




UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA



APLICACIONES INTERACTIVAS ASISTIDA POR
COMPUTADOR PARA LA ENSEÑANZA DE MÁQUINAS
ELÉCTRICAS, CUARTA PARTE: MOTOR DE INDUCCIÓN Y
MOTORES MONOFÁSICOS DE C.A.

OROPEZA, RUBÉN
RICARDI, IVÁN

Bárbula, Julio de 2002

**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA**

**APLICACIONES INTERACTIVAS ASISTIDA POR
COMPUTADOR PARA LA ENSEÑANZA DE MÁQUINAS
ELÉCTRICAS, CUARTA PARTE: MOTOR DE INDUCCIÓN Y
MOTORES MONOFÁSICOS DE C.A.**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA
ILUSTRE UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO ELECTRICISTA**

**OROPEZA, RUBÉN
RICARDI, IVÁN**

Bárbula, Julio de 2002

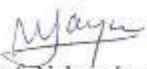
**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE ELÉCTRICA
DEPARTAMENTO DE POTENCIA**

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes miembros del jurado asignado para evaluar el trabajo especial de grado titulado **"APLICACIONES INTERACTIVAS ASISTIDA POR COMPUTADOR PARA LA ENSEÑANZA DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS, CUARTA PARTE: MOTOR DE INDUCCIÓN Y MOTORES MONOFÁSICOS DE C.A."**, realizados por los bachilleres: **Oropeza Rubén**, CI: 11.750.945 y **Ricardi Iván**, CI: 8.365.616, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.



Prof. Napoleón Arteaga
TUTOR



Prof. Nelson Laya
JURADO



Prof. Irahis Rodriguez
JURADO

Bárbula, Julio de 2002

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mis padres y hermanos, por brindarme el apoyo necesario, a mi esposa Ada Teresa por darme fuerzas y aliento para seguir adelante, a mis hijos Ivan José e Ivancy por servirme de inspiración, a todas aquellas personas que de una u otra forma contribuyeron a su realización y especialmente a la memoria de mi compañero y amigo Ruben Oropeza, a quien Dios llamo inesperadamente a su presencia, después de permitirle culminar este trabajo. En su nombre cito un escrito, tomado de los innumerables que creo y que representa una muestra de lo grande y noble de su espíritu.

Ivan Ricardi Mijares

MADRE

Dios es sabio, y no iba ha permitir que su creación no tuviera un don especial, y para eso escogió a alguien especial, escogió a la mujer, y la dotó con el don de dar vida, y tu madre fuiste escogida para que me dieras la vida. Gracias.

Porque todo tiene un principio, y el principio de mí ser eres tu. Quien da todo sin interés, ahora dejame retribuirle, porque te mereces todo.

La abnegación se define con tu acto, transfere tantos sentimientos, que la parte de ti esta a punto de ser, se alimenta de tus bondades y saldrá lo más puro y virginal que el mundo conoce. Tu creación.

Tu me diste la vida, me diste el sentir, me diste todo lo que tengo ahora, yo te daré la satisfacción del don que Dios te dio, analbeciendo tu nombre siguiendo los mandatos del señor, siendo el paradigma de tu proeza.

Sin ti no hubiese vida, todo es posible por ti y cada vez que una madre ejerce, es una señal que nos dice que no existe fin porque tu das continuidad.

Nunca lo he manifestado, pero no creas que no agradezco lo que haces por mí, perdóname por no saber expresarme y decirte todo lo que te quiero, mi corazón se desborda de sentimientos hacia ti, espero que estas palabras sepan manifestar mi sentir.

La experiencia y la ternura se juntan para formar a un ser hermoso, que con su experiencia me enseña lo bonito de la vida y su ternura me demuestra que los sentimientos no mueren con la edad. Feliz día abuela.

La vida me ha retribuido doble con dos madres, una me da la vida y me a hecho un hombre de bien y la otra me ha entregado su fruto que es sentido de mi vida.

De ti nació lo mas bello, la persona que me a hecho feliz, solo tu pudiste engendrar un ser excepcional porque eres un ángel.

Ruben Oropeza Z.
08-04-2001 08:01 pm

INDICE

	Pag.
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I PROBLEMA	2
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2 JUSTIFICACIÓN	3
1.3 OBJETIVOS	4
1.3.1 General	4
1.3.2 Específicos	4
1.4 ALCANCE	4
CAPITULO II MARCO TEÓRICO	6
2.1 ANTECEDENTES	6
2.2 BASES TEÓRICAS	7
2.2.1. Enfoque conductista	9
2.2.2. Teorías cognoscitiva	11
2.2.3. Teoría física	16
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS	19
CAPITULO III MOTOR DE INDUCCION TRIFÁSICO	22
3.1 ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS	22
3.2 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO	25
3.2.1 Ondas Espaciales de Campo Giratorio: Estatórico, Rotórico y Resultante	25
3.2.2 Tensiones, Corrientes Rotóricas, Deslizamiento	30
3.2.3 Torque electromagnético, ángulo de torque	33

3.2.4 Características Par-Velocidad: parámetros que las determinan, valores relevantes: par de arranque, par máximo, par nominal	35
3.2.5 Corriente-Velocidad: parámetros que las determinan	39
3.3 DIAGRAMA FASORIAL Y CIRCUITO EQUIVALENTE	41
3.3.1 Diagrama fasorial	41
3.3.2 Circuito equivalente	44
3.3.3 Análisis del circuito equivalente	49
3.3.4 Expresiones de par, corriente y potencia	52
3.4 VARIACIONES DE LA CARACTERÍSTICAS PAR- VELOCIDAD	57
3.4.1 Influencia de la reactancia	57
3.4.2 Influencia de la resistencia rotórica	57
3.4.3 Influencia de la tensión aplicada	58
3.4.4 Clasificación de los motores de inducción según el estándar Nema	59
3.4.4.1 Motor de diseño NEMA A	61
3.4.4.2 Motor de diseño NEMA B	61
3.4.4.3 Motor de diseño NEMA C	62
3.4.4.4 Motor de diseño NEMA D	62
3.4.4.5 Motor de diseño NEMA F	63
3.5 ARRANQUE DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN	65
3.5.1 Arranque a tensión plena, problemas asociados	65
3.5.2 Arranque a tensión reducida	65
3.5.2.1 Por resistencias	65
3.5.2.2 Por reactancias	66
3.5.2.3 Por autotransformadores	67
3.5.2.4 Estrella-triángulo	68
3.5.2.5 Por devanado parcial	70
3.5.3 Arranque del motor de rotor devanado	71

