas, conceptos abstractos, situaciones hipotéticas, controlando la escala de tiempo, la frecuencia, etc., ocultando si así se requiere el modelo matemático y mostrando solo el fenómeno simulado, e inclusive de forma interactiva, llevando el laboratorio al alcance de los estudiantes.

Los laboratorios virtuales son una representación informática de los Laboratorios tradicionales y permiten realizar experimentos, investigaciones,

prácticas académicas y científicas, dando la sensación de su existencia real; apoyan y promueven el aprendizaje de los estudiantes y aumentan las opciones de experimentos disponibles en las instituciones educativas.

Mediante el empleo de los laboratorios virtuales es posible optimizar el tiempo, el espacio, así como los equipos de laboratorio, de forma que no es necesario permanecer físicamente en el laboratorio para el desarrollo de prácticas.

Hoy día, los laboratorios virtuales están emergiendo como llave de esta tendencia pedagógica. Las herramientas empleadas se han incrementado y adaptado en diferentes aplicaciones creando diferentes actividades con aplicación en las ciencias sociales, humanidades, artes e ingenierías, entre otras.

Las principales características del laboratorio virtual son incorporar la computadora, y en general las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC), en la enseñanza para propiciar el aprendizaje significativo a través de la experimentación.

En el Instituto Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez” (ISMMM) actualmente no existen laboratorios para los estudiantes en la asignatura Máquinas Eléctricas de la carrera de Ingeniería Eléctrica.

En la asignaturase plantean los problemas con datos reales, por lo que el volumen y la complejidad del cálculo son grandes. Esto hace que en la clase práctica no se pueda resolver en términos de valores numéricos el ejercicio, aunque sí en forma literal y establecer un algoritmo de cálculo. Luego, la parte de la lógica de los resultados no se puede observar y por supuesto dar conclusiones reales.

Esta problemática afecta el aprovechamiento académico de los estudiantes. En respuesta a las irregularidades mencionadas, se define como **problema científico** ¿Cómo favorecer el aprovechamiento de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Eléctrica en la asignatura de Máquinas Eléctricas?

El **objeto de estudio** de la investigación, es la informatización del proceso de enseñanza-aprendizaje de la asignatura de Maquinas Eléctricas y el **campo de acción** los laboratorios virtuales de máquinas eléctricas.

El **objetivo general** de esta investigación consiste en elaborar un Laboratorio Virtual que simule y desarrolle esquemas de ensayos de las diferentes maquinas eléctricas.

Para dar respuesta al problema científico, planteamos como **idea a defender** que: si se implementa un Laboratorio Virtual que simule y desarrolle esquemas de ensayos de máquinas eléctricas, se favorecerá el aprovechamiento de los estudiantes en la asignatura.

Como **Objetivos específicos** tenemos:

1. Establecer el estado del arte sobre los laboratorios virtuales y su uso en las asignaturas.
2. Desarrollar esquemas, con MATLAB, para la simulación de las prácticas seleccionadas previamente con el procedimiento para su ejecución.
3. Elaborar un laboratorio virtual para la simulación de las prácticas seleccionadas previamente con el procedimiento para su ejecución.

Abstracto a lo concreto.

El tránsito de lo concreto sensorial hacia lo abstracto y de ahí hacia lo concreto pensado se efectúa sobre la base de la práctica y comprende, fundamentalmente procedimientos como el análisis y la síntesis.

Análisis y Síntesis.

El **análisis** permite estudiar el comportamiento de cada una de las partes, así como definir los elementos y aspectos que ejercen una influencia decisiva en las otras partes del objeto de investigación y determinan su comportamiento.

Sobre la base de la generalización de algunas características definidas como resultado del análisis, la **síntesis teórica** lleva a la formulación de leyes, teorías

e hipótesis que explican la conducta del objeto de investigación en el momento actual, su comportamiento futuro, así como favorecer el poder predecir su desarrollo en condiciones específicas.

Inducción deducción.

El **método inductivo** tuvo una gran importancia en la etapa de recogida del material empírico, su base directa es la repetición de los hechos y fenómenos de la realidad (dificultades de los estudiantes en las clases prácticas y los laboratorios de máquinas), encontrando los rasgos comunes en un grupo definido para llegar a conclusiones de los aspectos que lo caracterizan.

Histórico Lógico

Permitió conocer la lógica del desarrollo del objeto de la investigación y que cambios han afectado la lógica de su desarrollo.

Enfoque de sistema.

Este método proporciona la orientación general para el estudio de los fenómenos relacionados con los laboratorios virtuales como una realidad integral formada por componentes que cumplen determinadas funciones y mantienen formas estables de interacción.

Este método está dirigido a modelar el objeto mediante la determinación de sus componentes, así como las relaciones entre ellos, las que determinan por un lado la estructura del objeto y por otro su dinámica, su movimiento.

El presente trabajo consta de introducción, 3 capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

CAPÍTULO I: Fundamentos Teóricos.

1.1- Introducción

El objetivo de este capítulo es:

Establecer el marco teórico que sustenta la investigación, a partir del análisis de los trabajos precedentes y la selección del lenguaje de programación a emplear para la construcción del laboratorio virtual.

1.2- Tendencias y tecnologías actuales

En la actualidad el desarrollo de las Tecnologías de la Información y las comunicaciones (TIC) han tomado un lugar cimero dentro del mundo desarrollado. No se puede hablar de progreso sino se tiene en cuenta el uso de la informática y las comunicaciones.

La gestión de la información y los conocimientos adquieren un papel protagónico donde se quiera lograr buenos resultados ya sea en el campo investigativo, de formación, producción o servicios. Gracias a la constante evolución de las tecnologías en las diferentes ramas de la informática y las comunicaciones estos resultados serán muy superiores cualitativa y cuantitativamente luego de su aplicación.

Las clases teóricas se han enriquecido con presentaciones cada vez más elaboradas, donde se han integrado el texto, la imagen, la animación y el vídeo, permitiendo al alumno comprender mejor los fenómenos involucrados.

En general la Educación Superior no ha estado ajena a estos adelantos. En particular en el ISMMM, en la carrera de Ingeniería Eléctrica donde ya se ponen de manifiesto los primeros intentos de su utilización. En la disciplina Máquinas Eléctricas, el ordenador se está convirtiendo en un elemento fundamental tanto de las clases teóricas como en el laboratorio.

El aprendizaje autónomo en las carreras de ingeniería donde el componente práctico del proceso de aprendizaje es importante, requiere de medios innovadores que motiven y ayuden al estudiante a consolidar el resultado de su

esfuerzo individual. Para ello son necesarias nuevas herramientas que complementen y refuercen las actividades de estudio en base a libros, notas, consultas en bibliotecas o mediante buscadores en Internet. Estas herramientas facilitadoras del aprendizaje autónomo deberían incluir la experimentación mediante laboratorios virtuales (simuladores) o laboratorios remotos en entorno web o aplicación residente en ordenador personal. Con dicha finalidad en este trabajo se presenta el uso de los laboratorios virtuales aplicados al aprendizaje de las Máquinas Eléctricas para potenciar su uso y favorecer el proceso de aprendizaje de los estudiantes.

Los laboratorios virtuales se han utilizado como ayuda para conseguir cambios conceptuales debido a la facilidad disponible para alterar rápidamente y a voluntad, parámetros y entornos experimentales sin las complicaciones que se derivan de su manipulación real.

1.3- Software Educativo

Se denomina software educativo al destinado a la enseñanza y el aprendizaje autónomo que además, permite el desarrollo de ciertas habilidades cognitivas.[3]

Como existen profundas diferencias entre las filosofías pedagógicas, también existe una amplia gama de enfoques para la creación de un software educativo, atendiendo a los diferentes tipos de interacción que debería existir entre los actores del proceso de enseñanza-aprendizaje: educador, aprendiz, conocimiento y computadora.

Como software educativo tenemos desde programas orientados al aprendizaje hasta sistemas operativos completos destinados a la educación.

1.3-1. Educación Virtual

La educación virtual es, sin duda, uno de los espacios donde se presentan los más grandes cambios haciendo uso de los desarrollos tecnológicos. Un modelo de educación virtual toma ventaja de un modelo estándar, pues la implementación de tecnologías de comunicación generan servicios de valor

agregado para soportar los múltiples procesos y actividades presentes en los ambientes de la educación especialmente proporcionando servicios especializados de soporte en [7]

1. Asuntos administrativos tales como: inscripción de asignaturas, pago de matrícula, entre otros, es decir utilizando los denominados Programas Aplicados a la Educación.

2. En procesos académicos como: cursos virtuales, documentos de referencia, laboratorios interactivos de simulación, etc., con programas diseñados con fines directamente educativos y conocidos como “software educativo”.

1.3-2. Definición del laboratorio virtual

Adoptando una perspectiva amplia según la reunión de expertos sobre laboratorios virtuales de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura en París en el 2000 se define el laboratorio virtual como: *“un espacio electrónico de trabajo concebido para la colaboración y la experimentación a distancia con objeto de investigar o realizar otras actividades creativas, y elaborar y difundir resultados mediante tecnologías difundidas de información y comunicación”*. [3]

Un laboratorio virtual es diferente de un “laboratorio verdadero” o de un “laboratorio tradicional”. Sin embargo, no se considera que el laboratorio virtual vaya a suplantar a los verdaderos laboratorios o competir con ellos; en cambio, los laboratorios virtuales constituyen una posible extensión de los verdaderos laboratorios, y abren nuevas perspectivas que no se podían explorar completamente dentro de un verdadero laboratorio a un costo asequible.

1.3-3. Laboratorios Virtuales. Ventajas y Desventajas.

Se considera que tres son las principales razones que inducen a la formación y puesta en funcionamiento de un laboratorio virtual.

- ✓ Un proyecto determinado puede requerir verdaderamente una estructura de laboratorio virtual.

- ✓ Es posible que los especialistas necesiten tener acceso a instalaciones de gran escala que podrá lograrse mediante un laboratorio virtual (comunicación “de persona a equipo” y “de persona a metamáquina”).
- ✓ Las interacciones más generales entre miembros de una comunidad de especialistas de la misma disciplina pueden facilitarse gracias a un laboratorio virtual que permitirá constituir equipos, definir proyectos conjuntos y mancomunar esfuerzos para recaudar fondos.

Un laboratorio virtual centrado en un proyecto tiene un objetivo bien definido y una duración determinada. El proyecto puede ser una investigación encaminada a preparar un importante dispositivo experimental por ejemplo, un detector para un acelerador de alta energía en el terreno de la física. Otro podría ser la solución de un determinado problema relacionado con el medio ambiente, por ejemplo, elaborar un plan para limpiar un lago contaminado por desechos industriales. De manera más amplia, otros tipos de colaboración intelectual o creativa pueden asimilarse a la investigación” en un laboratorio virtual, por ejemplo, los médicos que participan en consultas de telemedicina” y los artistas que colaboran en la creación de medios de comunicación electrónicos.

Ventajas de los Laboratorios Virtuales (LV)

- Reduce drásticamente el costo de instalación y mantenimiento de un laboratorio eléctrico.
- Brinda un ambiente propicio para el autoaprendizaje donde el estudiante tiene plena libertad de modificar las variables de entrada y configuración del sistema bajo análisis, además de aprender el uso y manejo de instrumentos ofreciendo una personalización del experimento casi completa.
- Mediante la simulación permite una visión mucho más intuitiva de aquellos fenómenos que en su contraparte convencional, no pueden ser observados con la suficiente claridad gráfica.

- Grandes cambios e innovaciones en el proceso de enseñanza, permite obtener las competencias necesarias en un menor tiempo.
- Puede enriquecer el proceso tradicional de modelar matemáticamente un sistema bajo estudio para posteriormente desarrollar una práctica de laboratorio. Estos dos procesos pueden ser complementados por una serie de elementos multimedia que guíen al estudiante en su autoaprendizaje.
- Se puede experimentar libremente las veces que quiera sin el miedo a sufrir o provocar un accidente, sin avergonzarse de realizar necesaria la misma práctica hasta obtener la competencia necesaria.
- El estudiante puede asistir al laboratorio en cualquier momento, haciendo o usando las áreas que sean más significativas para él y recibir además la asesoría de sus profesores en los aspectos que lo requiera su autoaprendizaje.
- Puede complementarse con aplicaciones y actividades diseñadas para facilitar la construcción de su propio conocimiento.

Desventajas de los Laboratorios Virtuales (LV)

Un laboratorio virtual también presenta desventajas, por mencionar solo algunas podemos decir que:

- No puede sustituir del todo la experiencia práctica altamente enriquecedora del instrumento real. Hay situaciones prácticas que solo pueden realizarse en un equipo físico de laboratorio o prototipo educativo. No obstante, un LV puede ser una herramienta complementaria valiosa en experiencias educativa como por ejemplo: teoría de circuitos, sistemas de control, dinámica de fluidos, etc.
- En los LV, como en cualquier sistema de enseñanza a distancia, se corre el riesgo de que el estudiante se comporte como un simple espectador, por lo que el diseño instruccional de las experiencias educativas, debe contemplar que las actividades vengan acompañadas de un guión, guía

o manual de prácticas y proceso de evaluación que ayude que los objetivos se cumplan.

- Las actividades a realizar deben ser perfectamente planeadas con actividades ordenadas y progresivas que conlleve a que el estudiante alcance las competencias que la entidad requiere.
- Puede provocar en el estudiante una pérdida parcial de la visión de la realidad que se estudia. Además, no siempre se pueden simular todos los procesos reales lo que implica una cuidadosa revisión del diseño educativo por parte de los profesores.
- Se deben seleccionar los contenidos relevantes y tratar de que estos resulten lo suficientemente atractivos para mantener la atención del estudiante.
- No todas las instituciones educativas cuentan con un área de desarrollo de software de apoyo académico que den soporte al diseño e instalación de LV.

1.4- Tendencias en tecnología de lenguajes de Programación

El lenguaje de programación es un lenguaje que puede ser utilizado para controlar el comportamiento de una máquina, especialmente una computadora. Permite a los programadores especificar sobre qué datos la computadora debe operar, cómo estos deben ser almacenados, y qué acciones debe tomar ante cada circunstancia previamente definida. Al ser un estándar de escritura permite a más de un programador trabajar de forma colaborativa en la construcción de un programa.

En el transcurrir de los años y a medida que la tecnología ha avanzado, se han desarrollado diferentes lenguajes de programación cada uno con características y objetivos específicos distintos pero todos con la misma finalidad, la comunicación hombre-máquina a través de una estructura sintáctica similar al lenguaje común utilizado en la vida diaria, como por ejemplo, la utilización de métodos numéricos para resolver problemas.

Los métodos numéricos son herramientas muy poderosas para la solución de problemas usando operaciones aritméticas combinadas con programación por ejemplo, se encarga de diseñar algoritmos para, a través de números y reglas matemáticas simples, simular procesos matemáticos más complejos y pueden ser aplicados para resolver procedimientos matemáticos como: cálculo de derivadas, integrales, ecuaciones diferenciales, operaciones con matrices, interpolaciones, ajuste de curvas, polinomios, etc. Además, son de gran utilidad en áreas como: eléctrica, mecánica, ingeniería informática, industrial, química, civil y otras. Por estas razones es de gran importancia el estudio de esta materia.

1.5- Descripción y Fundamentación de las herramientas a utilizar.

La elección de un programa de simulación adecuado es un aspecto fundamental en el desarrollo de las herramientas didácticas. Por un lado se pueden utilizar programas específicos de simulación, por ejemplo Multisim®, Orcad®, LabView, entre otros. Estos programas están diseñados para simular principalmente el comportamiento de los circuitos eléctricos y disponen de una interfaz gráfica muy elaborada, un alto grado de interactividad, capacidad multiusuario y la flexibilidad necesaria para comunicarse con los usuarios, que se asemeja mucho al entorno que se encontrará el alumno cuando llegue al laboratorio real, pero son demasiado rígidos y no pueden modificarse fácilmente. Además, el precio de las licencias es un inconveniente adicional, aunque la mayoría de estos programas dispone de versiones de demostración que son suficientes para realizar las simulaciones más elementales.

La otra posibilidad consiste en utilizar programas de propósito general de cálculo numérico o simbólico del tipo MATLAB® [15], MATHCAD® [8], MAPLE® [14], etc. Estos programas son muy potentes y permiten integrar pantallas, imágenes y vídeos de forma sencilla pero requieren un elevado tiempo de aprendizaje tanto por parte del profesor como por parte del alumno para dominar los aspectos más complejos de su programación. Su principal ventaja

radica en que son más flexibles que los programas de simulación específicos, de forma que pueden integrarse fácilmente en el proyecto docente del alumno.

Tenido en cuenta el resultado final que queremos alcanzar al desarrollar este software, para la disciplina de Máquinas Eléctricas se decide utilizar como entorno de trabajo el software matemático MATLAB porque es una de las herramientas más utilizadas por los estudiantes en distintas asignaturas de la carrera Ingeniería Eléctrica y por esta razón tienen una buena preparación del programa.