3.6 CONTROL DE VELOCIDAD DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	75
3.6.1 Cambios del número de polos	75
3.6.2 Control de la frecuencia de la línea	80
3.6.3 Control de tensión de línea	81
3.6.4 Control de deslizamiento: resistencia rotórica.	84
CAPITULO IV MOTORES MONOFÁSICOS DE C.A.	85
4.1 MOTOR MONOFÁSICO DE INDUCCIÓN	85
4.1.1 Construcción	85
4.1.2 Funcionamiento	86
4.1.3 Motor de fase partida	91
4.1.4 Motor de condensador	94
4.1.5 Motor de condensador permanente	96
4.1.6 Conexión de un motor trifásico como monofásico	97
4.2 MOTOR UNIVERSAL	99
4.2.1 Construcción	100
4.2.2 Funcionamiento	101
CAPITULO V ELABORACIÓN DEL MULTIMEDIA	105
5.1 INTRODUCCIÓN	105
5.2 DESCRIPCIÓN DEL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN	105
5.2.1. Conceptos básicos	105
5.2.2. Action script	111
5.3 MANUAL DEL USUARIO	114
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	121
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124

APENDICE A	126
A.1. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS EN EL MODELO DEL CIRCUITO	126
A.1.1. Ensayo de cc para la resistencia del estator	126
A.1.2. Ensayo a rotor bloqueado	127
A.1.3. Ensayo en vacío	130
APENDICE B	132
B.1. DEMOSTRACIÓN I	132
B.2. DEMOSTRACIÓN II	134
APENDICE C	137
C.1. CLASIFICACIONES ESPECIALES DE MOTORES DE INDUCCIÓN	137
C.1.1. Motor con rotor de jaula para mecanismos elevadores	137
C.1.2. Motor con rotor de jaula para accionamiento de prensas	138
C.1.3. Motor de muy bajo deslizamiento para unidades de bombeo de petróleo	138

INTRODUCCIÓN

El Motor de Inducción y los Motores Monofásicos de c.a. son las máquinas rotatorias utilizada por excelencia en las industrias y en la mayoría de los equipos domésticos, por este motivo es necesario que los profesionales de carreras afines a la electricidad, principalmente los ingenieros, conozcan los elementos constructivos y los principios que rigen el funcionamiento de estos importantes aliados.

En la carrera de Ingeniería Eléctrica se estudian estos motores y es imprescindible que los futuros profesionales queden bien preparados al cursar la materia relacionada con este tema. Esta importante razón avala la creación de herramientas multimedia como MAQMEDIAIV cuyo principal objetivo es lograr la visualización de los fenómenos, mediante módulos de simulación, haciendo uso de todas las ventajas que nos ofrece el computador.

El estudiante debe disponer de mucha imaginación para poder entender los fenómenos que intervienen en el funcionamiento de los motores de inducción, en el caso de una percepción inadecuada, se puede concebir una mala interpretación. Con MAQMEDIAIV se conseguirá que los usuarios tengan un concepto visual y una percepción concreta de la representación de estos fenómenos.

Este trabajo se desarrolló en cinco capítulos, el primer capítulo presenta el planteamiento del problema, los objetivos, la justificación y los alcances y limitaciones, el segundo capítulo incluye los antecedentes, las base teóricas, donde se encuentran los basamentos psicológicos que trae realizar un material didáctico y la definición de términos. El tercer y cuarto capítulo se encuentran la teoría sobre los motores de inducción y los motores monofásicos de c.a. respectivamente y el último capítulo presenta la elaboración del multimedia y el manual del usuario.

CAPÍTULO I

PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El entendimiento de los Motores de Inducción y Motores Monofásicos de c.a. no es sencillo, normalmente la explicación de dicho tema no establece fácilmente un conocimiento sostenido en la persona. Los Motores de Inducción y Motores Monofásicos de c.a. son máquinas que están presentes en muchos aspectos de la vida como en el trabajo, en el hogar, en los momentos de distracción, entre otros, no solo individualmente sino también para intereses grupales, como el funcionamiento de las industrias, el desarrollo de áreas urbanas y en medios de transporte. En fin, se puede conseguir un Motor de Inducción o un Motor Monofásico de c.a. en un aparato significativo para una persona como también en un sistema necesario para una sociedad (o la humanidad). Los fenómenos que se producen tales como: los campos magnéticos, corrientes, tensiones, flujos de potencia, pares electromagnéticos entre otros, son difíciles de percibir a través de los sentidos, por el contrario demanda una alta elaboración mental para su comprensión necesitándose de la ayuda de complejos instrumentos como voltímetros, amperímetros o vatímetros y además de la complejidad de las ecuaciones matemáticas que los explican, de los circuitos que los representan y de las cantidades de suposiciones que se deben realizar para tener una visión más clara sobre estos fenómenos.

La finalidad de este proyecto es crear una herramienta que ayude a complementar los conocimientos adquiridos sobre los Motores de Inducción y Motores Monofásicos de c.a., con lo cual se contará con un software didáctico e interactivo, donde se podrá obtener las características constructivas, principios de funcionamiento, fundamentos

teóricos, desarrollos de fórmulas matemáticas e ilustraciones. Sin embargo, lo más importante, es que se podrá interactuar con el programa para comprender los fenómenos que se producen en el funcionamiento de estas máquinas a través de las representaciones gráficas y circuitales.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Una de las finalidades de la realización de este proyecto es aumentar el material de estudio con que se cuenta hasta ahora sobre los Motores de Inducción y Motores Monofásicos de c.a. El Software constituye una herramienta didáctica que se utilizará para ayudar al interesado en la materia a tener una clara y amplia visión sobre estas máquinas, con lo cual la comprensión sobre el tema se hará con mayor facilidad y velocidad.

La Constitución Nacional de la República Bolivariana de Venezuela (1999), en su Art. 108 establece que “Los medios de comunicación social, públicos y privados, deben contribuir a la formación ciudadana. El Estado garantizará servicios públicos de radio, televisión y redes de bibliotecas y de informática, con el fin de permitir el acceso universal a la información. Los centros educativos deben incorporar el conocimiento y aplicación de las nuevas tecnologías, de sus innovaciones, según los requisitos que establezca la ley”. Este artículo obliga a los centros educativos del estado a implementar estos proyectos en pro del desarrollo y la evolución tecnológica.

Con relación a los estudiantes de electricidad en general el rendimiento académico se ubica normalmente por debajo de la nota límite de aprobación, y son pocos los que lo logran en su primer intento. Con el uso de ésta herramienta se amplía los recursos de investigación sobre el tema, complementando el proceso de formación de los estudiantes.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar aplicaciones interactivas asistidas por el computador para la enseñanza de Maquinas Eléctricas II de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo con referencia a los Motores de Inducción y Motores Monofásicos de c.a.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Recopilar una completa y clara teoría sobre los Motores de Inducción y Motores Monofásicos de c.a., adecuando la teoría recopilada al programa de contenido de la materia Maquinas Eléctricas II de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.
- Seleccionar los lenguajes de programas adecuados a utilizar que permita mostrar la información en un ambiente multimedia.
- Elaborar un ambiente multimedia con los programas seleccionados y la teoría recopilada.
- Evaluar al programa final.