1.5-1. MATLAB

Es un lenguaje de programación desarrollado por TheMathworks, MATLAB. Nace como resultado de tratar de satisfacer las necesidades computacionales de científicos, ingenieros y matemáticos, por lo que el desarrollo de MATLAB comprende un potente lenguaje de alto nivel y la incorporación de funciones gráficas más allá de los lenguajes de programación C y Fortran.

Actualmente, se incorporan herramientas diversas tales como Simulink, que sirve para simular sistemas dinámicos, además de diferentes herramientas para la industria, estadísticas, financieras, científicas y para ingeniería.

Características

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de **interfaces de usuario (GUI)** y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets).

Interfaces de usuario (GUI)

La interfaz gráfica de usuario, conocida también como GUI (del inglés graphical user interface) es un programa informático que actúa de interfaz de usuario, utilizando un conjunto de imágenes y objetos gráficos para representar la información y acciones disponibles en la interfaz. Su principal uso, consiste en proporcionar un entorno visual sencillo para permitir la comunicación con el sistema operativo de una máquina o computador.[13]

Habitualmente las acciones se realizan mediante manipulación directa para facilitar la interacción del usuario con la computadora. Surge como evolución de las interfaces de línea de comandos que se usaban para operar los primeros sistemas operativos y es pieza fundamental en un entorno gráfico. Como ejemplos de interfaz gráfica de usuario cabe citar los entornos de escritorio Windows, el X-Window de GNU/Linux o el de Mac OS X y Aqua.

En el contexto del proceso de interacción persona-ordenador, la interfaz gráfica de usuario es el artefacto tecnológico de un sistema interactivo que posibilita a través del uso y la representación del lenguaje visual, una interacción amigable con un sistema informático.

1.6- Máquinas eléctricas

Las máquinas eléctricas son el resultado de una aplicación inteligente de los principios del electromagnetismo y en particular de la ley de inducción de Faraday. Las máquinas eléctricas se caracterizan por tener circuitos eléctricos y magnéticos entrelazados. Durante todo el proceso histórico de su desarrollo desempeñaron un papel rector que determinaba el movimiento de toda la ingeniería eléctrica, merced a su aplicación en los campos de la generación, transporte, distribución y utilización de la energía eléctrica. Las máquinas eléctricas realizan una conversión de energía de una forma a otra, una de las cuales, al menos, es eléctrica. En base a este punto de vista estrictamente energético es posible clasificarlas en tres tipos fundamentales:

a) **GENERADORES:** que transforman la energía mecánica en eléctrica. La acción se desarrolla por el movimiento de una bobina en un campo magnético resultando una f.e.m. inducida que se aprovecha en el exterior.

b) **MOTORES:** transforman la energía eléctrica en mecánica. La acción se desarrolla introduciendo una corriente en la máquina por medio de una fuente de alimentación exterior. La corriente anterior interacciona con un campo magnético inductor resultando un par que produce el movimiento de la máquina.

e) **TRANSFORMADORES:** transforman la energía eléctrica de entrada con determinada tensión y corriente en otra energía eléctrica de salida, de magnitudes de tensión y corriente diferentes.

Los generadores y motores tienen un acceso mecánico y por ello son máquinas dotadas de movimiento que normalmente es de rotación; por el contrario, los transformadores son máquinas eléctricas que tienen únicamente accesos eléctricos y son máquinas estáticas.

Cada máquina en particular cumple el principio de reciprocidad electromagnética, lo cual quiere decir que son reversibles, pudiendo funcionar como generador o como motor (en la práctica, existe en realidad alguna diferencia en su construcción, que caracteriza uno u otro modo de funcionamiento). El estudio de las máquinas eléctricas ha experimentado grandes cambios en su exposición a lo largo de la historia. El análisis tradicional consistía en estudiar independientemente cada una de las máquinas por separado, destacando las diferencias entre ellas desde el punto de vista de funcionamiento, diseño, construcción, etc.

Las prácticas de laboratorios de máquinas eléctricas suelen desarrollarse en laboratorios en los que se ven involucrados una serie de recursos materiales y humanos que en muchas ocasiones llegan a hacer de un elevado precio. La falta de una infraestructura de equipamiento adecuada limita el número de las prácticas de laboratorio posibles. Además, la puesta en marcha de las máquinas y los dispositivos para la realización de las sesiones prácticas entraña ciertos

riesgos, asociados a la manipulación de los mismos por personas no expertas que pueden derivar en daños tanto personales como materiales. La no existencia de dichos laboratorios para los estudiantes del ISMMM es una debilidad en la formación del estudiante para su desarrollo como futuros ingenieros.

Por ello, el uso de la simulación de experiencias de laboratorio resulta una opción atractiva como instancia superadora de los inconvenientes anteriores. Las simulaciones integradas en formas de laboratorio virtual permiten que el alumno pueda experimentar sin necesidad de estar en el espacio físico del laboratorio, constituyéndose así en modalidades semipresenciales de alto poder formativo.

La posibilidad de acceder a la realización de estas actividades prácticas de forma no presencial, posibilitaría superar algunos de los inconvenientes mencionados del laboratorio tradicional: flexibilización de horarios de realización y manejo de instrumentos caros o peligrosos.

Un laboratorio virtual para máquinas eléctricas es un sistema basado en el uso de la computadora y software específico de aplicación que aproxima el ambiente de trabajo al de un laboratorio tradicional. Se realizan experiencias similares a las del laboratorio real utilizando aplicaciones informáticas que incluyen obtención numérica, gráfica de resultados y esquemas.

La inserción de un Laboratorio Virtual para simular las diferentes clases prácticas que se implementarán y que ayude a los estudiantes a entender mejor este proceso, así como un mejor estudio del comportamiento y el funcionamiento de las máquinas eléctricas facilitando por una parte la labor del profesor, ya que podrá dedicar menos tiempo a la tediosa manipulación numérica y más a las deducciones básicas. Por otra parte, facilitan el autoaprendizaje del alumno, le servirán para comprender mejor la teoría presentada lo que permite afianzar las ideas de un modo progresivo sin dejar lagunas en la interpretación de los conceptos implicados. Con ello se pretende

ayudar al profesor en la búsqueda de nuevos problemas para realizar en clase y facilitar el trabajo del alumno, para que pueda comprobar su propio progreso y nivel de conocimientos.

La simulación es una técnica que envuelve la determinación del modelo de una representación real y la ejecución de experimentos sobre el modelo. El estudiante mediante la simulación podrá analizar y comparar las características de comportamiento del motor o de la máquina explorando toda la problemática con rapidez y exactitud.

Estas características son:

- Corriente.
- Potencia.
- Eficiencia.
- Factor de Potencia.
- Momento electromagnético.

Que de manera convencional es muy difícil realizarse.

En este capítulo quedan definidos los conceptos fundamentales a seguir durante el desarrollo del software, a partir de su lectura se permite ubicar al lector en el alcance de la tesis, los problemas presentes, así como los objetivos generales y específicos que se persiguen. Se llevó a cabo un estudio de las tendencias y tecnologías que se desarrollan en la actualidad que permiten que se puedan crear aplicaciones más potentes, confiables y cómodas. Se plasmaron los principales problemas con que cuenta las prácticas de laboratorios en la asignatura máquinas eléctricas.

1.7- Conclusiones del Capítulo

Los laboratorios virtuales son una solución para los problemas existentes de la disciplina de máquinas eléctrica de la carrera eléctrica del ISMMM. El MATLAB es una aplicación viable para desarrollar los laboratorios virtuales de la asignatura maquinas eléctricas y así favorecer el aprovechamiento de los estudiantes.



CAPÍTULO II: Aplicaciones del laboratorio virtual a la solución de problemas en la disciplina de Máquinas Eléctricas.

2.1- Introducción

En este capítulo se describen los fundamentos teóricos relacionados con las prácticas y como se realizan en el laboratorio virtual, para el estudio del comportamiento de las máquinas eléctricas. Esta herramienta permite:

- Mejorar la comprensión de ciertos aspectos teóricos.
- Completar diversos aspectos de las prácticas, permitiendo aprender y simular los procedimientos que se llevarán a cabo.
- Completar los conocimientos adquiridos en las clases de problemas mediante la utilización del software en la resolución de ejercicios numéricos.

En este capítulo se tratarán algunas recomendaciones teóricas de los contenidos, para la solución de ejercicio con el MATLAB en la asignatura de Máquinas Eléctricas III y IV, aunque se presentan ejercicios de toda la disciplina.

2.2- Laboratorio Virtual de máquinas eléctricas

Esta aplicación contiene un conjunto de programas realizado con MATLAB para la disciplina de Máquinas Eléctricas. Se pretende lograr las habilidades de cálculo, representación gráfica y simulación en Transformadores, Motores de Corriente Directa, Motores de Inducción y Máquinas Síncronas.



Fig. 2.1- Ventana Principal

Es muy importante centrar la atención del alumno en aquellos aspectos teórico-prácticos que se quieren reforzar utilizando las simulaciones, evitando que pierda mucho tiempo programando las mismas. Por ello, se ha tratado de facilitar su labor construyendo una interfaz de ventanas gráficas sencillas y unos ficheros de Simulink donde sólo se muestre al alumno los aspectos fundamentales del modelo, sin necesidad de conocer el funcionamiento complejo de la simulación y haciendo que sea lo más próximo a la realidad.

Para el trabajo con el Laboratorio Virtual, se sigue la siguiente secuencia:

- En el apartado de Transformadores hacer clic sobre el botón **Entrar**, aparece la siguiente ventana Fig. 2.2, se obtiene un menú de las prácticas de laboratorios a desarrollar en este tipo de máquina como por ejemplo: tipos de funcionamientos de los transformadores, cálculo de la variación de tensión, ensayo en vacío y en cortocircuito, entre otros.



Fig. 2.2- Selección de cálculos a realizar en Transformadores.

- En el apartado de Máquinas de Inducción hacer clic sobre el botón **Entrar**, aparece la siguiente ventana Fig. 2.3, se obtiene un menú de las prácticas de laboratorios a desarrollar en este tipo de máquina como por ejemplo: principio de funcionamiento, características mecánicas, ensayo en vacío, entre otros.

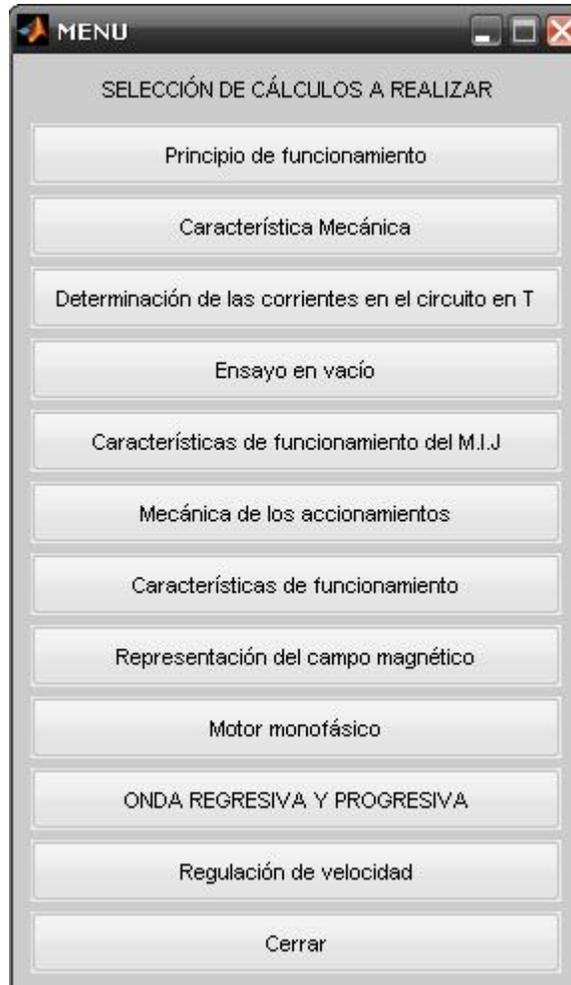


Fig. 2.3- Selección de cálculos a realizar en Máquinas Asíncronas.

- En el apartado de Máquinas de CD hacer clic sobre el botón **Entrar**, aparece la siguiente ventana Fig. 2.4, se obtiene un menú de las prácticas de laboratorios a desarrollar en este tipo de máquina como por ejemplo: arranques de motores de corriente directa, representación del campo magnético, característica de funcionamiento, entre otros.



Fig. 2.4- Selección de cálculos a realizar en Máquinas CD.

En el apartado de Máquinas Síncronas hacer clic sobre el botón **Entrar**, aparece la siguiente ventana Fig. 2.5, se obtiene un menú de las prácticas de laboratorios a desarrollar en este tipo de máquina como por ejemplo: característica en V de la máquina, característica de funcionamiento, característica mecánica individual, entre otros.

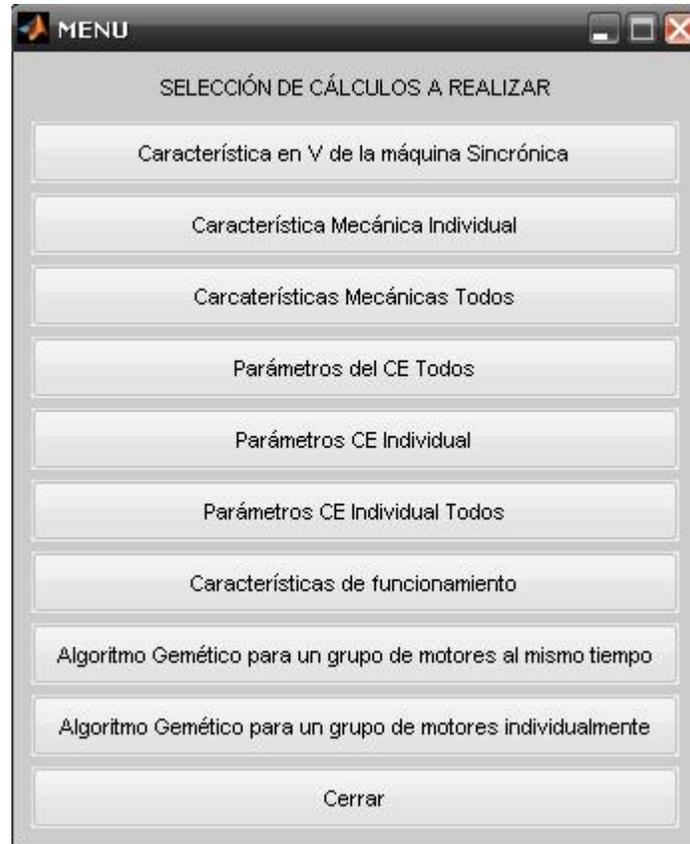


Fig. 2.5- Selección de cálculos a realizar en Máquinas CD.

2.3- Problemas tipos por asignaturas.

En esta parte se darán algunas recomendaciones teóricas de los contenidos que se tratan para la solución de ejercicios con el **MATLAB** en las asignaturas de Máquinas Eléctricas III y IV aunque se presentan ejercicios de toda la disciplina.

2.3-1. Máquinas Eléctricas III. (Asincrónica).

Distribución de la densidad del flujo magnético en el entrehierro.

Suponiendo que la onda de densidad de flujo tenga una forma simétrica con respecto al eje de las abscisas y también con respecto a los ejes polares, en este caso la forma de onda de la densidad del flujo, además de los armónicos



primero y segundo, contienen armónicos más altos de orden impar solamente: $\nu = 3, 5, \dots$ es decir $\nu = 2K \pm 1$. Todos estos armónicos cruzan al eje de las abscisas en los puntos comunes a, d, etc.

Cada armónico de densidad de flujo determina el correspondiente armónico de flujo a saber:

$$\Phi_1 = t l B_{m1} = \frac{2}{\pi} t l B_{m1}$$

$$\Phi_\nu = \frac{t}{\nu} l B_{m\nu} = \frac{2}{\pi} \frac{\tau}{\nu} l B_{m\nu}$$

donde:

Φ_1, Φ_ν : Flujo del armónico fundamental y de orden ν en Weber (Wb).

ν : Número de armónico.

B_m : Valor máximo de la inducción magnética (densidad del flujo magnético) expresado en Tesla (T).

τ : Paso polar (m).

$$\tau = \frac{\tau d}{2p}$$

d : diámetro interior del estator.

p : Número de pares de polos.

l : Longitud del acero activo.



Campo magnético giratorio.

Cuando hay presentes tres fuerzas magnetomotrices (ff.mm.mm) sinusoidales en un estator, separadas 120° , se sustituye cada una de ellas por las ff.mm.mm sinusoidales que tienen amplitud iguales a la mitad de la amplitud de la f.m.mpulsatoria y que se desplazan en sentidos contrarios. En este caso las ff.mm.mm progresivas en sentidos opuestos al de rotación del rotor se anulan ya que se desplazan 120° entre sí, mientras las ff.mm.mm que se desplazan en el mismo sentido que el rotor se suman y producen una ff.mm resultante sinusoidal en el espacio con amplitud igual a $\frac{3}{2}$ multiplicado por la máxima amplitud de la ff.m.mpulsatoria que se desplaza simultáneamente con el rotor.