1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES

El Software se ha de implementar con la finalidad de enseñar de manera práctica y amena los fundamentos básicos de los Motores de Inducción y Motores Monofásicos de c.a., utilizando la tecnología multimedia, la cual se sirve del uso de sonido, video, animaciones, representaciones gráficas y circuitales entre otros, que aporten un conocimiento de las generalidades en el área.

El programa pretende proporcionar a sus usuarios una herramienta informativa para concebir el conocimiento de algunos tópicos fundamentales de los Motores de Inducción y Motores Monofásicos de c.a., de modo que complementen el aprendizaje que se está adquiriendo. El software no sugieren suplantar al profesor, aunque puede encargarse de buena parte de la instrucción, complementar otros materiales, o bien, utilizarse para enriquecer las experiencias de los estudiantes. Este trabajo no puede ser utilizado sin la asistencia previa y sistemática a clases donde es desarrollado el contenido teórico, tampoco es capaz de ser utilizado para el estudio de algún Motor de Inducción o Motores Monofásicos de c.a. en particular.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

En la Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería, Escuela de Eléctrica en su Departamento de Potencia se han generado dos investigaciones que han desarrollado los cuatro primeros capítulos del contenido programático de la materia Maquinas Eléctricas II que se citan a continuación:

Urbina, J. y Brito, C. (1999). Aplicaciones interactivas asistidas por el computador para la enseñanza de máquinas eléctricas. Trabajo Especial de Grado no publicado. Universidad de Carabobo, Bárbula.

Ramos, E. (1998). Aplicaciones interactivas asistidas por el computador para la enseñanza de máquinas eléctricas, segunda parte: flujo magnético y campos magnéticos giratorios. Trabajo Especial de Grado no publicado. Universidad de Carabobo, Bárbula.

En los últimos años se han realizado programas multimedia para la atención de la problemática del aprendizaje, a nivel nacional e internacional. En la escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo se está implementado el sistema S. A. M. (Sistema de Aprendizaje Multimedia), bajo el cual se han desarrollado varios programas entre los cuales se mencionan:

Villalonga y Figuera, (2001). Sensores de Fibra Optica. Trabajo Especial de Grado no publicado. Universidad de Carabobo, Bárbula.

Palacios, C. y Gomes, I. (2000). S.A.M. Sensorica. Trabajo Especial de Grado no publicado. Universidad de Carabobo, Bárbula.

2.2. BASES TEÓRICAS

Aprender por uno mismo o ayudar a otros a que aprendan no es algo innato, ni se adquiere por el simple hecho de asistir durante una buena parte de la vida a ambientes escolarizados de enseñanza-aprendizaje. Hace falta entender y aplicar teorías de aprendizaje humano que den sustento al diseño de ambientes de aprendizaje efectivos. Quienes intentan desarrollar materiales de enseñanza-aprendizaje apoyados con una computadora sin tener un buen sustento teórico respecto al aprendizaje humano y a las características de la computadora como medio educativo, puede entrar a replicar, indiscriminadamente, las estrategias de enseñanza-aprendizaje que conocen. Algunas de éstas sacarán provecho de la computadora como medio educativo, pero muy posiblemente van a desaprovechar las características únicas de la máquina para llevar a la práctica enfoques psicológicos que respondan a las características del aprendiz y de lo que se aprende.

Ambientes de aprendizaje son las circunstancias que se disponen (entorno físico y psicológico, recursos, restricciones) y las estrategias que se usan, para promover que el aprendiz cumpla con su misión, es decir, que logre aprender. Una clase, por ejemplo, es un ambiente de aprendizaje circunscripto a un lugar y momento específico, en el que profesores y estudiantes, con apoyo de los materiales y equipos de que dispongan, interactúan bajo la estrategia de enseñanza que el profesor haya escogido, en unos casos usará un método interactivo como el socrático, la lluvia de ideas o el trabajo en grupo, en otro podrá ser uno expositivo, como la clase magistral o la observación de audiovisuales que considera esenciales para lo que se aprende y quienes lo aprenden.

Sin embargo, el ambiente de aprendizaje no es lo que hace que uno aprenda, es condición necesaria pero no suficiente. La actividad del aprendiz durante el proceso de enseñanza-aprendizaje es la que permite aprender. Un ambiente de aprendizaje puede ser muy rico, pero si el aprendiz no lleva a cabo actividades que aprovechen su potencial, de nada sirve.

Si hubiera una teoría que atendiera todos los aspectos del fenómeno, que abarcan las demás teorías, no habría necesidad de estudiar las otras, como tal no es el caso conviene analizar los diferentes aportes.

La motivación es uno de los temas psicológicos más estudiados, sin embargo aún no sabemos cuál es su papel real en el aprendizaje. Fulquié (1970), señala que la motivación actúa a nivel inconsciente, de modo que cuando se lleva a justificar una acción a nivel consciente se habla entonces de motivo. Los motivos personales se despiertan y mantienen por medios de incentivos. Así pues, los motivos son las justificaciones personales que un sujeto tiene para actuar, mientras que los incentivos son estímulos externos que provocan y mantienen los motivos. Los motivos son propios del aprendiz, mientras que los incentivos son propios del profesor y restantes elementos integrantes del quehacer didáctico.

La motivación y el refuerzo han de tratarse conjuntamente máxime cuando el aprendizaje se va haciendo más complejo. La motivación es la raíz dinámica del comportamiento: "estar motivado es simplemente desear algo, y el refuerzo consiste en conseguirlo" (Borge R. y Seoborne A. E. M, 1971, p. 44). La persona tiende hacia algo porque siente una necesidad y cuando lo consigue, ya sea alcanzando un bien o eliminando un mal, se produce un refuerzo. El sentido de este estudio no es analizar la idea de refuerzo bajo un punto de vista psicológico, sino cuáles son los que se pueden aplicar en el aprendizaje. Si analizamos el proceso instructivo se entresacan una serie de elementos de los cuales pueden nacer un refuerzo. Nos referimos al

profesor, al material, del cual es el que se toca es este trabajo porque es el de interés, a las actividades y al ambiente socio-familiar.

Las aproximaciones al fenómeno del aprendizaje oscilan entre dos polos: conductismo y cognoscitvismo, en el primer polo no se toma en cuenta el organismo (el sujeto que aprende), sólo las condiciones externas que favorecen su aprendizaje, en el conductismo lo fundamental es la programación, en pequeños pasos, de eventos que conduzcan a lograr el resultado esperado (respuesta) y el reforzamiento de las respuestas, que confluyen hacia el logro de lo que se desea. En el otro polo lo que cuenta es el individuo, el aprendiz, con todo su campo vital, su estructura cognoscitiva, las expectativas que tiene. En lo conductista lo que cuenta es el aprendiz dentro su entorno psicológico y social. La motivación interna, la significancia, el procesamiento de la información, las actitudes de las personas, entre otros, son tomados en cuenta como factores que promueven el aprendizaje.