Se pueden expresar las ecuaciones de f.m.m siguientes.

$$F_a(t, a) = [F_{ph1} \cos a + F_{ph3} \cos 3a + F_{ph5} \cos 5a + \dots F_{ph\nu} \cos \nu a + \dots] \text{sen } t'$$

$$F_b(t, a) = \left[F_{ph1} \cos \left(a - \frac{2\pi}{3} \right) + F_{ph3} \cos 3 \left(a - \frac{2\pi}{3} \right) + F_{ph5} \cos 5 \left(a - \frac{2\pi}{3} \right) + \dots \right. \\ \left. \dots + F_{ph\nu} \cos \nu \left(a - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \text{sen} \left(t' - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$F_c(t, a) = \left[F_{ph1} \cos \left(a - \frac{4\pi}{3} \right) + F_{ph3} \cos 3 \left(a - \frac{4\pi}{3} \right) + F_{ph5} \cos 5 \left(a - \frac{4\pi}{3} \right) + \dots \right. \\ \left. \dots + F_{ph\nu} \cos \nu \left(a - \frac{4\pi}{3} \right) \right] \text{sen} \left(t' - \frac{4\pi}{3} \right)$$

La f.m.m resultante correspondiente a cada armónico se puede hallar sumando los armónicos dados de las tres fases donde obtenemos la expresión siguiente:

$$F_1(t, a) = \frac{3}{2} F_{ph1} \text{sen}(wt - a) = f_1 \text{sen}(wt - a)$$



Armónico de fuerza magnetomotriz.

La f.m.m de las tres fases incluyendo todos los armónicos es:

$$F(t, a) = F_1 \text{sen}(t' - a) + F_5 \text{sen}(t' + 5a) + F_7 \text{sen}(t' - 7a) + F_{11} \text{sen}(t' + 11a) + F_{13} \text{sen}(t' - 13a) + \dots + F_\nu \text{sen}(t' \pm \nu a)$$

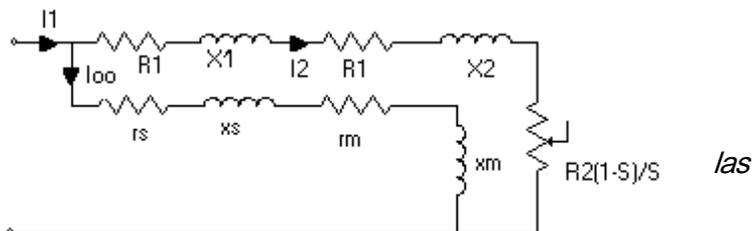
En la expresión de la f.m.m resultante todos de orden $\nu = 3K$ (múltiplo de tres) se cancelan. Todos los armónicos de orden $\nu = 6K - 1$, es decir $\nu = 5, 11, 17, \dots$ tienen el múltiplo $\text{sen}(wt + \nu a)$ y por consiguiente giran a la izquierda en sentido contrario al del desplazamiento de la onda fundamental.

Todos los armónicos de orden $\nu = 6K + 1$ es decir, $\nu = 1, 7, 13, \dots$ en el mismo sentido que la onda fundamental y el rotor.

Trabajo con el circuito equivalente.

El circuito equivalente en T no resulta cómodo para el estudio del proceso que tiene lugar en una Máquina de Inducción. Es más cómodo el circuito equivalente en L, en que el circuito de rama magnetizante está unido a los bornes del primario y la corriente existente en él cuando varía la carga por consiguiente, durante la variación del deslizamiento permanece constante e igual a la corriente existente en condiciones ideales de sincronismo en vacío para $S=0$.

Corrientes por todas ramas.





$$R_1 = \sigma_1 \cdot r_s \sigma = 1 + \frac{Z_s}{Z_m} \sigma = 1 + \frac{X_s}{X_m} I_1 = \frac{U}{Z_{eq}}$$

$$R_2 = \sigma_2 \cdot r_2 Z_0 = (r_s + r_m) + j(x_s + x_m) I_{00} = \frac{U}{Z_0}$$

$$X_1 = \sigma_1 \cdot x_s Z_s = \left(R_s + \frac{R_r}{S} \right) + j(X_s + X_r) I_r = \frac{U}{Z_s}$$

$$X_2 = \sigma_2 \cdot x_2 Z_{eq} = \frac{Z_s \cdot Z_0}{Z_s + Z_0}$$

Características de funcionamiento.

Lo mismo que para el motor síncrono, las características de servicio de un motor de inducción son las que dan las relaciones n, M, η y $\cos \phi = f(P_2)$ cuando U_1 y f_1 son constantes.

Además, son importantes los datos siguientes: factor de capacidad de sobre carga k_m y, en los motores de jaula, las razones de las corrientes de arranque a la corriente nominal y del par de arranque al par nominal.

El deslizamiento de un motor de inducción es pues cuantitativamente igual a la razón de las pérdidas p_{cob2} en el devanado del rotor a la potencia electromagnética P_{em} desarrollada por el motor. La pérdida en vacío p_{cob2} es muy pequeña comparada con la potencia P_m y tenemos $s \approx 0$ y $n \approx n_1$. La razón

$s = \frac{P_{cob2}}{P_{em}}$ aumenta con la carga, pero para obtener un alto rendimiento del motor

la carga debe estar limitada en un margen muy estrecho. Los valores nominales

de carga suelen ser $\frac{P_{cob2}}{P_{em}} \approx \frac{P_{cob2}}{P_2} = 1.5$ a 5.0 . Los valores más pequeños

corresponden a los motores más grandes, los más grandes a los motores pequeños de 3 a 10 Kw.



La relación $n = f(P_2)$ representa una curva de muy poca inclinación al eje de las abscisas. Esto indica que el motor de inducción tiene una característica análoga a la del motor shunt de c.c.

En condiciones de régimen de funcionamiento $M = M_2 + M_0$, donde M_2 es el par útil de frenado de un motor y M_0 es el par en vacío. Como cuando varía la carga desde en funcionamiento en vacío a funcionamiento a plena carga la velocidad de los motores de inducción se mantiene casi constante, la relación $M = f(P_2)$ de un motor de inducción es casi lineal.

En los motores de inducción tienen lugar las mismas clases de pérdidas que en todas las otras máquinas eléctricas, es decir, pérdidas mecánicas, pérdidas en el acero, pérdidas en el cobre y pérdidas adicionales.

Razonando de la misma manera que el caso de los transformadores, podemos llegar a la conclusión de que el máximo rendimiento se alcanza cuando las pérdidas constantes y variables son iguales, así, mediante la correspondiente redistribución de las pérdidas podemos obtener motores cuyas curvas de rendimiento sean de formas diferentes. El rendimiento de los motores de poca potencia con rotores de jaula es más alto que el de los motores con rotor bobinado. El aumento de la tensión implica una cierta reducción no sustancial del rendimiento.

Lo mismo que en un transformador, un motor de inducción consume corriente en retardo tomada del circuito de potencia casi independientemente de la carga. Su factor de potencia es pues casi siempre menor que la unidad. En vacío el factor de potencia ($\cos \varphi$) no suele exceder de 0.2, pero entonces, al aumentar la carga, el factor de potencia aumenta rápidamente y alcanza un máximo con un valor de potencia que se aproxima mucho a la carga nominal. Cuando sigue aumentando la carga, la velocidad del motor disminuye; esto aumenta el ángulo



$\psi_2 = \arctg \frac{sX_2}{r_2}$ y disminuye $\cos \psi_2$ y $\cos \varphi$. Los motores grandes con rotor de jaula se construyen como motores de ranuras profundas y doble jaula y su $\cos \varphi$ es algo menor que el de los motores de rotor bobinado de la misma potencia. La capacidad de sobrecarga de un motor de inducción, o sea, su momento de torsión de parada, o par límite, es la razón del par máximo del motor a su par nominal, es decir $k_m = \frac{M_{m\acute{a}x}}{M_n}$. Usualmente para motores de potencias baja y media, $k_m = 1.6$ a 1.8 . Para motores de potencias media y grande $k_m = 1.8$ a 2.5 ; para motores de construcción especial, $k_m = 2.8$ a 3.0 y mayor.

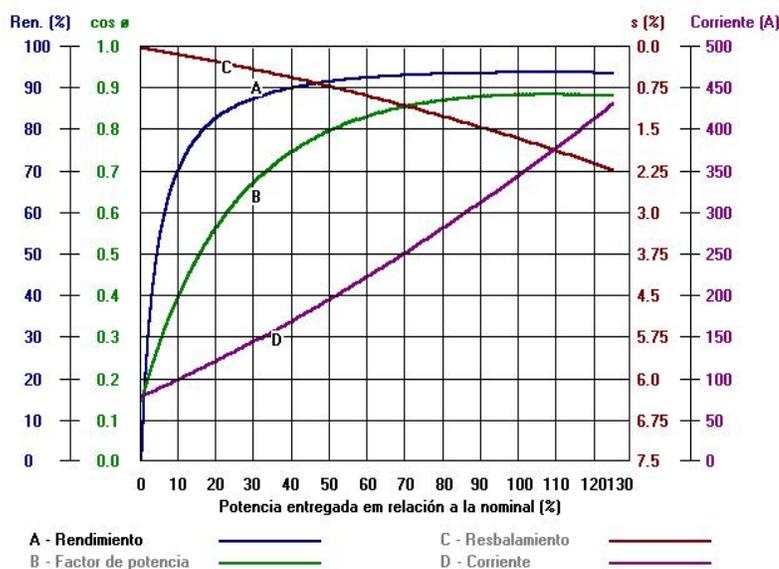


Fig. 2.6- Característica de funcionamiento del motor de inducción.

Regulación de velocidad

Los problemas del control de velocidad de los motores eléctricos en general y del motor de inducción en particular son de gran importancia en la práctica.

Los métodos de control de velocidad se clasifican según que el efecto principal ejercido sobre el motor sea:



- Desde el lado del estator.
- Desde el lado del rotor.

Se emplean los siguientes métodos de control de velocidad desde el estator:

- Variación de la tensión aplicada.
- Conmutación del número de pares de polos.
- Variación de la frecuencia del circuito de potencia.

Desde el lado del rotor la velocidad puede ser controlada:

- Variando la resistencia activa en el circuito del rotor.
- Introduciendo en el circuito del rotor una f.e.m adicional de la misma frecuencia que la f.e.m fundamental del rotor.
- Control de la velocidad del motor por cambio del número de polos.

La velocidad sincrónica está determinada por la relación siguiente:

$$n_1 = \frac{f_1}{p}$$

Si se da la frecuencia f_1 , entonces, cuando varía p también varía la velocidad n_1 y la velocidad del motor n . Pero en este caso el control de velocidad no se efectúa continuamente, sino por pasos o escalones. A menudo en dos pasos con una relación de velocidad 2:1, estos motores se llaman de dos velocidades.

- Control de velocidad por variación de la frecuencia del primario.

Este método de control de velocidad sólo es posible cuando el motor es alimentado por instalaciones especiales. El cambio de frecuencia en un amplio margen se puede efectuar haciendo que los generadores sincrónicos funcionen a velocidad variable y también utilizando instalaciones con convertidores iónicos.



Son posibles los siguientes casos principales de regulación de velocidad:

- a) Con par constante, es decir con M constante.
- b) Con potencia constante es decir con P_2 constante.
- c) Cuando el par es directamente proporcional al cuadrado de la frecuencia, es decir con $M \equiv f_1^2$.

Si se desea que el motor funcione a diferentes frecuencias con valores prácticamente constantes del rendimiento, el factor de potencia, la capacidad de sobrecarga y deslizamiento absoluto constante, entonces, con acero no saturado, durante el cambio de frecuencia se debe variar simultáneamente la tensión U_1 con relación a la frecuencia y al par de acuerdo con la siguiente ley:

$$\frac{U'_1}{U_1} = \frac{f'_1}{f_1} \cdot \sqrt{\frac{M'}{M}}$$

Aquí U'_1 y M' son la tensión y el par correspondiente a la frecuencia f'_1 , y U_1 y M corresponden a la frecuencia f_1 .

Cuando M es constante se tiene:

$$\frac{U'_1}{U_1} = \frac{f'_1}{f_1}$$

Es decir, la tensión aplicada al motor debe variar proporcionalmente a la frecuencia. Para potencia constante, el par del motor varía inversamente a la velocidad y por tanto la frecuencia, es decir:

$$\frac{M'}{M} = \frac{f_1}{f'_1}$$



Donde

$$\frac{U_1'}{U_1} = \sqrt{\frac{f_1'}{f_1}}.$$

$M \equiv f_1'^2$ se tiene :

$$\frac{U_1'}{U_1} = \left(\frac{f_1'}{f_1} \right)^2$$

es decir , la tensión del motor debe variar como el cuadrado de la frecuencia.

Sin embargo, en la práctica hay que apartarse algo de estas deducciones, primero porque el núcleo de acero de la máquina siempre está más o menos saturado y, segundo, porque las condiciones de refrigeración de la máquina varían con el cambio de velocidad.

En la Fig. 2.7 se muestran los esquemas más frecuentemente utilizados de enrollados con conmutación del número de pares de polos con relación p_2 :

$$p_1 = 2 : 1.$$

a)

b)

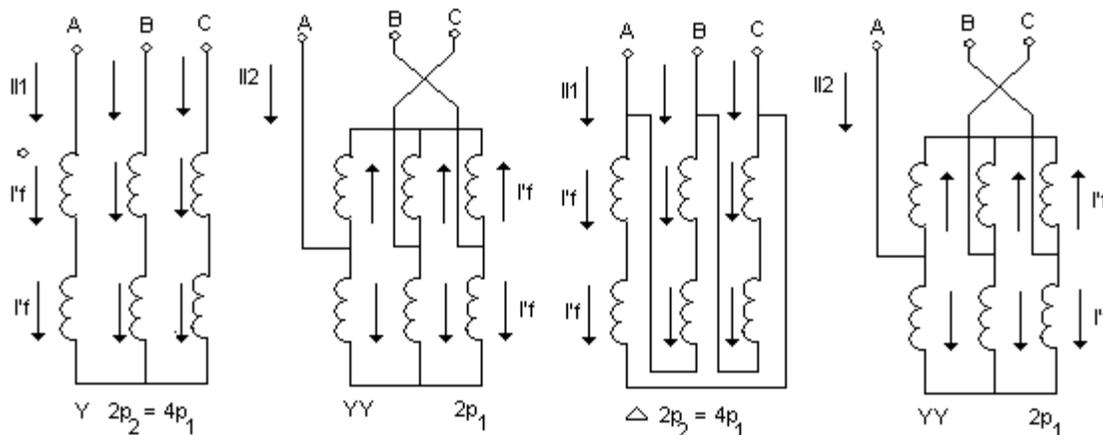


Fig. 2.7- Esquema principal de conexión de un enrollado con conmutación del número de polos con relación 2:1 a) cuando el momento es constante. b) cuando la potencia es constante.

Determinemos las potencias y momentos desarrollados por los motores con tales esquemas de enrollados cuando el voltaje de línea U_{l1} de la red no varía y se tiene la corriente máxima permisible (la nominal) I'_f en una semifase del enrollado. Despreciando las diferencias en condiciones de enfriamiento durante la variación de velocidad de rotación, se puede asumir que la magnitud de I'_f es igual para ambas velocidades de rotación. Aproximadamente se puede considerar que, los factores de potencia y la eficiencia para valores iguales de I'_f , para ambas velocidades de rotación, también son iguales.

Para las condiciones señaladas las potencias en el eje para los esquemas correspondientes de la Fig. 2.7 a) serán:

$$P_2 = \sqrt{3}U_{l1} \cdot I'_f \cdot \eta \cdot \cos \varphi_1 ; \quad P_1 = \sqrt{3}U_{l1} \cdot 2I'_f \cdot \eta \cdot \cos \varphi_1$$

de esta forma

$$\frac{P_1}{P_2} = 2$$



y por consiguiente, durante el tránsito desde una velocidad menor de rotación (Fig.2.10 a), a una mayor, la potencia permisible en el eje aumenta al doble. El momento de rotación evidentemente se mantiene constante y por eso el esquema de conmutación Y/YY (Fig. 2.7 a), también recibe el nombre de esquema de conmutación con $M=\text{constante}$.

Para los esquemas de la Fig. 2.7 b se tienen:

$$P_1 = \sqrt{3}U_{11} \cdot \eta \cdot \cos \varphi_1 = \sqrt{3}U_{11} \cdot 2I'_f \cdot \eta \cdot \cos \varphi_1$$

$$\text{donde } \frac{P_1}{P_2} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1.15$$

Generalmente durante la utilización de los esquemas de la Fig. 2.7 b, para ambas velocidades de rotación, se señala igual potencia nominal, o sea se toma que $P_1 = P_2$.

El esquema de conmutación Δ/YY de la Fig. 2.7 b también recibe el nombre de esquema de conmutación con $P=\text{constante}$.

La forma de las características mecánicas de los motores con esquemas de enrollados como los de la Fig. 2.7 a y b, se muestran en la Fig. 2.7

Durante la conmutación del enrollado de múltiple velocidad las inducciones magnéticas en las secciones por separado del circuito magnético, en sentido general varían, esto es necesario tenerlo en cuenta durante el diseño de los motores para que se logren utilizar totalmente los materiales del motor y no se permita la saturación excesiva del circuito magnético.