2.2.1 Enfoque Conductista

Para B. F. Skinner, el aprendizaje es un cambio observable y permanente de conducta y la enseñanza es la disposición de contingencias de reforzamiento que permite acelerar el aprendizaje. La programación es el proceso de disponer lo que el alumno debe aprender en una serie de etapas, diseñadas para hacer avanzar al estudiante desde lo que ya conoce hasta lo que ya ignora respecto a principios nuevos y más complejos. No se puede decir que "programación" y "conductismo" son sinónimos, de hecho todas las teorías que usan enfoque sistemático para organizar ambientes de aprendizaje insisten en la necesidad de programar, en el sentido de descomponer aquello que se desea enseñar en sus partes constituyentes y una vez que se tiene identificada la estructura que subyace, escoger un programa o ruta de acción.

Lo que hace conductista una programación, es el tratamiento que se da al aprendiz para conducirlo de donde se supone que está a donde se desea llevarlo. La teoría del

reforzamiento y la programación en pequeños pasos son las herramientas básicas que utiliza el conductismo para ello. Skinner señala que el reforzamiento es un reconocimiento o una recompensa de alguna índole para mostrar que un organismo ha ejecutado algo satisfactoriamente.

La individualización es un resultado práctico que se deriva el uso de material programado, con este se logra que cada una de las experiencias de los aprendices sea algo individual, manteniéndose una acción recíproca entre el aprendiz y su material de aprendizaje.

La teoría de la programación y del reforzamiento tiene el mérito de complementar una serie de principios utilizados en la aula y que se derivan de las teorías de estímulo-respuesta. Desde que se usó complementariamente la teoría de reforzamiento, se superó el hecho de que las teorías de estímulo-respuesta, formuladas para explicar la conducta de aprendizaje en estudiantes individuales, se aplicarán a grupos de alumnos en situaciones prácticas, enfatizando la importancia y la singularidad del patrón de aprendizaje de cada estudiante, y urgiendo a los maestros para que actuaran y pensarán de acuerdo a la instrucción individualizada.

El aprendizaje programado es un método para impartir conocimientos, pero no se trata del único método. La decisión de utilizarlo con preferencia a otros tiene que basarse en los objetivos del instructor y en la preparación de los aprendices, al igual que sucede con otros métodos.

Los resultados obtenidos con el aprendizaje programado no sugieren que un material programado pueda suplantar a un maestro eficiente, aunque puede encargarse de buena parte de la instrucción, complementar otros materiales, o bien, utilizarse para enriquecer las experiencias de los aprendices. El material se encarga de proporcionarles a los aprendices la información básica sobre un tema dado y libera al instructor de los ejercicios repetitivos a los que debe dedicarse año tras año.

Esto no debe implicar que el instructor que cuenta con apoyo de material programado pueda dedicarse a no hacer nada. Por el contrario, su labor debe transformarse, mientras que los estudiantes adquieren en forma programada las bases de un tema, el maestro puede asumir tareas más creativas para los aprendices. Puesto que los aprendices avanzarán a su propio ritmo, las tareas que desempeñan los maestros se volverán más complejas e importantes. Esto puede llegar a hacer sentir la necesidad de redefinir el papel del maestro, quien deberá dedicar más tiempo a los debates provechosos, así como a efectuar la adaptación de los materiales a las necesidades individuales y personales en sus diversas situaciones vitales.

2.2.2 Teorías Cognoscitivas

No se puede decir que haya una única corriente psicológica que centre sus esfuerzos en entender los procesos mentales y las estructuras de memoria humana con el fin de comprender la conducta humana, es decir, cognoscitivismo. Por este modo se presenta a continuación los aportes de algunos de los teóricos cognoscitivos más representativos, sin pretender con ello agotar el tema.

La tesis gestaltista del campo vital sirve de marco de referencia para entender los factores que según esta teoría inciden o promueven el aprendizaje. La comprensión que tenga una persona de su ambiente, formado por su pasado, presente y futuro, además de una realidad concreta y otra imaginaria, la comprensión que tenga de su campo, será la estructura cognoscitiva del campo vital. El aprendizaje puede entenderse como un cambio en las estructuras del campo vital del aprendiz, algo que transforma ese mundo propio y que, por lo tanto, no puede desligarse de la propia experiencia ni de las expectativas y está íntimamente ligado a los contextos psicológico y físico dentro de los cuales se promueven.

El proceso de enseñanza-aprendizaje bajo la teoría gestáltica debe tomar en cuenta los elementos que se indican a continuación:

Motivación intrínseca. Cuando una persona tiene necesidades insatisfechas desarrolla un estado de tensión cuyo objetivo es la búsqueda de una salida satisfactoria. Una situación de aprendizaje es motivante cuando está intrínsecamente relacionada con algo de interés o significancia para la persona, cuando la ayuda a dominar su ambiente.

La adquisición está ligada fundamentalmente al discernimiento repentino, momento en el cual la persona encuentra la relación existente entre los varios elementos o estímulos que lo enfrentan y los integran en las estructuras de su campo vital.

El mecanismo más importante en la retención es la buena forma, buen gestalt. Lo recomendado es algo que tiene significancia para la persona. Un asunto que no tiene significancia para el individuo no será bien recordado y puede desaparecer relativamente rápido. Algo que ha sido integrado en una estructura existente y que por esto tiene significancia, será recordado.

La generalización, o la transferencia del aprendizaje, ocurre a raíz de similitudes perceptuales entre situaciones, es decir, cuando no solamente están presente las relaciones perceptuales entre situaciones, sino cuando hay un interés, una estructura que articule.

En la teoría de procesamiento de la información los estudiosos de los procesos internos durante el aprendizaje y de las estructuras de memoria han propuesto y sometido a validación modelos que explican cómo aprende el hombre y cómo almacena lo que aprende, a partir de las teorías de procesamiento de información.

Entre los principios de esta teoría y que interesa a este trabajo se dice que los estudiantes procesan más eficientemente la información si participan activamente en su tratamiento que si están tratando de absorberla pasivamente. Uno de los factores

que determinan la capacidad para procesar información en el estudiante es su habilidad para prestar atención, por otra parte, la capacidad total del individuo para atender puede variar con su grado de motivación y de participación.