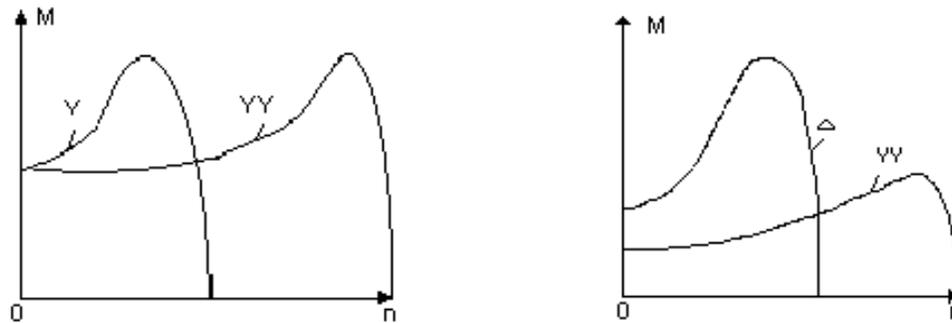


Fig.2.8 Forma de las características mecánicas de los motores con conmutación del número de pares de polos: A la izquierda según el esquema de la Fig.2.8 a) y a la derecha , según el esquema de la Fig.2.8 b).

El peso y el costo de los motores de múltiples velocidades es algo mayor que el de los motores asíncronos ordinarios de la misma potencia. Aun así, este es el mejor procedimiento y el más utilizado para regular la velocidad de los motores de jaula.

- Regulación de la velocidad con disminución de la magnitud del voltaje del primario.

Con la disminución de U_1 el momento del motor varía proporcionalmente a U_1^2 y correspondientemente varían las características mecánicas (Fig.2.8) debido a esto, también varían los valores de los deslizamientos de trabajo s_1, s_2, s_3, \dots para una forma dada de la función $M_{est} = f(s)$. Evidentemente que la regulación de s en este caso, es posible en los márgenes $0 < s < s_m$. Para la obtención de una gama de regulación de velocidad lo suficientemente grande, es necesario que la resistencia del circuito del rotor y correspondientemente s_m , sean lo suficientemente grandes (Fig. 2.8).

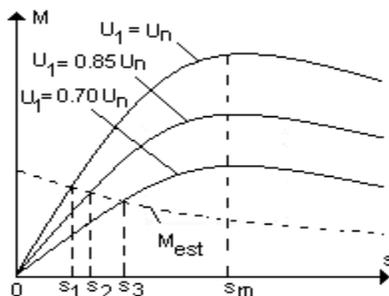


Fig. 2.9. Características mecánicas para diferentes valores del voltaje primario.

Es necesario tener en cuenta que, en el circuito secundario surgen pérdidas, igual a potencia de deslizamiento P_s y provocan un aumento del calentamiento del rotor.

Este método de regulación de velocidad también se utiliza para los motores con rotor bobinado, en este caso al circuito del rotor se conectan resistencias complementarias.

Debido a la disminución de la eficiencia y las dificultades de las regulaciones de voltaje, el método analizado sólo se utiliza para motores de poca potencia. Con esto, para la regulación de U_1 se puede utilizar transformadores regulados o resistencias conectadas en serie al circuito del primario.

Fórmulas del par relativo (*Fórmula de Kloos*).

Cuando hay que resolver problemas de movimiento de la impulsión eléctrica, es importante determinar la dependencia $M = f(s)$ por los datos dados en el catálogo de motores eléctricos. Por las especificaciones de este catálogo suele ser posible determinar el valor del par M_n para la carga nominal, el deslizamiento s_n para esta carga y la capacidad de sobrecarga k_m , por medio de las cuales se puede determinar el par máximo $M_{m\acute{a}x} = k_m \cdot M_n$. Veamos cómo se puede determinar la relación $M = f(s)$ por los datos anteriores considerando los parámetros del motor como independientes del deslizamiento.



En las Máquinas de inducción sin resistencia adicional en el circuito de rotor se suele tener $r_1 \approx r_2$ y, por tanto también $R_1 \approx R_2$ así, cuando no se puede determinar con más precisión la razón $\frac{R_1}{R_2}$ se puede admitir que :

$$\frac{M}{M_{m\acute{a}x}} = \frac{2(I + s_m)}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} + 2s_m} \quad (1)$$

Conocidos M_n , k_m y s_n por los datos del catálogo, podemos determinar s_m por la ecuación:

$$s_m \approx \frac{R_2}{X_{sc}} = \frac{R_2}{X_1 + X_2},$$

y por la ecuación (1) podemos obtener el par relativo para cualquier deslizamiento s .

Para pequeños valores de deslizamiento en el margen de cargas normales solo es necesario tener en cuenta el término $\frac{s_m}{s}$ en el denominador de la ecuación (1).

$$\frac{M}{M_{m\acute{a}x}} = \frac{2(I + s_m)}{s_m} \cdot s$$

La expresión obtenida demuestra que en el margen normal de carga el par M varía con el deslizamiento.

Si despreciamos s_m en el numerador del segundo miembro de la ecuación (1) y el término $2s_m$ en el denominador obtenemos una relación aproximada que se utiliza a veces en los cálculos.



$$\frac{M}{M_{m\acute{a}x}} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}$$

Par electromagnético de la Máquina de inducción (característica mecánica).

El par electromagnético se crea a consecuencia de la acción mutua entre los conductores del devanado del rotor por los que circula la corriente I_2 y del campo giratorio del armónico fundamental o flujo ϕ_m .

La corriente I''_2 del circuito L equivalente es:

$$I''_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}}$$

(2)

y la corriente del circuito T equivalente será:

$$I'_2 = \sigma_1 I''_2 = -\frac{\sigma_1 \cdot U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}}$$

Evidentemente la corriente I_2 es máxima en $s = \pm\infty$.

La expresión de la potencia electromagnética P_{em} será:

$$P_{em} = m_2 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{r_2}{s} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{r_2'}{s} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot \frac{R_2}{s}$$

Sustituyendo el valor de I''_2 de la ecuación (2) en la ecuación anterior obtenemos los parámetros de la máquina:



$$P_{em} = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot \frac{R_2}{s}}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}.$$

Según la ecuación anterior hallamos la expresión necesaria para el par electromagnético en la forma:

$$M_{em} = \frac{pm_1 \cdot U_1^2 \cdot \frac{R_2}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right]}.$$

Particularidades en régimen dinámico del motor de inducción.

El análisis de los procesos dinámicos en las máquinas asíncronas resulta más cómodo efectuarlo en forma de expresiones complejas resultantes con ayuda del sistema de ecuaciones de las tensiones escritas en los ejes (d - q), (Alfa - Beta) o en el caso general en el plano complejo que gira con una velocidad arbitraria. Este sistema junto con las ecuaciones para las tensiones de secuencia cero describe en forma exhaustiva (dentro de los límites de las suposiciones adoptadas) los procesos simétricos y no simétricos establecidos y dinámicos en las máquinas asíncronas y puede emplearse en lugar del sistema de ecuaciones para las tensiones de fase. Sin embargo, a diferencia del sistema de ecuaciones para las tensiones de fase, este sistema es mucho más sencillo por su estructura y resulta un conjunto de ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes constantes lo que posibilita resolverlas mediante métodos analíticos y facilita sensiblemente su cálculo en máquinas digitales.

Es pertinente recordar que los coeficientes de las corrientes en las ecuaciones de las tensiones en los ejes $(\alpha, \beta, 0)$ ó $(d, q, 0)$, se pueden considerar constantes si se admite que se desprecian:



- 1) La saturación de las partes de acero del circuito magnético.
- 2) La existencia de ranuras y núcleos.
- 3) Las componentes armónicas espaciales superiores e inferiores del campo magnético.
- 4) Las componentes armónicas temporales superiores de las corrientes.
- 5) Las pérdidas magnéticas y auxiliares de las corrientes en torbellino en los conductores.
- 6) El cambio de la velocidad angular (o sea, con la condición $\omega = \text{const}$)

Antes de resolver el sistema de ecuaciones complejas de las tensiones escritas en uno u otros ejes, es necesario transformar a estos ejes tanto las magnitudes de las fases determinadas por las condiciones iniciales, como los valores que varían debido a la acción del proceso dinámico.

Según las funciones compleja de las corrientes halladas como resultado de la resolución y recurriendo a la transformación inversa se determinan las corrientes de fases.

Al investigar el régimen dinámico en los que la velocidad de variación de la frecuencia de rotación es conmensurable con la velocidad de cambio de las magnitudes eléctricas (es decir, con los procesos denominados electromecánicos) las ecuaciones complejas de las tensiones escrita en unos u otros ejes deben examinarse conjuntamente con las ecuaciones del movimiento de rotor.

Sistema de ejes.

El devanado polifásico en general y el bifásico en particular crean una distribución de flujo en el entrehierro de la máquina, en el cual el lugar geométrico del extremo del vector que representa el flujo describe una circunferencia en el caso de que el sistema de corrientes que circula por este devanado esté equilibrado.



Si se tiene dos devanados desfasados entre sí un ángulo igual a 90 grados y por ambos circulan unas corrientes sinusoidales de la misma frecuencia pero que forman un sistema bifásico equilibrado se puede ver fácilmente que se crea una distribución elíptica de flujo. Se han de encontrar las relaciones que ligarían a las corrientes en el caso de un devanado trifásico y en el de uno bifásico para que ambos casos dieran la misma distribución de flujo.

La función compleja resultante de la tensión del estator se expresa mediante los valores instantáneos de las tensiones de las fases y es igual a la suma de las tensiones por los ejes en cuadratura en forma compleja.

2.3-2. Máquinas Eléctricas IV (Sincrónicas).

Procesos transitorios en régimen sincrónico.

Por todo es conocido que al analizar un proceso transitorio nos apoyamos en las ecuaciones diferenciales y que la solución contiene la determinación de las componentes libre y forzada.

La máquina se puede considerar formada por dos inductancias acoplada y escribir:

$$M_{ad} \frac{di_{am}}{dt} + l_d \frac{di_a}{dt} + M_{ad} \frac{di_{exc}}{dt} = E_a \cdot \text{sen}(wt + \gamma).$$

para el caso del estator.

Y para el rotor:

$$L_{exc} \cdot \frac{di_{exc}}{dt} + M_d \frac{di_a}{dt} + M_{ad} \frac{di_{am}}{dt} = 0$$

Operando con estas dos ecuaciones obtenemos:



$$Ld'' = L\sigma a + \frac{1}{\frac{1}{M_{ad}} + \frac{1}{L\sigma_{exc}} + \frac{1}{L\sigma_{am}}} \Rightarrow Xd'' = X\sigma a + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X\sigma_{exc}} + \frac{1}{X\sigma_{am}}}$$

Recibe el nombre de reactancia supertransitoria a eje directo de la armadura a la que le corresponde un circuito con una rama en serie con dos en paralelo.

La amplitud de corriente inicial periódica de la armadura (i_{ap}) igual a la i_{am} se determina:

$$i_{ap} = i_{aa} = \frac{e}{Xd} \text{ para } Un: i_{ap} = i_{aa} = i''_{smo} = I_{nm} \cdot \frac{1}{X''d}.$$

Como $X\sigma a$, $X\sigma_{xe}$ y $X\sigma_{am}$ son pequeñas $X''d$ será pequeña y la corriente supertransitoria (i''_{smo}) grande. De aquí que la amplitud de la I_{cc} está limitada por la reactancia de dispersión. Si el enrollado amortiguador no estuviera presente $X\sigma_{am} = \infty$,

$X'd = X\sigma a + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X\sigma_{exc}}}$ le correspondería el

esquema anterior sin el devanado amortiguador. Esta reactancia se denomina reactancia transitoria a eje directo de la armadura.

$X'd > X''d$. Por este caso como $i_{am} = 0$, el flujo ϕ_a , se desplaza solamente por la trayectoria de los flujos de dispersión del enrollado de excitación.

De aquí que la presencia del enrollado amortiguador conlleva al aumento de las corrientes de cortocircuito subtransitorias de armadura.

La amplitud de la corriente inicial simétrica transitoria de cc:

$$I'_{smo} = I_{nm} \cdot \frac{1}{X'd}.$$

La amplitud de la corriente de cc permanente:



$$I_{smo} = I_{nm} = \frac{1}{Xd}$$

Teniendo en cuenta la resistencia de armadura a la ecuación diferencial es necesario añadir el término $i_a Ra$ y se obtiene que la solución depende de una constante $Ta = \frac{L'd}{Ra}$ que no es más que la constante de tiempo de amortiguación de la corriente aperiódica del estator en presencia del devanado amortiguador.

$T''d = \frac{L'am}{Ram}$ otra constante de tiempo de amortiguación de la corriente aperiódica del devanado amortiguador y la respectiva componente de la corriente periódica del devanado del estator.

$L'am$: inductancia equivalente del devanado amortiguador.

Obtenido desde el extremo del devanado amortiguador:

$$X''am = X\sigma am + \frac{1}{\frac{1}{Xad} + \frac{1}{X\sigma ex} + \frac{1}{X\sigma a}}$$

Si la máquina no presenta devanado amortiguador contiene la corriente de armadura, depende de $Ta = \frac{L'd}{Ra}$, constante de tiempo de amortiguación de la componente aperiódica de la corriente del estator.

Para el circuito de excitación teniendo en cuenta la Re_{xc} se obtiene:

$$t'd = \frac{L'ex}{Re_{xc}} \text{ constante de amortiguación de la corriente aperiódica de excitación.}$$

Se puede decir que como la corriente periódica y aperiódica del rotor y el estator están relacionados, la constante de tiempo de una de ellas influye en la



otra. Así la componente periódica del estator se amortigua con la constante de tiempo que se amortigua la componente aperiódica del rotor ($t'd$ ó $t'am$).

Para determinar $X'exc$ se verá en la expresión de la reactancia:

$$X'exc = X\sigma ex + \frac{I}{\frac{I}{Xad} + \frac{I}{X\sigma a}} = X\sigma e + \frac{Xad \cdot X\sigma a}{Xad + X\sigma a}$$

La reactancia del devanado amortiguador (Ram) es considerablemente mayor que la $Rexc$, la constante de tiempo $t''d < t'd$, por lo cual el salto de las corrientes en el devanado amortiguador se amortigua rápidamente.

Después de esto tiene lugar una amortiguación más lenta con la constante de tiempo $t'd$. En correspondencia con esto, la corriente el estator periódica tiene la componente supertransitoria i''_{tran} y la componente transitoria i'_{tran} correspondiente a la corriente aperiódica del devanado amortiguador y de excitación respectivamente.

Máquina con devanado amortiguador	Sin devanado amortiguador
$Icc >$	$Icc <$
$t''d <$	$t''d >$
$ta <$	$ta >$

Cuando la corriente de cortocircuito se amortigua su componente periódica resultante se divide en tres partes:

$$i_{scs} = i_s + (i'_s - i_s) + (i''_s - i'_s)$$



La componente transitoria $i'_n = i'_s - i_s = I_d$ se atenúa con una constante de tiempo T'_a ; la componente subtransitoria $i''_n = i''_s - i'_s = I'_d$ se atenúa con una constante de tiempo T''_d e i_s es la corriente de cortocircuito sostenido. Por consiguiente, la ecuación de la corriente resultante de cortocircuito se puede escribir en la forma siguiente:

$$\begin{aligned}
 i_{sc} &= i_s + (i'_{s0} - i_{s0}) \cdot \varepsilon^{-\frac{t}{T'_d}} + (i''_{s0} - i'_{s0}) \varepsilon^{-\frac{t}{T''_d}} + i_{ao} \varepsilon^{-\frac{t}{T_a}} = \\
 &= I_{nom} \left[\frac{1}{Xd} \cos(\omega t + \psi) + \left(\frac{1}{X'd} - \frac{1}{Xd} \right) \varepsilon^{-\frac{t}{T'_d}} \cos(\omega t + \psi) + \right. \\
 &\quad \left. + \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'd} \right) \varepsilon^{-\frac{t}{T''_d}} \cos(\omega t + \psi) - \frac{1}{X''_d} \varepsilon^{-\frac{t}{T_a}} \cos \psi \right].
 \end{aligned}$$

De acuerdo con la norma GOST 183-55, la corriente de choque de cortocircuito es el máximo valor instantáneo posible de la corriente del estator con una excitación dada de una máquina giratoria que tiene lugar en cortocircuito repentino de todos los bornes de línea de la máquina. La magnitud de la corriente de choque de cortocircuito es importante desde el punto de vista de las fuerzas mecánicas que actúan sobre los devanados y sobre el eje de la máquina en cortocircuito.

En el caso más desfavorable el valor inicial de la corriente aperiódica es igual al valor inicial de la corriente periódica $\approx \frac{E_m}{X''_d}$ y la máxima oleada de corriente tiene lugar en un semiperíodo. En ausencia de atenuación, la corriente de choque podría ser igual a $\frac{2E_m}{X''_d}$.

En la práctica la corriente de choque de cortocircuito se calcula por la fórmula:



$$i_{sc(choque)} \approx \frac{1.8 \cdot 1.05 \sqrt{2}}{X''_d} U_n.$$

Donde U_n es la tensión nominal de la fase; 1,8 es el valor del llamado factor de choque teniendo en cuenta la magnitud de la atenuación de la corriente durante un semiperíodo. En este caso se supone que el cortocircuito tiene lugar en vacío y se asigna un factor de 1.05 para el posible funcionamiento de la máquina con una tensión $1,05 U_n$.