Entre las estrategias para favorecer al acrecentamiento, la estructuración y el afinamiento de lo que se aprende, tenemos: llamar la atención sobre aspectos claves en lo que se aprende, procurar que los términos y los conceptos nuevos no saturen la capacidad de la memoria a corto plazo y que se asocien con conceptos que existen ya en la estructura de la memoria, proporcionar claves para codificar y decodificar lo aprendido, brindar variedad de contextos para utilizar lo aprendido, proporcionar información de retorno diferencial

Todos estos enfoque psicológicos utilizados para desarrollar materiales de enseñanza-aprendizaje asistido por computador están basados en los materiales audiovisuales, en este trabajo nos referimos preferentemente al material audiovisual, como un tipo de material que ofrece determinada versatilidad para conseguir los objetivos didácticos. Se puede afirmar sin ningún temor que con el empleo del material audiovisual el papel del profesor no queda disminuido sino potenciado, el temor de que dificulte la comunicación profesor-alumno no debiera preocuparnos tanto, si pensáramos que la comunicación no consiste en la transmisión de significados, éstos no son transmisibles, comunicables, solo los mensajes son transmisibles, pero los mensajes no son los significados, la máquina, además de precisar de alguien que la programe y le proporcione material, nunca podrá proporcionar orientación y consejo, tareas éstas específicas del profesor. Las exigencias actuales de la didáctica son las de conseguir el máximo rendimiento con los medios disponibles, entre los cuales están el material audiovisual.

Numerosas investigaciones se han preocupado de averiguar la eficiencia didáctica del material audiovisual, los podríamos resumir en los siguientes puntos:

El material audiovisual favorece el aprendizaje, porque renueva la capacidad de atención y actúa como catalizador del proceso.

El material audiovisual favorece especialmente a los alumnos medios y mediocres, contribuyendo a una disminución de las diferencias intelectuales personales. Aunque hay que advertir que tal afirmación dependería en gran manera del tipo de material empleado, puesto que el lenguaje audiovisual está muy lejos de ser unívoco y al profesor le sigue correspondiendo la tarea de interpretación.

El material audiovisual posee una gran versatilidad de aplicación que posibilita toda clase de combinaciones, y hace muchas veces innecesarias la presencia física del profesor durante la transmisión del lenguaje didáctico. De este modo, resulta especialmente recomendable para tareas de formación permanente.

Su empleo en la enseñanza institucionalizada facilitará la actitud y habilidad necesarias para someter aquellos mensajes al análisis crítico.

El material audiovisual además de ser eficiente también tiene limitaciones y peligros que son muy importantes de atender y de tener cuidado cuando se elabora un material de esta naturaleza y que resumiremos en los siguientes puntos:

La representación audiovisual no es nunca representación exacta de la realidad, por causa de la limitación de los instrumentos reproductores y de la intención del realizador, el primer inconveniente se va limitando con el avance de la tecnología, pero el segundo permanecerá siempre. Gilson (1967) describe detalladamente, bajo el ejemplo de las grabaciones sonoras, esta limitación:

Los timbres de la música registrada en el disco son conservados con una fidelidad que, salvo excepción, los hace reconocibles sin error posible, pero todos estos timbres son transmitidos por una membrana vibrante que los modifica todos. Por lo que estos aparatos y la imagen de una

música no son la realidad. El placer que proporcionan estos registros puede ser grande, pero es para la música lo que el placer de ver una fotografía de una mesa es el de ver la mesa. No es simplemente una imagen duplicada, es otro objeto.

En los mensajes audiovisuales tiene cabida efectos subconscientes que provocan consecuencias adoctrinadoras, no libremente aceptadas por el sujeto discente. Como ejemplo podemos citar el efecto subliminal, producido por la presentación de un filme a velocidad superior el tiempo de permanencia de la imagen en la retina, o por la reproducción de sonidos en frecuencia fuera de los márgenes captados por el oído humano.

Actualmente los avances de la neurociencia han afectado el ámbito educativo para contribuir al desarrollo de la eficacia humana de los alumnos y de los docentes como participantes activos del proceso enseñanza-aprendizaje, es necesario saber que se dispone de medios diferentes y complementarios para procesar información, denominados hemisferios cerebrales que han generado un impacto que induce a crear estrategias educativas significativas dentro del proceso.

La educación ha sido planteada sobre el manejo del hemisferio cerebral izquierdo, de allí parten los procesos analíticos, secuenciales, lógicos y lineales. Afortunadamente, existe el hemisferio cerebral derecho, que proporciona el equilibrio para lograr una mayor percepción del mundo ante las experiencias significativas de cada sujeto. A este respecto, en 1996, Carpio dijo que el uso de todo el cerebro en situaciones de aprendizaje, implica un cambio de paradigmas y un modelo a seguir.

El apasionante mundo de la Neurociencia proporciona elementos significativos para la comprensión y el desarrollo del pensamiento innovador, y de los procesos cognitivos y conductuales que se dan en el individuo. Los seres humanos tienen como sistema receptor para captar esta representación del entorno, la visión, el oído, el tacto, el gusto y el olfato. Con este sistema se codifica la información, se lleva al cerebro y se produce una respuesta de acuerdo con las experiencias previas y también

dependiendo a la organización que se le da a los pensamientos. Cada individuo estructura sus pensamientos de forma diferente, esto dependiendo del sistema líder de cada persona, es decir, si el sistema que más se utiliza es la vista, el sistema líder será el visual. Si predomina en la persona la utilización de la audición, el oído será su sistema líder, quinesésico si usa más las sensaciones corporales, el olfato y el gusto. (Sambrano, 1997).

Esto quiere decir, que los órganos de los sentidos son de gran importancia, puesto que son los encargados de la comunicación interna y externa, de la percepción y experiencia que se toma del mundo y que se registran en los diversos sistemas de maneras diferentes. Por medio de los sistemas de representación el individuo absorbe la información para procesarla a través del sistema cerebral produciendo nuevos aprendizajes. La experiencia del mundo varía según el funcionamiento del sistema nervioso, esto depende del mapa o representación mental que tenga el individuo.

La dinámica del cerebro se ha constituido en una gran expectativa para científicos, educadores, profesionales de ayuda y otros interesados en el manejo de la conducta. Tanto así, que la década de los noventa ha sido considerada y declarada como la "década del cerebro", por el Congreso de los Estados Unidos.

Debido al potencial educativo de la tecnología multimedia, la psicología de la enseñanza hace uso de estas teorías para lograr que la implantación del software educativo este enmarcada dentro de los procesos de enseñanza-aprendizaje.

2.2.3 Teoría física

Para tener una idea de las teorías físicas que explican los fenómenos que están relacionados con las máquinas rotativas hay que mencionar a varios físicos y sus hallazgos que hicieron posibles la creación y explicación de dicha máquina.

Obligatoriamente se tiene que hablar del experimento de Faraday (1831) como punto de partida.