Efecto de la variación de I_f sobre la potencia (Característica en V).

Cuando un motor síncrono es sincronizado con el campo del entrehierro, la velocidad sólo depende de la frecuencia de línea. La potencia de salida depende completamente de la carga mecánica en el eje. Entonces la velocidad no cambia con la variación de la corriente de excitación. Cambiando I_f no se afecta la potencia de salida.

Efectos de la variación de I_f :

- Una alta I_f significa hacer los polos del rotor más fuertes, un gran momento será requerido para hacer salir la máquina de sincronismo. Esto se demuestra a través del momento máximo:

$$M_{máx} = \frac{3U_1 E_R}{W_s X_s}.$$

Es decir, aumenta el momento máximo que es capaz de desarrollar y por tanto la capacidad de sobrecarga.

- Una baja I_f significa hacer más débil los polos del rotor, variar momento máximo y disminuir K_s .
- La I_f afecta el factor de potencia de entrada de la línea de BA.

Esto se entiende bien en una situación donde la carga mecánica o potencia activa permanezcan constantes.

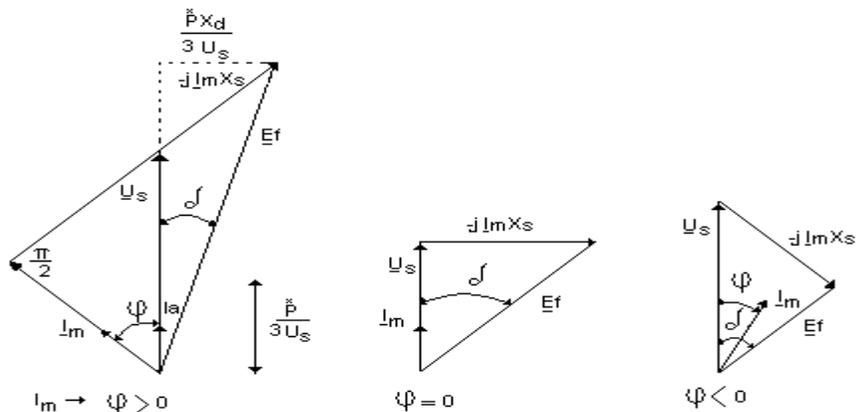


Fig.2.9 .Efecto de la variación de la corriente de excitación sobre el factor de potencia de línea CA.

La componente activa de la corriente y por tanto la potencia permanece constante.

$$I_a = I \cos \varphi = \frac{p}{mUs} = \frac{M_1 \cdot \omega_s}{mUs} \Rightarrow \text{constante.}$$

Así que la corriente de armadura $I = I_a + I_r$, varía sólo (poner palabra) a la variación de la componente reactiva.

$$I_r = I \sin \varphi = \frac{Q}{mUs} \Rightarrow \text{variable.}$$

Para valorar la variación de la corriente de armadura al variar la corriente de excitación se emplean las características en U o V que reflejan $I=f(I_f)$ siendo constante la potencia activa y la tensión del sistema.

La corriente se puede despejar de la ecuación de f.e.m.

$$\underline{E_f} = \underline{U} + R\underline{I} + jX_s\underline{I} \Rightarrow \text{Generador.}$$



$\underline{E}_f = \underline{U}_{sis} - (R + jX_s)\underline{I}_m \Rightarrow$ Motor, y comparar esto teniendo en cuenta la R.

Con máquinas grandes puede ser despreciada R.

Entonces para el motor:

$$\underline{I}_m = \frac{\underline{U}_s - \underline{E}_f}{jX_s} = j \frac{\underline{E}_f}{X_s} - j \frac{\underline{U}_s}{X_s} .$$

Para el generador:

$$\underline{I} = \frac{\underline{E}_f - \underline{U}}{jX_s} = j \frac{\underline{U}}{X_s} - j \frac{\underline{E}_f}{X_s} .$$

Durante el análisis del trabajo de motores sincrónicos con potencia activa constante y excitación variable, se utilizan las características en V que representan las dependencias de la corriente de armadura en función de la corriente de excitación para diferentes niveles de carga.

El menor valor de la corriente de excitación está determinado por el límite de estabilidad, por cuanto al disminuir la excitación disminuye la potencia máxima que puede entregar este motor. Por otra parte el máximo de corriente de excitación viene dado por las exigencias de temperatura admisible, para la corriente circulante, tanto para la armadura como por la excitación del motor.

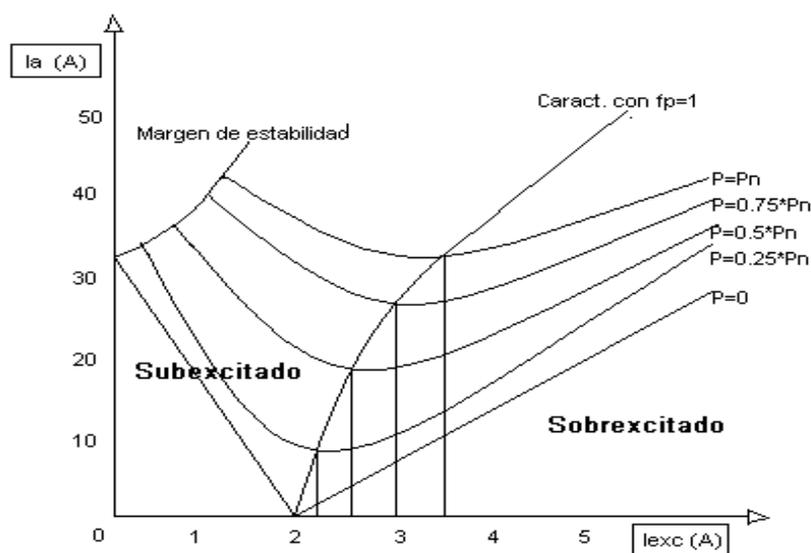


Fig.2.10. Característica en V del motor síncrono.

Ecuaciones de tensión y diagrama vectorial.

Los procesos electromagnéticos que ocurren en la máquina síncrona se estudian para proporcionar su descripción matemática en forma de sistemas de ecuaciones que enlazan las magnitudes de los circuitos magnéticos y eléctricos. Omitiendo las reluctancias en el acero el circuito magnético de la máquina se puede considerar lineal y aplicar en su cálculo el método de superposición, es decir, determinar el campo magnético como la suma de los campos generadores por separado por la corriente de excitación I_f y las corrientes I que circulan en el devanado del inducido. Esto permite escribir la ecuación de tensiones para la fase del inducido de una máquina síncrona de polos interiores del modo siguiente.

$$\underline{E}_f + \underline{E}_\sigma + \underline{E}_a = \underline{U} + \underline{I}R.$$

donde:



\underline{E}_f : es la f.e.m de excitación inducida por el campo de inducción mutuo debido a la f.m.m de excitación.

\underline{E}_a : la f.e.m de inducción mutua del inducido originado por el campo de inducción mutuo debido al sistema de corriente del inducido.

\underline{E}_σ : la f.e.m de dispersión inducida por el campo de dispersión de las corrientes del inducido.

\underline{U} : la tensión de fase en los bornes del devanado de la armadura.

R : la resistencia de la fase del inducido.

\underline{E}_f se determina con ayuda de la característica de vacío.

\underline{E}_a es proporcional a la corriente de armadura.

$$\underline{E}_a = -jX_a \underline{I}$$

la f.e.m de dispersión se puede determinar a través de:

$$\underline{E}_\sigma = -jX_\sigma \underline{I}$$

Ahora la ecuación de tensión puede ser:

$$\underline{E}_f = \underline{U} + R\underline{I} + jX_s \underline{I} \Rightarrow \text{generador.}$$

Donde $X_s = X_\sigma + X_a$ es la inductancia total del inducido.



2.4- Conclusiones

En este capítulo se presentó una introducción al Laboratorio Virtual como herramienta de trabajo que posteriormente será aplicado a la solución de ejercicios con la cual el estudiante se podrá enfrentar a distintos problemas de las asignaturas que integran la disciplina.

Se recoge un resumen teórico de algunos aspectos que son tratados en ejercicios resueltos que aparecen al final (Anexo) de este trabajo.

CAPÍTULO III: Análisis de los resultados

En este capítulo se realizará una valoración sobre el trabajo realizado. Se iniciará haciendo una valoración sobre la repercusión de la computación en la disciplina hasta ver como se incursiona en los sistemas de evaluación de la misma.

3.1- Valoración final sobre el uso de la técnica de computación en la disciplina.

Se destaca en el proceso de enseñanza el uso de la computadora como un recurso que poco a poco ha podido liberar al profesor del trabajo monótono. La computadora se ha convertido en un medio que le permite al profesor multiplicar su acción en el aula, lográndose niveles de individualidad de la enseñanza económicamente no posibles con otras formas.

El uso de las computadoras crea facilidades para un estudio minucioso de los fenómenos y la experimentación, de modo que incida en el desarrollo de la capacidad del ser humano para interpretar el medio y poder elaborar hipótesis que expliquen las leyes que los gobiernan. No se pretende en ningún momento reemplazar las técnicas de enseñanzas tradicionales, por ejemplo, conferencias, sino hacer el proceso de enseñanza aprendizaje más productivo, más eficiente.

En el plan de estudio vigente de la carrera de Ingeniería Eléctrica se plantea desarrollar en los futuros profesionales durante el proceso de aprendizaje un conjunto de conocimientos y habilidades relacionadas con Máquinas Eléctricas que están estrechamente vinculados con la práctica asociada a la solución de ejercicios con simple y mediana complejidad, los cuales por las vías tradicionales son muy difíciles de alcanzar con la calidad y eficiencia adecuada.

3.2- Valoración social para los estudiantes.

La aplicación de la computadora en el proceso de enseñanza aprendizaje es un reto para los estudiantes, los que deben asumir su nuevo papel en este proceso, donde se enfrentan a situaciones, problemas, etc., que los llevan a

investigar en forma colaborativa en los aspectos más significantes permitiéndoles comprender, actuar y proyectarse con inteligencia, creatividad y reflexión crítica en la vida cotidiana y futuro profesional.

3.3- Criterio de evaluación del trabajo.

Los resultados de este trabajo se podrán medir durante la aplicación del mismo en los próximos cursos en el continuo desarrollo que propiciará el uso correcto de la técnica de computación. Una adecuada aplicación de las mismas permitirá la profundización de los conocimientos en las distintas temáticas que se abarcan en el curso general de Máquinas Eléctricas para ingenieros eléctricos, preparando al estudiante con mayor calidad.

3.4- Conclusiones

Investigar un universo mayor de variantes, con más exactitud, con menos esfuerzo y tiempo.

Apoyarse en lo ya establecido y buscar lo particular, permitiéndole profundizar más en la fase de análisis y por tanto lograr un aprendizaje más significativo,

Constar con un recurso para atender las individualidades y resolver problemas didácticos de los textos.

Realizar un mayor trabajo independiente, con mayor motivación y alcanzando mejores resultados docentes en promoción y calidad.

Conclusiones Generales

Al finalizar esta investigación se llegó a las conclusiones siguientes:

- ✓ Se realizó un estudio y valoración sobre los conceptos principales asociados al objeto de estudio y campo de acción.
- ✓ Se demostró que la computadora como medio de enseñanza es un recurso que en las últimas décadas se ha venido utilizando con mucha fuerza, permite realizar un mayor trabajo independiente con mayor motivación, alcanzando mejores resultados docente en promoción y calidad.
- ✓ Se desarrolló un Laboratorio Virtual el cual permite a los estudiantes de la carrera de Eléctrica realizar algunas prácticas de laboratorios de la asignatura Máquinas Eléctricas.
- ✓ Se recoge un resumen teórico de algunos aspectos de ejercicio tipos por asignaturas.
- ✓ Se realizó un conjunto de ejercicios que aparecen en el anexo.

Recomendaciones

Para elevar el grado de apreciación de la disciplina por parte de los estudiantes y a la vez que puedan apreciar la importancia que tiene en la práctica planteamos las siguientes recomendaciones.

- ✓ Que el trabajo sea utilizado por el personal de la disciplina y por los estudiantes iniciados el semestre.
- ✓ Que se implemente el uso de este software no solo en esta disciplina, sino también en otras.
- ✓ Enfatizar sobre el uso de las técnicas computacionales.
- ✓ Continuar el perfeccionamiento del trabajo para lograr mejores resultados.

Bibliografía

- [1] Cerda, H, 2000.Los elementos de la investigación, Segunda reimpresión. Editorial El Búho: Bogotá, Colombia.
- [2] Galvis A.,1997.Ingeniería de software educativo. Bogotá, Colombia. Ed. Ediciones Uniandes.
- [3] García, Z. (2009). DESARROLLO DE UN SOFTWARE EDUCATIVO PARAFACILITAR EL PROCESO ENSEÑANZA-APRENDIZAJE DE LA ASIGNATURA MODELOS DE OPERACIONES I. UNIVERSIDAD DE ORIENTE, DEPARTAMENTO DE COMPUTACIÓN Y SISTEMAS, Barcelona.
- [4] Guzmán, A; Nuñez, G.; 1998. "Virtual Learning Spaces in Distance Education: Tools for the Eva Project". International Journal Expert Systems with Applications (Special Issue), Pergamon Press.
- [5] Informática.(on line) [consultado: 23/4/2015].
<http://es.wikipedia.org/wiki/Inform%C3%A1tica>.
- [6] Ivanov-Smolenski, A. V. Máquinas Eléctricas (tomo II). Editorial Mir - Moscú.
- [7] Johnston, W. & D. Agawal, 1995. The Virtual Laboratory: Using Networks to enable Widely Distributed Collaboratory Science. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California.
- [8] K. A. Nigim y R. R. DeLyser, Mayo 2001. "Using MathCAD in Understanding the Induction Motor Characteristics", IEEE Trans. On Education, vol. 44, nº2, pp. 165-169.
- [9] Kostenko, 1982. M. P. Máquinas Eléctricas (en tres tomos). Editorial Pueblo y Educación.
- [10] Lobaina, A. A., & Silva Diéguez, O. R. (s.f.). La Investigación Científica: Conceptos y Reflexiones.
- [11] M. M. G. P. Martínez-Jiménez, 2009. «Virtual Web Sound Laboratories as an Educational Tool in Physics Teaching in Engineering,» Wiley Periodicals Inc., pp. 759-769:759-761.

- [12] M^a I. Zamora, A. J. Mazón, E Fernández, K. J. Sagastabeitia, I. Albizu, P. Eguía, E. Torres, V. Valverde, 2005. Simulación de sistemas eléctricos, Madrid, Pearson Educación.
- [13] M^a I. Zamora, A. J. Mazón, E Fernández, K. J. Sagastabeitia, I. Albizu, P. Eguía, E. Torres, V. Valverde, 2005. Simulación de sistemas eléctricos, Madrid, Pearson Educación.
- [14] Maple®, Última consulta: Mayo de 2015. Disponible en: <http://www.maplesoft.com> .
- [15] Matlab®, Última consulta: Mayo de 2015. Disponible en: <http://www.mathworks.es> .
- [16] McPherson, G., 1989. An Introduction to Electrical Machines and Transformers. Second Edition.
- [17] Ogata, K., 1994. Solución de problemas de Ingeniería de Control con MATLAB. Editora Prentice-Hall do Brasil LTDA.
- [18] Orcad®, Última consulta: Mayo de 2015. Disponible en: <http://www.orcad.com>.
- [19] Torre, N. N., & Flórez Fernández, H. (2011). Los laboratorios virtuales adaptativos y personalizados en la educación superior. Lorenzo, G. M., Suárez Rivero, J. P., & García Domínguez, M. (2003). Desarrollo de un Laboratorio Virtual para el Estudio y Simulación de Mecanismos en la Ingeniería. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Departamento de Cartografía y Expresión Gráfica.
- [20] Voldek, I., 1974. Máquinas Eléctricas (en dos tomos). La Habana. Editorial Pueblo y Educación.

Anexos

Máquinas Síncronas.