En el experimento de Faraday, como se muestra en la figura 2.1, al cerrar el interruptor en el circuito primario, se produce una corriente en el secundario. Al cabo de un tiempo, la corriente cesa. Si entonces se abre el interruptor, vuelve a aparecer corriente en el secundario, la cual nuevamente cesa al cabo de un tiempo breve. Es importante recalcar que los circuitos primario y secundario se hallan físicamente separados (no hay contacto eléctrico entre ellos).

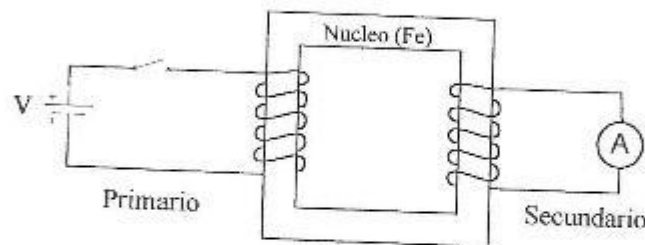


Figura 2.1 Experimento de Faraday

Los resultados del experimento de Faraday (y muchos otros) se pueden entender en términos de una nueva ley experimental, que se conoce como la ley de Faraday-Lenz.

La variación temporal del flujo magnético enlazado por un circuito, induce en éste una f.e.m:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.1)$$

Ley de Lenz: El sentido de la f.e.m inducida es tal que siempre tiende a oponerse a la variación del flujo magnético.

La variación temporal del flujo magnético enlazado por un circuito puede deberse a varias causas, entre las cuales se puede mencionar:

1. Variación temporal de \vec{B} :

$$\vec{B} = \vec{B}(r, t) \quad (2.2)$$

2. El circuito se mueve.
3. El circuito se deforma.

Por supuesto, una combinación de las causas anteriores también producirá variación del flujo. Observemos también que la Ley de Faraday es una ley experimental, que no puede deducirse, en su forma general, de ningún otro hecho previamente conocido.

Recordemos ahora que la f.c.m de un circuito C se define como:

$$e = \int_C \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (2.3)$$

El flujo magnético es Φ :

$$\Phi(s) = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (2.4)$$

La ley de Faraday, ecuación 2.1, expresa cuantitativamente las tensiones inducidas por un campo magnético variable, originándose una conversión electromecánica de energía cuando la variación de flujo está acompañada de un movimiento mecánico. En las máquinas rotativas las tensiones se inducen en los devanados o grupos de bobinas haciéndola girar dentro del campo magnético, o bien haciendo girar, también, el campo que atraviesa dichos devanados, o por último diseñando el circuito magnético de tal forma que varíe la reluctancia al girar el rotor. Por cualquier de estos procedimientos el flujo concatenado con una determinada bobina varía cíclicamente

induciendo en ella una tensión. Conectando entre sí un circuito de bobinas de tal forma que todas las tensiones inducidas en cada una de ellas contribuyan positivamente el fin deseado, se obtendrá un devanado inducido.

Las máquinas de inducción constituyen un tercer tipo de máquinas, en las que tanto en el estator como el rotor circulan corrientes alternas. El ejemplo más clásico lo constituyen los motores de inducción en los que la corriente alterna se aplica directamente al devanado del estator y por inducción (a manera de transformador) en el rotor. Estas máquinas pueden considerarse como un transformador en el que la potencia eléctrica se transmite entre el estator y el rotor al mismo tiempo que se produce un cambio de frecuencia y aparece una potencia mecánica. Aun cuando los motores de inducción son los de más corriente uso raramente se emplean como generadores, ya que sus características y funcionamiento como tales son inadecuados para muchas aplicaciones.

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Ambientes de aprendizaje: son las circunstancias que se disponen (entorno físico y psicológico, recursos, restricciones) y las estrategias que se usan, para promover que el aprendiz cumpla con su misión, es decir, que logre aprender.

Motivación: la motivación actúa a nivel inconsciente. Estar motivado es simplemente desear algo.

Motivo: Según Fulquié (1970), cuando se lleva a justificar una acción a nivel consciente se habla de motivo.

Incentivos: Según Fulquié (1970), son estímulos externos que provocan y mantienen los motivos.

Refuerzo: Estar motivado es simplemente desear algo, y el refuerzo consiste en conseguirlo (Borge R. y Scoborne A. E. M, 1971, p. 44).

Programación: Es el proceso de disponer lo que el alumno debe aprender en una serie de etapas, diseñadas para hacer avanzar al estudiante desde lo que ya conoce hasta lo que ya ignora respecto a principios nuevos y más complejos.

Enseñanza Audiovisual: Proceso particular de enseñanza que se vale de los medios audiovisuales para alcanzar determinados objetivos didácticos.

Material Audiovisual: Son los elementos concretos de que se vale la enseñanza audiovisual, por ejemplo, un film, un software.

Medios Audiovisuales: Son los sistemas más complejos donde se insertan los materiales, por ejemplo, el cine, la computadora.

Efecto Subliminal: Relativo a las sensaciones que quedan por debajo del umbral normal de percepción.

Neurociencia: Parte de la medicina que trata de los nervios.

Conductismo: Orientación psicológica iniciada en 1912 por el norteamericano J. B. Watson, que considera la conducta humana como el objeto de la Psicología.

Cognoscitivismo: Corriente psicológica que centra sus esfuerzos en entender los procesos mentales y las estructuras de memoria humana con el fin de comprender la conducta humana.

Motivación intrínseca: Cuando una persona tiene necesidades insatisfechas, desarrolla un estado de tensión cuyo objetivo es la búsqueda de una salida

Memoria a Corto Plazo: La información procedente del exterior se mantiene en la misma forma como fue presentada (la capacidad es limitada) pero se pierde muy rápidamente (hay desvanecimiento temporal rápido).

Tecnología Multimedia: Es la tecnología que se sirve del uso de sonido, video, animaciones, entre otros.

CAPÍTULO III

MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO

3.1. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

El motor de inducción es un mecanismo al cual se le suministra energía eléctrica, que se convierte en energía mecánica bajo la forma de un par mecánico y de un movimiento giratorio de velocidad ligeramente variable con la carga.

Como todos los motores eléctricos, el motor de inducción consta de un *estator*, al cual se le suministra la energía eléctrica para producir un campo magnético variable en el tiempo, y un *rotor* en el cual, por el principio de la inducción electromagnética, se induce un campo que interactúa con el campo del estator para producir el par, que termina produciendo el movimiento.

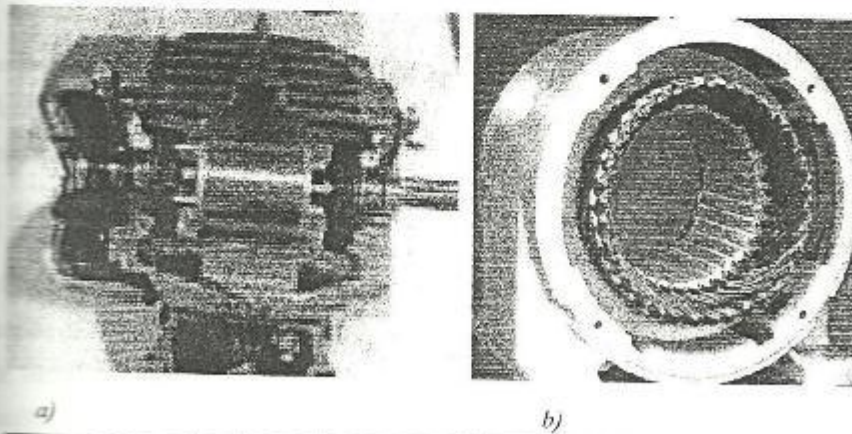


Figura 3.1. a) Corte de un motor de inducción. b) Estator de un motor de inducción típico.

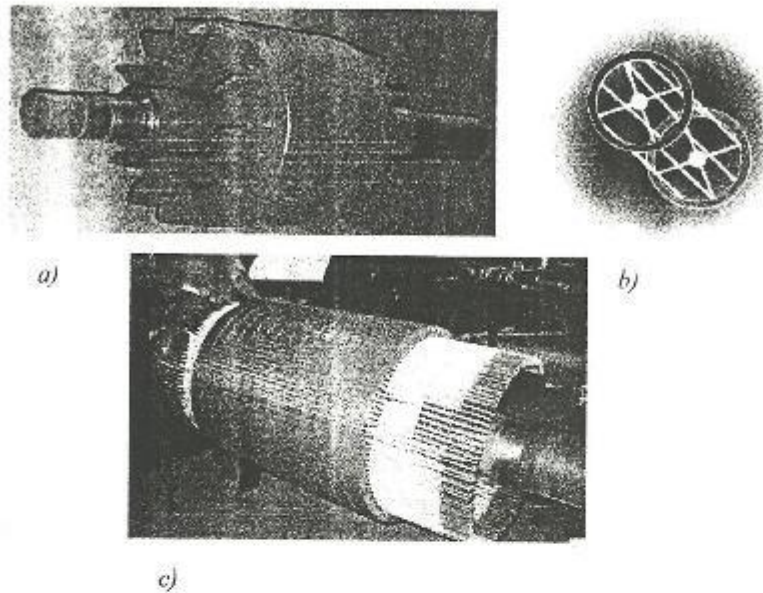


Figura 3.2. **a)** Rotor típico de jaula de ardilla. **b)** Esquema de una jaula de ardilla
c) construcción de un rotor de jaula de ardilla

El *estator* está constituido por un núcleo de hierro laminado en cuyo interior existen tres arrollamientos o bobinas, uno por fase, colocados simétricamente formando un ángulo de 120° eléctricos en el espacio de la circunferencia del entrehierro.

Existen dos tipos de rotores en los motores de inducción: el *rotor jaula de ardilla* y el *rotor devanado*. El *rotor de jaula de ardilla* es el más común, consiste en un núcleo de hierro laminado, en cuya periferia posee ranuras donde se colocan una serie de barras conductoras, que se ponen en cortocircuito en sus extremos mediante *anillos de cortocircuito*. Se le da el nombre de jaula de ardilla por la similitud con las ruedas de ejercicio donde suelen jugar las ardillas o los ratones de laboratorio.

El motor de jaula de ardilla tiene el inconveniente de que el circuito del rotor es eléctricamente inaccesible al usuario, contrario al caso del motor de rotor bobinado, que como su nombre lo indica, el rotor está constituido por un bobinado trifásico similar al del estator, cuyos arrollamientos aislados se conectan generalmente en Y, y en el otro extremo terminan en anillos rozantes que se conectan por medio de escobillas a un dispositivo externo que permiten variar la resistencia del conjunto, así como también, conectar dispositivos de la electrónica de potencia.

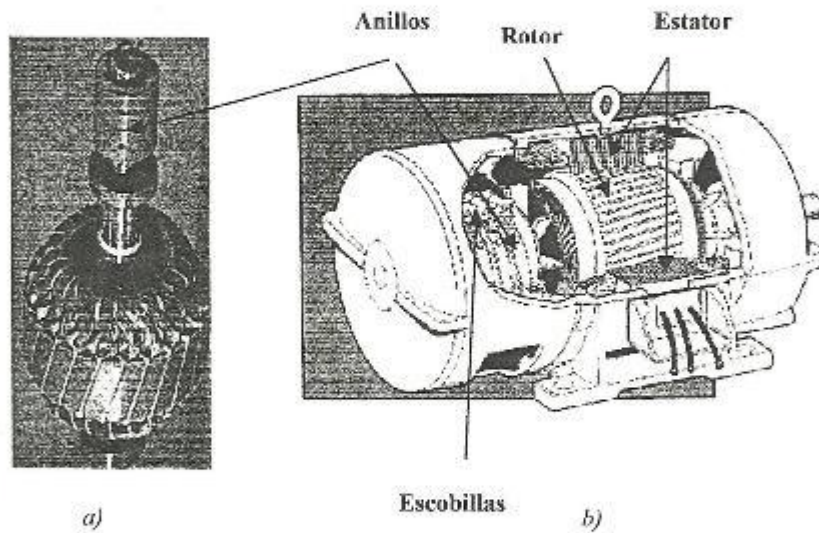


Figura 3.3. a) Fotografía de un rotor devanado. b) Dibujo del corte de un motor de inducción de rotor devanado indicando sus partes

3.2. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

3.2.1. Ondas espaciales de campo giratorio: estático, rotórico y resultante

Los devanados de cada una de las fases están desplazadas entre sí 120° eléctricos espaciales alrededor de la circunferencia del estator. La figura 3.4 muestra el devanado trifásico concentrado de paso completo, de un par de polos, que en realidad representan los devanados distribuidos. Estas bobinas concentradas que producen ondas senoidales de f.m.m. alineadas con los ejes magnéticos de cada fase.

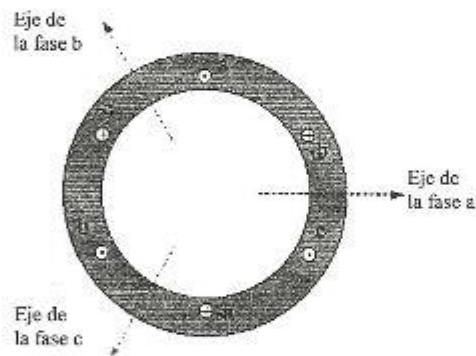


Figura 3.4. Estator con devanado trifásico concentrado de un par de polos

Si el devanado se alimenta con un conjunto de tensiones equilibradas, circulan corrientes equilibradas. Estas corrientes producen fuerzas magnetomotrices cuyos gráfico en función del espacio es no senoidal, periódico, por lo que es posible expresar en términos de un desarrollo en series de Fourier, cuya componente fundamental es una función senoidal de magnitud variable en el tiempo y se muestra a continuación:

$$F_{mm} = \frac{4}{\pi} K_w \frac{N_{ph}}{P} i \cos \theta \quad (3.1)$$

donde el factor $4/\pi$ surge del análisis de series de Fourier de la onda de F_{mm} , K_w es el factor de devanado que toma en cuenta el factor de paso y el de distribución, N_{ph} es el número de vueltas en serie por fase, P el número de polos por fase, y θ representa el ángulo eléctrico medido desde una referencia que coincide con el eje de la fase a.