Ejercicio 1

```
%Solución problema No3.
%Datos:
Sn=250000; %Potencia Nominal en V.A.
p=4; %Número de pares de polos.
Uf=462; %Tensión nominal en V.
Fp=0.8; %Factor de potencia.
f=60; %Frecuencia en Hz.
Xad=2.6; Xaq=1.62; Xsa=0.172; Ra=0.0347; R=0.9
2;
%Solución.
In=Sn/(3*Uf);
Pa=Sn*Fp/2; % Mitad de la potencia activa.
Ia=Pa/(3*Uf); % Corriente activa a permanecer
constante.
F1=acos(Fp);
Fi=-pi/2.05:pi/20:pi/2.05;
I=Ia./cos(Fi);
Xq=Xaq+Xsa;
ac=acos((Uf*cos(F1)-In*Ra)/sqrt((Uf*sin(-F1)-
In*Xq)^2+(Uf*cos(F1)-Ra*In)^2));
Xa=0.5*((Xad*Xaq)-(Xad-Xaq)*cos(2*ac));
Raa=0.5*(Xad-Xaq)*sin(2*ac);
X1=Xsa+Xa;%Reactancia equivalente.
R1=Ra+Raa;
Efm=Uf*cos(-Fi)+j*Uf*sin(-Fi)-I*(R1+j*X1);
Ef=abs(Efm)/Uf;
Ef1=Ia*X1/Uf;
If=2.1275*Ef.^2-1.2041*Ef+0.1182;
If1=2.1275*Ef1.^2-1.2041*Ef1+0.1182;
A=[Ef(5) Ef(9) Ef(13) Ef(17);
Ef(6) Ef(10) Ef(14) Ef(18);
Ef(7) Ef(11) Ef(15) Ef(19);
Ef(8) Ef(12) Ef(16) Ef(20)];% Matriz de F.e.m.
B=[If(5) If(9) If(13) If(17);
If(6) If(10) If(14) If(18);
If(7) If(11) If(15) If(19);
If(8) If(12) If(16) If(20)]; % Matriz de corriente de
excitación.
I1=I./In;
C=[I1(5) I1(9) I1(13) I1(17);
I1(6) I1(10) I1(14) I1(18);
I1(7) I1(11) I1(15) I1(19);
I1(8) I1(12) I1(16) I1(20)];% Matriz de corriente
de armadura.
plot(B,C,'b'),grid
axis([0 10 0 2])
title('Curva en V')
xlabel('If*')
```

```
ylabel('I* ')
% Margen de estabilidad;
Mg=[Ef1 If1];
' Fi(o) I(*) Ef(*) If(*)'
format bank
S=((180/pi)*Fi' I' Ef' If')
```

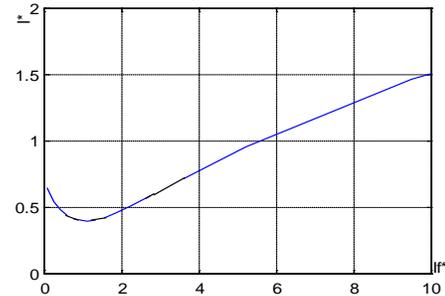


Figura No.1
Ejercicio 2

```
% Solución problema No1.
% Datos:
format short
Sn=250000; %Potencia Nominal en V.A.
p=4; %Número de pares de polos.
Uf=462; %Tensión nominal en V.
Fp=0.8; %Factor de potencia.
f=60; %Frecuencia en Hz.
Xad=2.6; Xaq=1.62; Xsa=0.172; Ra=0.0347; R=0.9
2;
%Solución.
In=Sn/(3*Uf);
Fi=acos(Fp);
In1=In*exp(-Fi*j);
Uh1=Uf+In1*(Ra+(Xsa+Xaq)*j);%Tensión hasta
la dirección de Ef.
Uh=abs(Uh1); % Valor absoluto de la Uh1.
ap1=angle(Uh1) % Angulo de potencia, (Rad).
ap=ap1*180/pi; % Angulo de
potencia, (Gra).
ac1=ap1+Fi; % Angulo de
carga, (Rad).
ac=ac1*180/pi; % Angulo de
carga, (Gra).
Id=In*sin(ac1); % Corriente por
el eje directo, (A).
Iq=In*cos(ac1); % Corriente por
el eje transversal, (A).
Ef1=Uf*exp(Fi*j)+In*(Ra+Xsa*j)+Id*Xad+j*Iq*Xa
q*j;
% F.e.m debida a la excitación de la
máquina,(complejo),en (V).
```

```

Ef=abs(Ef1); % Valor absoluto
de Ef, (V).
DU=(Ef-Uf)/Uf; % Variación de la
tensión (Pu).
Ps=Sn*cos(Fi)/1000; % Potencia de
salida del generador, (kW).
Pe=Ps/R; % Potencia de
entrada del generador, (kW).
Xd=Xsa+Xad;
Xq=Xsa+Xaq;
P1=3*Uf*Ef/(1000*Xd); % Potencia
principal sin tener en cuenta las
% pérdidas en el
cobre, (kW).
P2=3*Uf^2*(1/Xq-1/Xd)/2000;% Potencia
complementaria, (kW).
n=P1/P2;
Me=p*Pe/(2*pi*f); % Momento de
entrada por el eje (kN.m).
a=0:pi/20:pi;
a1=a.*180/pi;
M=(p/(2*pi*f))*(P1.*sin(a)+P2.*sin(2*a));
% Ploteo de la característica angular.
plot(a1,M,'b'),grid
Mm=max(M); % Momento
máximo (kN.m).
apm=180/pi*acos((sqrt(n^2+32)-n)/8); % Angulo
de potencia critico.
[ap ac Id Iq Ef Me Mm apm]

```

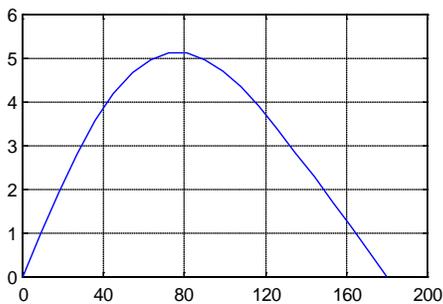


Figura No.2
Ejercicio 3.

```

%Característica en V.
Pn=400; Un=6; cosFi=0.8; Rn=0.92; Xs=24; Uf=Un/
sqrt(3);
le=[40 60 80 100 120 140 160 180];
Ef=[1.5 2.2 2.75 3.25 3.46 3.52 3.65 3.75];
la1=0; l=-j*(1/Xs).*(Uf-Ef);
I1=1000*abs(l);
la2=0.25*Pn/(sqrt(3)*Rn*Un);
lf=1000*Ef./Xs; lu=1000*Uf/Xs;
lr2=sqrt(lf.^2-la2^2)-lu;
I2=abs(sqrt(la2^2+lr2.^2));

```

```

la3=0.5*Pn/(sqrt(3)*Rn*Un);
lr3=sqrt(lf.^2-la3^2)-lu;
I3=abs(sqrt(la3^2+lr3.^2));
la4=0.75*Pn/(sqrt(3)*Rn*Un);
lr4=sqrt(lf.^2-la4^2)-lu;
I4=abs(sqrt(la4^2+lr4.^2));
la5=Pn/(sqrt(3)*Rn*Un);
lr5=sqrt(lf.^2-la5^2)-lu;
I5=abs(sqrt(la5^2+lr5.^2));
plot(Ie,I1,'g',Ie,I2,'b',Ie,I3,'r',Ie,I4,'c',Ie,I5,'g'),grid

```

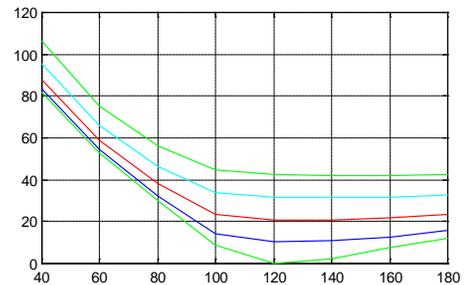


Figura No.3
Ejercicio No.4

```

% Cálculo del proceso transitorio de un
generador sincrónico.
% Para un generador sincrónico trifásico de
rotor con polos salientes se
% tienen los siguientes datos.
Fi=pi/2; % Fase inicial.
t=0:1/(20*pi):20/pi;%Tiempo en que se evalúa el
período transitorio.
In=1;% Corriente nominal en valores por unidad.
f=60;%Frecuencia nominal de la red en Hz.
W=2*pi*f;%Frecuencia angular en Rad.
Pn=57.2e+6;%Potencia nominal en W.
Ra=0.00468;%Resistencia de armadura en pu.
Re=0.00058;%Resistencia de excitación en pu.
Rar=0.0154;%Resistencia del devanado
amortiguador en pu.
Xse=0.239;%Reactancia de dispersión de
excitación en pu.
Xsar=0.172;%Reactancia de dispersión del dev.
amortiguador en pu.
Xad=0.57;%Reactancia mutua del estator y rotor
por el eje directo en pu.
Xsa=0.125;%Reactancia de dispersión de la
armadura en pu.
% Determinar:
% a)Reactancia transitoria y supertransitoria de
los devanados.
% b)Todas las constante de tiempo.
% c)Corriente inicial
permanente,transitoria,supertransitoria y
aperiódica.
% d)Corriente total de cortocircuito y sus
componentes.

```

```

% SOLUCIÓN:
% CÁLCULO DE LAS REACTANCIAS.
% Reactancia sincrónica.
Xd= Xad+ Xsa;
Xd1= Xsa+(Xad*Xse/(Xad+ Xse));
% Reactancia transitoria.
Xd1= Xsa+(Xad*Xse/(Xad+ Xse));
% Reactancia supertransitoria.
Xd2= Xsa+(1/(1/Xad+1/Xse+1/Xsar));
% Reactancia transitoria del rotor (excitación).
Xe1= Xse+(Xad*Xsa/(Xad+ Xsa));
% Reactancia supertransitoria del rotor (amortiguador).
Xd2= Xsa+(1/(1/Xad+1/Xse+1/Xsar));
Xe1= Xse+(Xad*Xsa/(Xad+ Xsa));
Xar1= Xsar+(1/(1/Xad+1/Xse+1/Xsa));
% Reactancia transitoria.
Xd1= Xsa+(Xad*Xse/(Xad+ Xse));
% Reactancia supertransitoria.
Xd2= Xsa+(1/(1/Xad+1/Xse+1/Xsar));
% Reactancia transitoria del rotor (excitación).
Xe1= Xse+(Xad*Xsa/(Xad+ Xsa));
% Reactancia supertransitoria del rotor (amortiguador).
Xar1= Xsar+(1/(1/Xad+1/Xse+1/Xsa));
% CÁLCULOS DE LAS CONSTANTES DE TIEMPO.
% Constante de tiempo transitoria (excitación).
Td1= Xe1/(W*Re);
% Constante de tiempo supertransitoria (amortiguador).
Td2= Xar1/(W*Rar);
% Constante de tiempo aperiódica supertransitoria.
Ta= Xd2/(W*Ra);
ln1=sqrt(2)*ln;
lso=ln1/Xd;
lso1=ln1/Xd1;
lso2=ln1/Xd2;
lpp=lso*cos(W.*t+Fi);
lpt=(lso1-lso)*exp(-t/Td1).*cos(W*t+Fi);
lpst=(lso2-lso1)*exp(-t/Td2).*cos(W*t+Fi);
lat=lso2*cos(Fi)*exp(-t/Ta);
lcc=lpp+lpt+lpst-lat;
plot(t,lpp,'r',t,lpt,'g',t,lpst,'b',t,lat,'y',t,lcc,'m'),grid
% Valores efectivos.
le=lso/sqrt(2);
let1=(lso1-lso)*exp(-t/Td1)/sqrt(2);
let2=(lso2-lso1)*exp(-t/Td2)/sqrt(2);
leat=0.73*(lso2-lso1)*exp(-t/Ta)/sqrt(2);
let=le+let1+let2+leat;
% plot(t,le,'g',t,let1,'g',t,let2,'b',t,leat,'y',t,let,'m'),grid
id

```

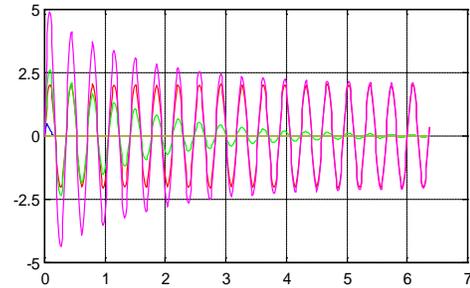


Figura No.4

Ejercicio 5.

```

t=0:1/(60*3600):6/60;U=120;f=60;W=2*pi*f;a=exp((2*pi/3)*j);
Ua=sqrt(2)*U*cos(W*t);
Ub=sqrt(2)*U*cos(W*t-(2*pi/3));
Uc=sqrt(2)*U*cos(W*t+(2*pi/3));
U1=(2/3)*(Ua+Ub*a+Uc*a^2);
Ualfa=real(U1);
Ubeta=imag(U1);
Uso=(1/3)*(Ua+Ub+Uc);
[Ualfa' Ubeta'];
Ud=Ualfa.*cos(W*t)+Ubeta.*sin(W*t);
Uq=-Ualfa.*sin(W*t)+Ubeta.*cos(W*t);
plot(t,Ud,t,Uq,t,Ualfa,t,Ubeta)

```

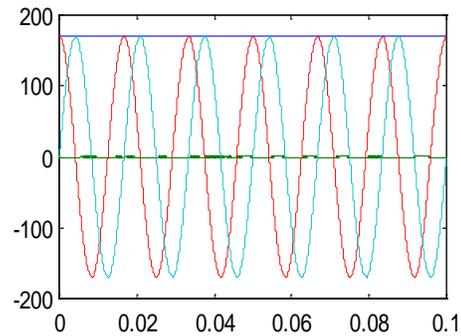


Figura No.1

Transformadores.
Ejercicio1.

```

%Cálculo de la variación de tensión
en un transformador.
pcc=600;%Pérdidas de cortocircuito
en W.
po=135;
ucc=0.045;sn=25000;ul=10000; B=0.8;
%Cálculo de la corriente nominal en
A.
in=sn/(sqrt(3)*ul);Ucc=ucc*ul;
%Cálculo del factor de potencia.
Fcc=acos(pcc/(sqrt(3)*Ucc*in));
F2=-pi/2:pi/10:pi/2;
ua=ucc*cos(Fcc);ur=ucc*sin(Fcc);
du=B*(ua*cos(F2)+ur*sin(F2))+0.5*(B)
^2*(ur*cos(F2)-ua*sin(F2)).^2;
Fi=180*F2/pi;
y=[Fi du];
fprintf(' Tabla de función DU\n');
fprintf(' Fi du\n');
fprintf('
_____
\n');
fprintf(1, '%10.2f%10.2f\n',y);
plot(Fi,du),grid
title('Gráfico de la variación de
tensión')
xlabel('Angulo del factor de
potencia')
ylabel('Variación de tensión en %')
text('position',[0
.035],'String','Variación de
tensión','Horizontalalignment','righ
t')
axis([-90 90 -0.04 0.04]);

```

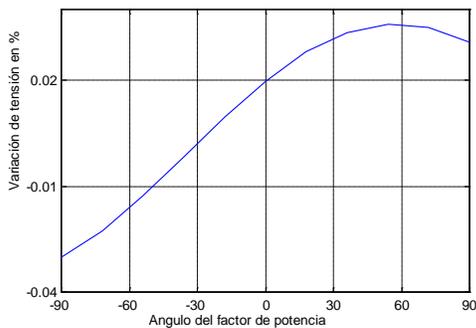


Figura No.1

Ejercicio2.

% Datos.

```

pcc=600;po=135;ucc=0.045;sn=25000;ul
=10000;B=0.8;F2=36*pi/180;
in=sn/(sqrt(3)*ul);Ucc=ucc*ul;
Fcc=acos(pcc/(sqrt(3)*Ucc*in));
ua=ucc*cos(Fcc);ur=ucc*sin(Fcc);
du=B*(ua*cos(F2)+ur*sin(F2))+0.5*(B)
^2*(ur*cos(F2)-ua*sin(F2)).^2;
b=0:0.002:1.2;
R=1-((po*(1-du)+(b).^2*pcc)./(b*(1-
du)*sn*cos(F2)+po.*(1-
du)+(b).^2*pcc));
plot(b,R),grid
title('Gráfico de rendimiento vs
Factor de carga')
xlabel('Coeficiente o factor de
carga')
ylabel('Rendimiento en v.r.')
text('position',[0.8
.85],'String','Variación de
rendimiento','Horizontalalignment
','right')

```

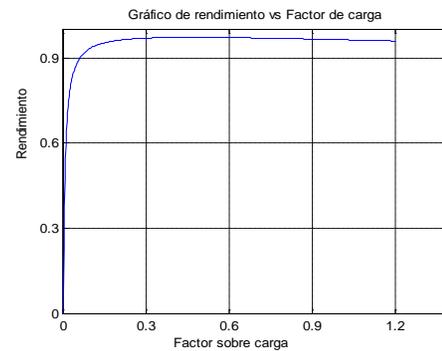


Figura No2

Ejercicio3.

%Datos.

```

pcc=600;po=135;ucc=0.045;sn=25000
;ul=10000;B=0.8;
in=sn/(sqrt(3)*ul);Ucc=ucc*ul;
Fcc=acos(pcc/(sqrt(3)*Ucc*in));
F2=-pi/2:pi/10:pi/2;
ua=ucc*cos(Fcc);ur=ucc*sin(Fcc);
b=0:0.1:1.5;
[B, f2]=meshgrid(b,F2);
Fi=180*f2/pi;
du=B.*(ua.*cos(f2)+ur.*sin(f2));
surf(f2, B, du)

```

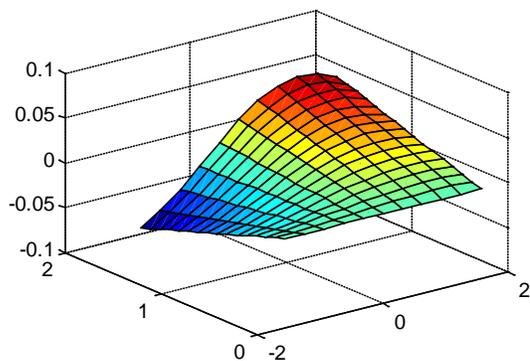
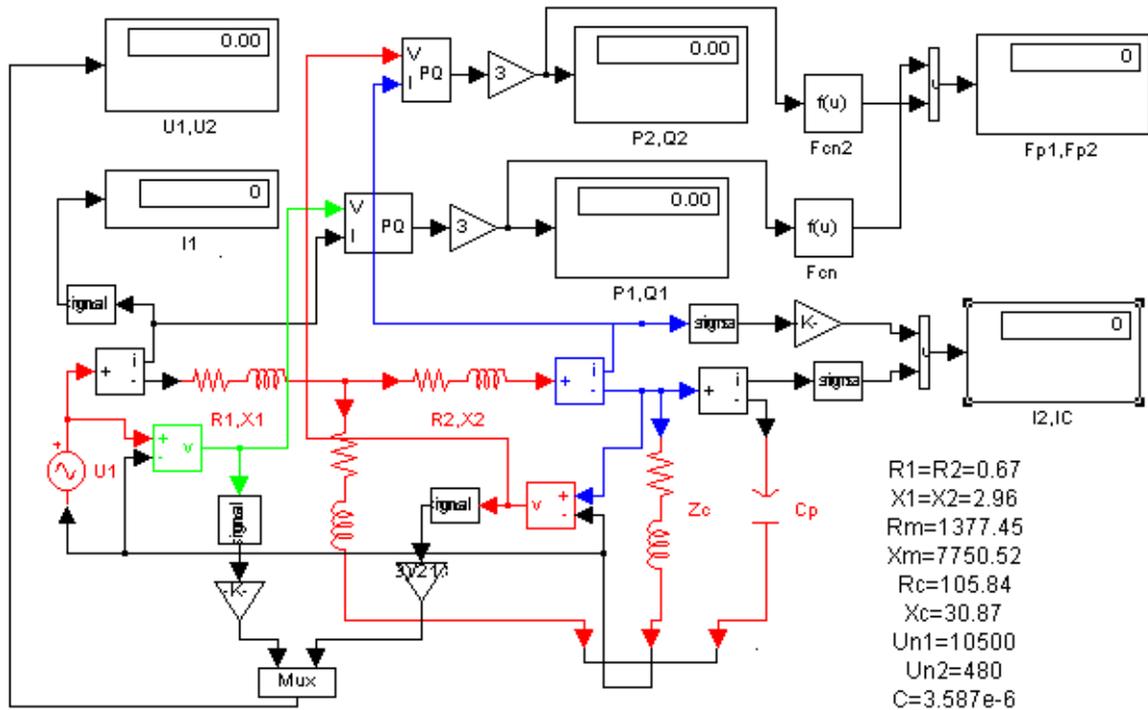


Figura No.3

Ejercicio 4. Circuito equivalente del transformador



Ejercicio 5.

```

%Programa para el cálculo de la
influencia del transformador en el
factor
%de potencia.
format short g
disp('.....')
disp('.....')
disp('.....')
disp(' Los datos nominales hay que
introducirlo en el programa antes')
disp(' de iniciar los cálculos, el
factor de potencia es negativo
para')
disp(' carga de carácter
capacitaba')
disp('.....')
disp('.....')
disp('.....')
disp('.....')
kip=input('Coeficiente incremental
de pérdida kip=0.07');
I2=input('Corriente de carga del
transformador I2=345');
fp2=input('Factor de potencia de la
carga fp2=0.78');
    
```

```

U2=input('Tensión de línea del
secundario en Volts U2=460');
S=input('Inductivo 1, Capacitivo 2
S=2');
F1=acos(fp2);
y=1-S;
if y>=0;
    F12=F1;
else
    F12=-F1;
end
%Designación del dato de catálogo
Sn=1000;%Potencia nominal aparente
U1n=10.50;
%Tensión nominal del lado de alta kv
U2n=0.48;
%Tensión nominal del lado de baja kv
kc=sqrt(3)*U2*I2/(Sn*1e3);
%Coeficiente de carga
k=U1n/U2n;
%Relación de transformación
Po=2.45;
%Pérdida en vacío de catálogo
kW
Pcc=12.20;
%Pérdida en cortoc. de catálogo kW
Ucc=5.50;
%Tensión de cortocircuito nominal
%
    
```

U/M
kVA

```

Io=1.40;
%Corriente en vacío del lado de alta
tensión % de Iln
%Datos calculado nominales.
Iln=Sn/(sqrt(3)*Uln);
%Corriente nominal del lado de alta
tensión A
I2n=Sn/(sqrt(3)*U2n);
%Corriente nominal del lado de baja
tensión A
Iol=Io*Iln/100;
%Corriente en vacío del lado de alta
tensión A
Fpo=Po/(sqrt(3)*Uln*Iol);
%Factor de potencia en vacío
Fpcc=Pcc/(sqrt(3)*Ucc*Uln*Iln/100);%
Factor de potencia en cortocircuito
Qo=Po*tan(Fpo);
%Potencia reactiva en vacío KVAR
Qcc=Pcc*tan(Fpcc);
%Potencia reactiva en cortocircuito
KVAR
Dpo=Po+kip*Qo;
%Pérdida en vacío considerando la
pérdida por concepto de reactivo.
kW
Dpc=Pcc+kip*Qcc;
%Pérdida en corto considerando la
pérdida por concepto de reactivo
kW
Dpt=Dpo+kc^2*Dpc;
%Pérdidas totales kW.
%Parámetros del circuito
equivalente.
% Cortocircuito.
Zcc=10*Ucc*Uln/(sqrt(3)*Iln);
%Impedancia de cortocircuito en Ohm.
Rcc=Zcc*Fpcc;
Xcc=sqrt(Zcc^2-Rcc^2);
% Vacío.
Zo=Uln*1e3/(sqrt(3)*Iol);
Ro=Zo*Fpo;
Xo=sqrt(Zo^2-Ro^2);
%Resistencias del primario,
secundario y magnetización.
R1=Rcc/2;R2=R1;X1=Xcc/2;X2=X1;Rm=Ro-
R1;Xm=Xo-X1;
Z1=R1+X1*j;Z2=Z1;Zm=Rm+Xm*j;
% Impedancia de carga.
I2r=I2/k;
%Corriente del secundario referida
al primario.
I22=I2r*exp(Fi2*j);
Zc=U2/(sqrt(3)*I2);
Rc=Zc*cos(Fi2);
Xc=Zc*sin(Fi2);

```

```

Zc1=Rc*k^2+Xc*k^2*j;%Impedancia de
carga referida
Uab=U2*k/sqrt(3)+I22*Z2;
if I2>0
Zeq=(Zc1+Z2)*Zm/(Zc1+Z2+Zm)+Z1;
Iool=Uab/Zm;
else I2=0
Zeq=Z1+Zm;
Iool=Uab/Zeq;
end
I11=Iool+I22;Ioo=abs(Iool);Pac=3e-
3*Ioo^2*Rm;
U11=Uab+I11*Z1;U1=abs(U11)*sqrt(3
);I1=abs(I11);
I2a=abs(I22);Pel=3e-
3*(I1^2*R1+I2a^2*R2);Ptt=Pel+Pac;
F1=angle(Zeq);
if F1<0
fp1=-cos(F1);
else
fp1=cos(F1);
end
if Fi2<0
fp2=-fp2;
else
fp2=fp2;
end
disp('.....')
disp('.....')
disp('Resultado del cálculo
efectuado para el transformador')
disp(' kc U1,(V)
I1,(A) fp1')
disp(' Ioo,(A) U2,(V)
I2,(A) fp2')
disp(' Pac,(kW) ----
Pel,(kW) Ptt,(kW)')
Resultado[kc U1 I1 fp1;Ioo U2 I2
fp2;Pac 0 PelPtt ]
Ejercicio 6.
%Example 3.14
%Los datos del ensayo en vacío y
en cortocircuito del
transformador de
format short g
Sn=50000;%Potencia nominal en VA.
Un1=7200;Tensión del primario en
V.
Un2=208;Tensión del secundario en
V.
f=60;Frecuencia nominal Hz.
%Conexión delta-estrella
trifásico.
%Vacío, se realizó por el lado de
baja tensión.

```

```

Po=500;Pérdida de vacío en W.
Uo=208;Tensión de vacío en V.
% Cortocircuito, por el
lado de alta.
Pcc=600;Perdida de cortocircuito en
W.
Icc=4.01;Corriente de cortocircuito
en A.
Ucc=370;Tensión de cortocircuito en
V.
%Determinar la impedancia del
circuito equivalente aproximado
%referido al lado de alta tensión.
% Solución.
% Para ensayo en vacío.
pac=Po;
% Para la conexión del secundario en
ESTRELLA.
Uf2=Uo/sqrt(3); If2=Io;
Ro=pac/(3*Io^2);
Zo=Uf2/Io;
Xo=sqrt(Zo^2-Ro^2);
    
```

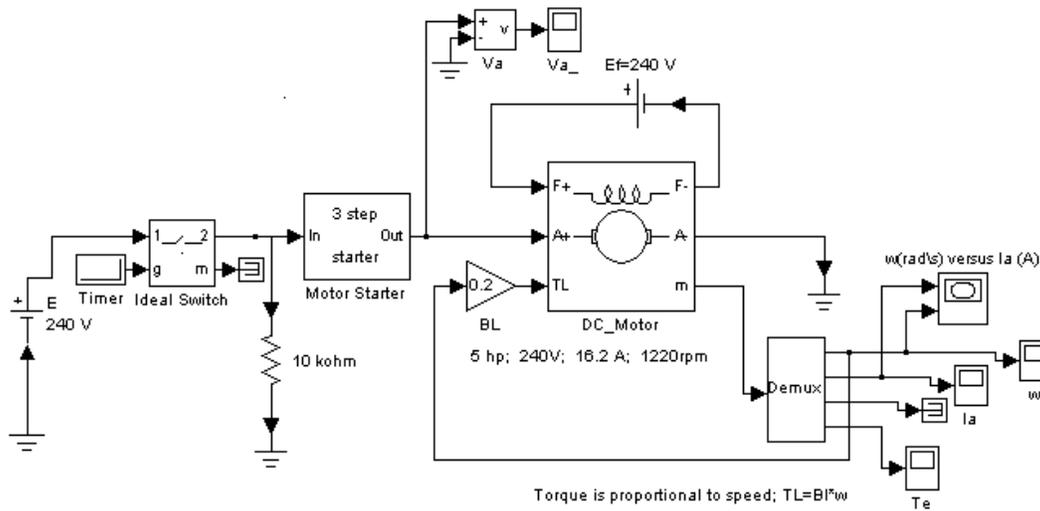
```

Io=8;Corriente de vacío en A.
% Cortocircuito.(DELTA)
Ifcc=Icc/sqrt(3);
Zcc=Ucc/Ifcc;
Rcc=Pcc/(3*Ifcc^2);
Xcc=sqrt(Zcc^2-Rcc^2);
%Desglose de impedancia
X1=Xcc/2;X2=Xcc/2;R1=Rcc/2;R2=R1;
% Referir los datos de vacío al
primario.

k=Un1/Un2;
Ro1=k^2*Ro;
Xo1=k^2*Xo;
%Parámetro de magnetización.
Rm=Ro1-R1;
Xm=Xo1-X1;
disp('Parámetros del circuito
equivalente en T')
disp('          R1          X1
RmXm          R2          X2')
T=[R1 X1 RmXm R2 X2]
    
```

Máquinas Corriente Directa.

Ejercicio 1



Starting of a 5 HP 240V DC motor with a 3 step resistance starter

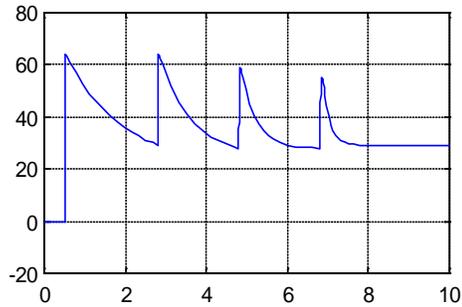


Figura No.1

Ejercicio 2.

```

% Un motor en derivación tiene los
datos
% siguientes:
Ra=1;resistencia de armadura en Ohm.
Re=100;%resistencia de excitación en
Ohm
Ua=200;%tensión de armadura en
Volts.
Wo=100;%velocidad ideal de vacío en
rad/s.
Mo=1;%momento en vacío en N.m.
%Mc=2+0.015*w^2.
%a)-velocidad de operación.
%b)-Mem.
%c)-Il.
%d)-Pe.
%e)-Ef.
%f)-trazar la característica
Ef=f(Ia).
format short g
%ecuación de velocidad.
W=[1 800 -79400];
W1=roots(W);
Wm=W1(2);
%solución de b
KF=Ua/Wo;Ea=KF*Wm;Ia=(Ua-Ea)/Ra;
Mem=KF*Ia;
Ie=Ua/Re;
Il=Ia+Ie;
Po=Mo*Wo;

```

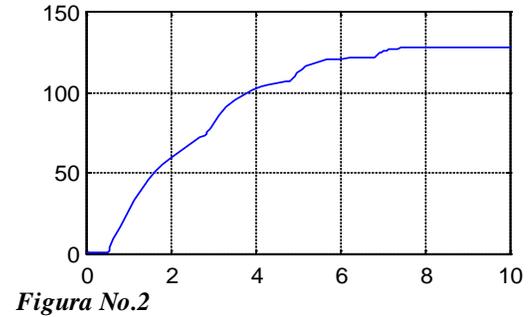


Figura No.2

```

Pem=Mem*Wm;
Pe=Ua*Il;
Ps=Pe-Po;
Ef=Ps/Pe*100;
disp('      Wm      Mem      Il
PePsEf')
S=[Wm Mem Il PePsEf]
Iaa=0:0.5:40;
Ill=Iaa+Ie;
pla=Iaa.^2*Ra;
Wr=(Ua-Iaa*Ra)/KF;Poo=Mo*Wr;
Pt=pla+Poo+400;
Pee=Ua*Ill;Pss=Pee-Pt;
Efs=Pss./Pee*100;
plot(Iaa,Efs),grid

```

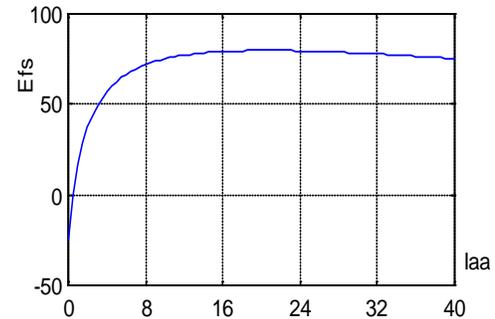


Figura No.2

Máquinas Asíncronas.

Ejercicio 1

%Cálculo de los parámetros del circuito equivalente en L.

%Partiendo de los datos nominales del motor tenemos:

p=2; %Número de pares de polos.
m=3; %Número de fase.
f=60; %Frecuencia en HZ.
Pn=11000; %Potencia nominal del motor en W.

Un=220; %Tensión nominal en V.
In=21.53; %Corriente nominal en A.

%Datos adicionales.

rs=0.462; %Resistencia en el estator.
rr=0.312; %Resistencia en el rotor.
xs=0.831; %Impedancia en el estator.
xr=1.262; %Impedancia en el rotor.
xm=27.5; %Impedancia en la rama de magnetización.

sn=0.027; %Deslizamiento nominal.

%Solución.

sigma=1+xs/xm; %Coeficiente de corrección

Rs=sigma*rs;

Rr=sigma^2*rr;

Xs=sigma*xs;

Xr=sigma^2*xr;

%Cálculo de los parámetros del circuito equivalente en L.

%Partiendo de los datos nominales del motor tenemos:

p=2; %Número de pares de polos.
m=3; %Número de fase.
f=60; %Frecuencia en HZ.
Pn=11000; %Potencia nominal del motor en W.

Un=220; %Tensión nominal en V.
In=21.53; %Corriente nominal en A.

%Datos adicionales.

rs=0.462; %Resistencia en el estator.
rr=0.312; %Resistencia en el rotor.
xs=0.831; %Impedancia en el estator.
xr=1.262; %Impedancia en el rotor.
xm=27.5; %Impedancia en la rama de magnetización.

Sn=0.027; %Deslizamiento nominal.

%Solución.

sigma=1+xs/xm;

Rs=sigma*rs;

Rr=sigma^2*rr;

Xs=sigma*xs;

Xr=sigma^2*xr;

Zo=(rs+rr)+i*(xs+xm);

Zs=(Rs+Rr/Sn)+i*(Xs+Xr);

Zeq=Zs*Zo/Zs+Zo;

Is=Un/Zeq;

Io=Un/Zo;

Ir=Un/Zs;

S=0:0.01:1;

Ir=Un./sqrt((Rs+Rr./S).^2+(Xs+Xr)^2);

W=2*pi*f/p;

Mem=3*Ir.^2*Rs/S/W;

Mem=3*p*Un^2*Rr./((2*pi*f*S.*((Rs+Rr./S).^2+(Xs+Xr)^2));

plot(S,Mem),grid

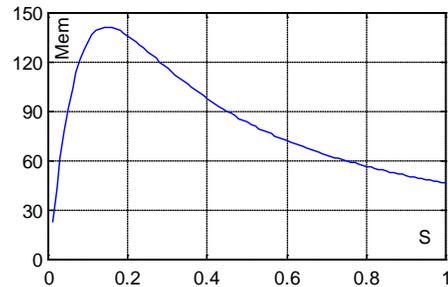


Figura No.1

Ejercicio 2

% Representación del campo magnético.

% Aplicando las expresiones 5.23 se tiene que:

%Datos

F1=0.43; %Flujo magnético del primer armónico en Wb.

F3=0.0175; %Flujo magnético del tercer armónico en Wb.

F5=0.0075; %Flujo magnético del quinto armónico en Wb.

T=0.693; %Paso polar en metros.

Ld=1.3; %Longitud del acero activo en metros.

t=0:pi/100:2*pi;

t1=t*180/pi;

B1=pi/(2*T*Ld)*F1

B3=pi^3/(2*T*Ld)*F3;

B5=pi^5/(2*T*Ld)*F5;

B1s=B1*sin(t);

B3s=B3*sin(3*t);

B5s=B5*sin(5*t);

Br=B1s+B3s+B5s;

plot(t1,B1s,t1,B3s,t1,B5s,t1,Br),grid

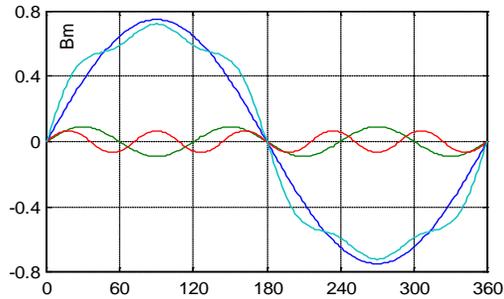


Figura No.2

Ejercicio3

%Determinación de las corrientes en el circuito en T.

%Datos nominales.

%Tipo HA 132 M4.

p=2; %número de pares de polos.

m=2; %número de fase.

f=60; %frecuencia en HZ.

Pn=11000; %potencia nominal en W.

U= 220; %tensión nominal en V.

In=21.53; %corriente nominal en A.

%Datos adicionales.

rs=0.462; %resistencia del estator en

rr=0.312; %resistencia del rotor.

xs=0.831; %impedancia del estator.

xr=1.262; %impedancia del rotor.

xm=27.5; %impedancia de

magnetización.

Sn =0.027; %deslizamiento nominal.

cosfi=0.876; %factor de potencia.

J=0.0463; %momento de inercia.

%Solución:

Zm=xm*i; %Impedancia de la rama de

magnetización

Zr=rr/Sn+xr*i;

Zs=rs+xs*i;

Zeq=Zs+(Zm*Zr)/(Zm+Zr);

Is=U/Ze;

Uab=U-Is*Zs;

Ir=Uab/Zr;

Im=Uab/Zm;

%Trazar La dependencia de Ir=f(S).

S=0:0.01:1;

Zrs=rr./S+xr*i;

Zeqs=Zs+(Zm*Zrs)/(Zm+Zrs);

Iss=U./Zeqs;

Uabs=U-Iss*Zs;

Irs=Uabs./Zrs;

Irsab=abs(Irs);

Ims=Uabs/Zm;

plot(S,Irsab),grid

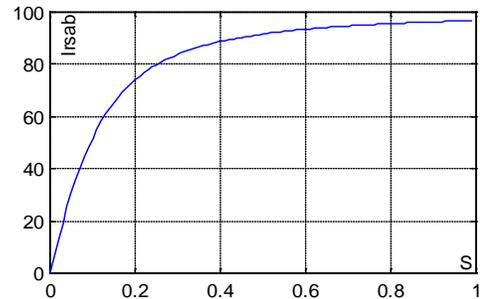


Figura No.3

Ejercicio 4.

%Cálculo de las características de funcionamiento del M.I.J.

disp('Introduzca los datos nominales según el orden y unidades ')

disp('a=[Pn(kW);Un(V);n(rpm);Fp;ln(A);Rn ;ks;ki;ka;R1(Ohm);p;f(Hz)]')

a=input('a=');

disp(' Introduzca los datos de la nueva frecuencia,tensión y el coeficiente')

disp('para la corrección de la potencia (kp)')

disp('b=[f(Hz); Un(V); kp]')

b=input('b=');

% Nomenclatura a utilizar partiendo de los datos de entrada.

P2=1e3*a(1); Un=a(2);n2=a(3);Fp=a(4);ln=a(5);Rn=a(6);ks=a(7);ki=a(8);

ka=a(9);r1=a(10);p=a(11);f1=a(12);f=b(1);

U1=b(2);kp=b(3);

% Para 60 Hz varían los parámetros de la siguiente forma:

Pn=kp*P2;Fr=f/f1;Ur=U1/Un;n3=60*f1/p;n

1=60*f/p;

S1=(n3-n2)/n3;

Sn=S1*Fr/Ur^2;

n=(1-Sn)*n1;

Mn=60*Pn/(2*pi*n);

Mm=ks*Mn;u1=1.15*Un/sqrt(3);

% Parámetros del circuito equivalente:

zm=3*p*u1^2/(4*pi*f*Mm)-r1;

xcc=sqrt(zm^2-r1^2);

x1=0.4*xcc;

x2=0.6*xcc;

zn=3*p*u1^2/(4*pi*f*Mn)-r1;

r2=Sn*(zn+sqrt(zn^2-zm^2));

l2=u1/(r1+r2/Sn+xcc*j);

l1s=ln*exp(-acos(Fp)*j);

lo=l1s-l2;

Zo=u1/lo;

rm=real(Zo)-r1;

xm=imag(Zo)-x1;

% Construcción de las características según potencia variable.

```

Pm=0.01:0.05:1.5;
s=Sn*Pm./(1-Sn*(1-Pm));
lr=u1./(r1+r2./s+xcc*s);
ls=lo+lr;
cosFi=cos(angle(ls));
P11=3*real(ls)*u1;
Q1=3*imag(ls)*u1;
l11=abs(ls);
Pem=3*abs(lr).^2*r2./s;
Me=60*Pem./(2*pi*n1);
% Característica en valores relativo.
Mem=Me./Mn;
P1=P11/Pn;
l1=l11./ln;
l2s=abs(lr);
ns=1-s;
pmd=0.0074/Rn;
Ps=Pm-pmd;
Re=Ps./P1;
' [s Re ns P1 Mem cosFi]
[s' Re' ns' P1' Mem' cosFi' Pm'];
plot(Pm,cosFi,'r',Pm,Re,'g',Pm,P1,'b',Pm,l1,'y',P
m,ns,'k',Pm,Mem),grid
text(0.1,1.01,'n')
text(0.25,0.7,'Re')
text(0.41,0.61,'cosFi')
text(1.25,1.15,'l1')
text(1.25,1.31,'M')
text(0.75,1.15,'P1')

```

Ejercicio 5

```

% datos
Un=380;Mn=4.07;Mmax=2*Mn;Sn=0.06;R1=14.
5;R2=10.9;Xcc=39.4;N=1500;
P=2;F=50;m=3;
%formula de Kloos
Ks=Mmax/Mn;
Sm=Sn*(Ks+sqrt(Ks-1));
S=[-1:0.01:2];
Mem=2*Mmax./(S./Sm+Sm./S);
%formula general
plot(S,Mem),grid
title('Característica Mem, en función del tiempo')
xlabel('Tiempo en (seg.)')
ylabel('Mem en N.m')

```

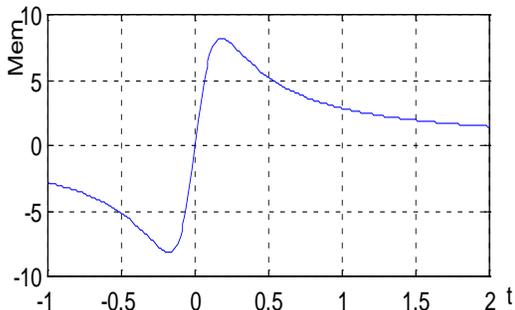


Figura No.5

Ejercicio 6.

%Regulación de velocidad en motores de inducción.

% Para un accionamiento se dispone de un motor de inducción con los siguientes datos nominales:

Pn=60; % Determinar:a)La velocidad del motor (n) par un momento en la carga de M1=50 kg.m.

Nn=577; % (rev/min).Construir la característica mecánica y la

ln2=160; % (A). dependencia $n=f(l2)$.

ks=2.9; % ($ks=Mm/Mn$).b)La resistencia a intercalar en el rotor

M1=50; % (kg.m) para obtener el momento M2=85 kg.m y las

M2=85; % (kg.m). velocidades $n2=440$ rev/min, $n3=525$ rev/min.

$n2=440$; % (rev/min).c) La resistencia a intercalar en el rotor,

$n3=525$; % (rev/min).si el motor trabaja en régimen generador

$n4=700$; % (rev/min).con velocidad $n4=700$ rev/min y como freno

$n5=-150$; % (rev/min) con $n5=150$ rev/min. $f=50$; % (Hz).

$p=5$;

% 1 N.m=9.81 kg.m.

% SOLUCIÓN:

% Parámetros nominales necesarios:

$Mn=60*Pn*1e3/(2*pi*Nn)$; % Momento nominal.

$Mm=ks*Mn$; % Momento máximo.

$No=60*f/p$; % Velocidad

sincrónica.

$Sn=(No-Nn)/No$; % Deslizamiento nominal.

$Sm=Sn*(ks+sqrt(ks^2-1))$; % Deslizamiento crítico.

% Respuesta (a).

% Aplicando la fórmula de Kloos se obtiene $M=f(n)$.

$S=0:0.01:1$; % Valores del deslizamiento.

$M=2*Mm./(S./Sm+Sm./S)$;

$N=(1-S)*No$; % Velocidad del rotor.

plot(N,M),grid

title('Característica $M=f(N)$ ')

ylabel('Momento (N.m)')

xlabel('Velocidad del rotor (rev/min)')

% Para M1=50 kg.m la característica es prácticamente lineal y pasa

% cero por tanto:

$M1=9.81*M1$; % Momento M1 en

N.m.

```

S1=Sn*Ml/Mn;           % Deslizamiento para
este momento.
N1=(1-S1)*No;         % Velocidad para
deslizamiento S1.
% Cálculo de R2 necesaria para determinar
l2=F(N).
R2=2*pi*No*Sn*Mn/(3*60*ln2^2);
l2=sqrt(2*pi*No*M.*S/3*60*R2);
hold on
% plot(N, l2)
% Respuesta (b).
% El deslizamiento para n2 y n3 serán
respectivamente:
S2=(No-n2)/No;
S3=(No-n3)/No;
% Para M2=85 kg.m también se trabaja en la
zona lineal de M=(N).
% La característica normal el deslizamiento será:
MlI=9.81*M2;          % Momento M2 en N.m.
Se2=Sn*MlI/Mn;       % Deslizamiento por M=f(N)
normal.
% Para el deslizamiento requerido S2 es
necesario insertar una
% resistencia en el rotor de modo
que: S2/Se2=(R2+Rad1)/R2.
Rad1=R2*(S2/Se2-1);
% Esto se repite para la velocidad n3:
Rad2=R2*(S3/Se2-1);
% Ahora el deslizamiento critico es Sm1 y Sm2;
Sm1=S2*(ks+sqrt(ks^2-1));
Sm2=S3*(ks+sqrt(ks^2-1));
%M=f(N):
Mr1=2*Mm./(S./Sm1+Sm1./S);
Mr2=2*Mm./(S./Sm2+Sm2./S);
plot(N, Mr1, N, Mr2)
% Respuesta (c).
S4=(No-n4)/No;
S5=(No-n5)/No;
% Para el momento M1.
% Generador:
Rad3=R2*(abs(S4/S1-1));
Rad4=R2*(S5/S1-1);

```

```

Sm3=S4*(ks+sqrt(ks^2-1));
Sm4=S5*(ks+sqrt(ks^2-1));
Mg=2*Mm./(S./Sm3+Sm3./S);
Mf=2*Mm./(S./Sm4+Sm4./S);
plot(N, Mg, N, Mf)
format short
% Simulación de la característica mecánica y de
corriente.
% Este algoritmo tiene en cuenta la fórmula del
momento relativo cuando se
% conocen todos los parámetros del motor de
inducción.
ks=2.6; r1=0.463; r2=0.383; Mn=34.44; Mm=89.54;
n1=3600; n=3507; U=265.58;
f1=60; p=1; J=0.034; xcc=2.63; x1=0.4*xcc; x2=0.6*
xcc; rm=4.626; xm=29.744;
ln=21.4;
Sn=(n1-n)/n1;
a=2*r1*(ks-1)/r2-1/Sn;
b=2*ks;
c=-Sn;
Scritico=[a b c];
S1=roots(Scritico);
Sm=S1(1);
q=2*r1*Sm/r2;
simu

```

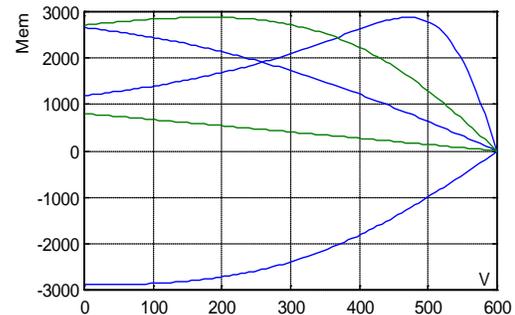


Figura No.6

Ejercicio #7: Simulación en régimen dinámico de un motor de inducción.

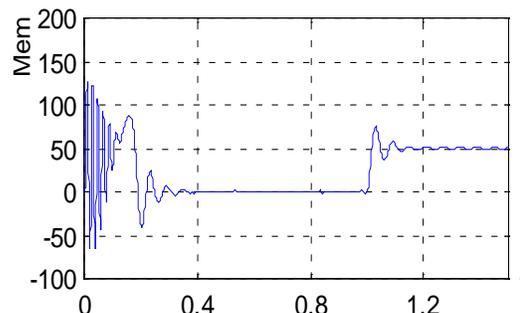
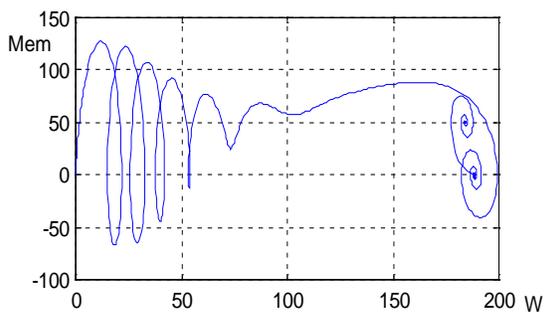
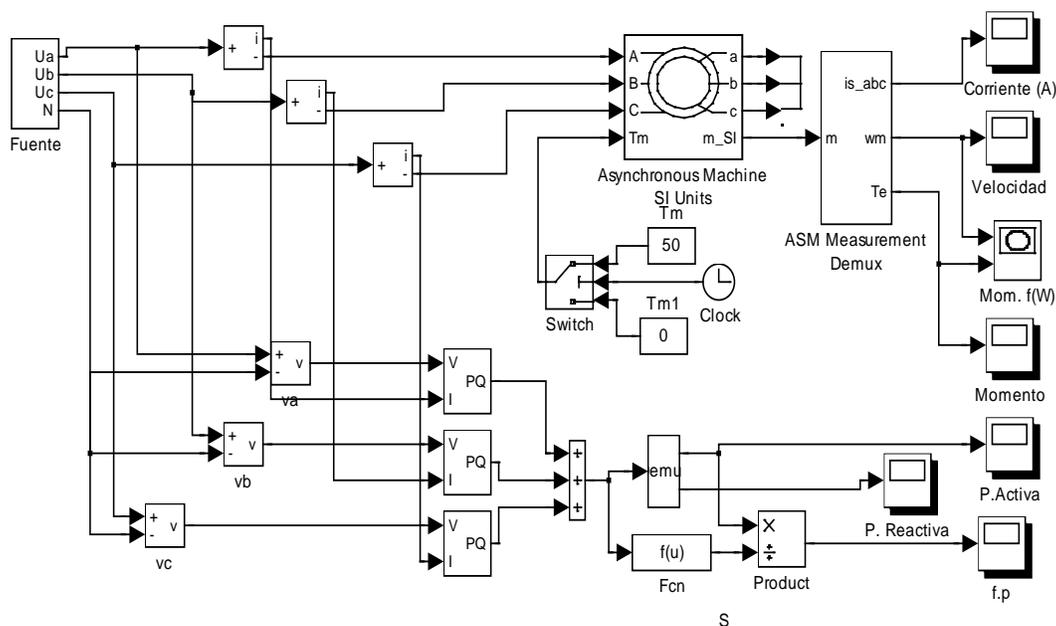


Fig.7. Característica mecánica y de momento en régimen dinámico

Ejercicio 8. Circuito equivalente del motor de inducción.