Siendo

$$i = I_p \cos \omega t \quad (3.2)$$

la distribución de F_{mm} quedará definida por:

$$F_{mm} = (F_{max} \cos \omega t) \cos \theta \quad (3.3)$$

que es la función de una onda estacionaria de amplitud variable en el tiempo, conocida como una onda pulsante, siendo F_{max}

$$F_{max} = \frac{4}{\pi} K_w \frac{N}{P} I_p \quad (3.4)$$

Como se indica al inicio de esta sección, en una máquina trifásica los devanados se desplazan entre sí 120 grados eléctricos alrededor de la circunferencia del estator (figura 3.4). Estas bobinas producen ondas de fuerza magnetomotriz cuyas fundamentales están centradas en los ejes magnéticos de cada fase, por lo que están desfasadas entre sí 120 grados eléctricos espaciales. Si el devanado se alimenta con un conjunto de tensiones equilibradas, circulan corrientes equilibradas. Bajo estas condiciones las corrientes instantáneas de cada fase se muestran en la figura 3.5a y las ecuaciones que las representan se indican a continuación:

$$i_a = I_o \cos \omega t \quad (3.5)$$

$$i_b = I_o (\cos \omega t - 120) \quad (3.6)$$

$$i_c = I_o (\cos \omega t + 120) \quad (3.7)$$

siendo I_a, I_b, I_c , el valor máximo de la corriente para cada fase. Se asume como referencia el instante en que i_a es máxima y positiva.

Aplicando la entidad trigonométrica adecuada, la ecuación 3.3 se puede reescribir de la siguiente forma:

$$F_{mm} = F_{max} \left[\frac{1}{2} \cos(\theta - \omega t) + \frac{1}{2} \cos(\theta + \omega t) \right] \quad (3.8)$$

lo que indica que la onda de F_{mm} producida por cada devanado, se puede descomponer en dos ondas rotatorias, cada una con amplitud igual a la mitad de F_{max} : una positiva, F_{mm}^+ , que viaja en el sentido positivo de θ y otra negativa, F_{mm}^- , que viaja en el sentido negativo de θ . Para la fase a tendremos:

$$F_{mm}^+{}_a = \frac{1}{2} F_{max} [\cos(\theta - \omega t)] \quad (3.9)$$

$$F_{mm}^-{}_a = \frac{1}{2} F_{max} [\cos(\theta + \omega t)] \quad (3.10)$$

considerando el eje de la fase a como referencia, $\theta = 0^\circ$, se puede aplicar el procedimiento anterior a la fase b , que tiene su eje a $\theta = 120^\circ$ y la fase c , con $\theta = -120^\circ$, entonces

$$Fmm^+_b = \frac{1}{2} F_{max} [\cos(\theta - \omega t)] \quad (3.11)$$

$$Fmm^-_b = \frac{1}{2} F_{max} [\cos(\theta + \omega t + 120^\circ)] \quad (3.12)$$

$$Fmm^+_c = \frac{1}{2} F_{max} [\cos(\theta - \omega t)] \quad (3.13)$$

$$Fmm^-_c = \frac{1}{2} F_{max} [\cos(\theta + \omega t - 120^\circ)] \quad (3.14)$$

sumando las ondas de Fmm positivas de cada una de las fases

$$Fmm^+ = Fmm^+_a + Fmm^+_b + Fmm^+_c = \frac{3}{2} F_{max} [\cos(\theta - \omega t)] \quad (3.15)$$

y las ondas de Fmm negativas

$$\begin{aligned} Fmm^- &= Fmm^-_a + Fmm^-_b + Fmm^-_c \\ &= \frac{1}{2} F_{max} [\cos(\theta + \omega t) + \cos(\theta + \omega t - 120^\circ) + \cos(\theta + \omega t + 120^\circ)] \\ &= 0 \end{aligned} \quad (3.16)$$

Esto indica que si desplazamos en 120° los devanados de cada fase de un devanado trifásico y lo alimentamos con un sistema de corrientes trifásicas balanceadas, resulta una onda viajera en el sentido positivo de θ

$$Fmm = \frac{3}{2} F_{max} [\cos(\theta - \omega t)] \quad (3.17)$$

que gira alrededor del entrehierro de la máquina, con una velocidad angular constante $w=2\pi f$ radianes por segundo. Para una máquina con P polos por fase

$$w = 4\pi \frac{f}{P} (\text{rad/seg}) \quad (3.18)$$

La fuerza magnetomotriz resultante F_{mm_r} , se puede obtener gráficamente como la suma vectorial de las contribuciones de cada una de las fases en cualquier instante de tiempo. La figura 3.5b ilustra los resultados para $wt=0, \pi/3$ y $2\pi/3$. Cuando $wt=0$, la corriente i_a es máxima y positiva, y la fuerza magnetomotriz que origina está en su máximo valor F_{max} , centrada en el eje de la fase a y se denota como F_{mm_a} . Para este mismo instante de tiempo las corrientes i_b e i_c tienen la mitad del valor máximo en sentido negativo, y originan fuerzas magnetomotrices en la misma dirección, denotadas como F_{mm_b} y F_{mm_c} respectivamente. Al sumar vectorialmente las contribuciones de cada fase obtenemos la resultante centrada en el eje de la fase a:

$$F_{mm_r} = \frac{3}{2} F_{max} \quad (3.19)$$

Para $wt=\pi/3$, la fuerza magnetomotriz resultante tiene el mismo valor pero desplazada 60° eléctricos espaciales en sentido contrario a las agujas del reloj, en este caso i_c es máxima negativa, i_a e i_b tienen la mitad del valor máximo positivo. Para $wt=2\pi/3$, i_b es máxima positiva, i_c e i_a son negativas y con la mitad del valor máximo, se genera la misma resultante de fuerza magnetomotriz pero desplazada 120° desde la referencia. Para cualquier instante arbitrario de tiempo se puede obtener la onda de fuerza magnetomotriz resultante, la cual mantiene su amplitud y forma senoidal, pero se desplaza alrededor de la circunferencia del entrehierro, como corresponde al campo giratorio uniforme generado en las máquinas de inducción cuando se alimentan con corrientes trifásicas balanceadas.

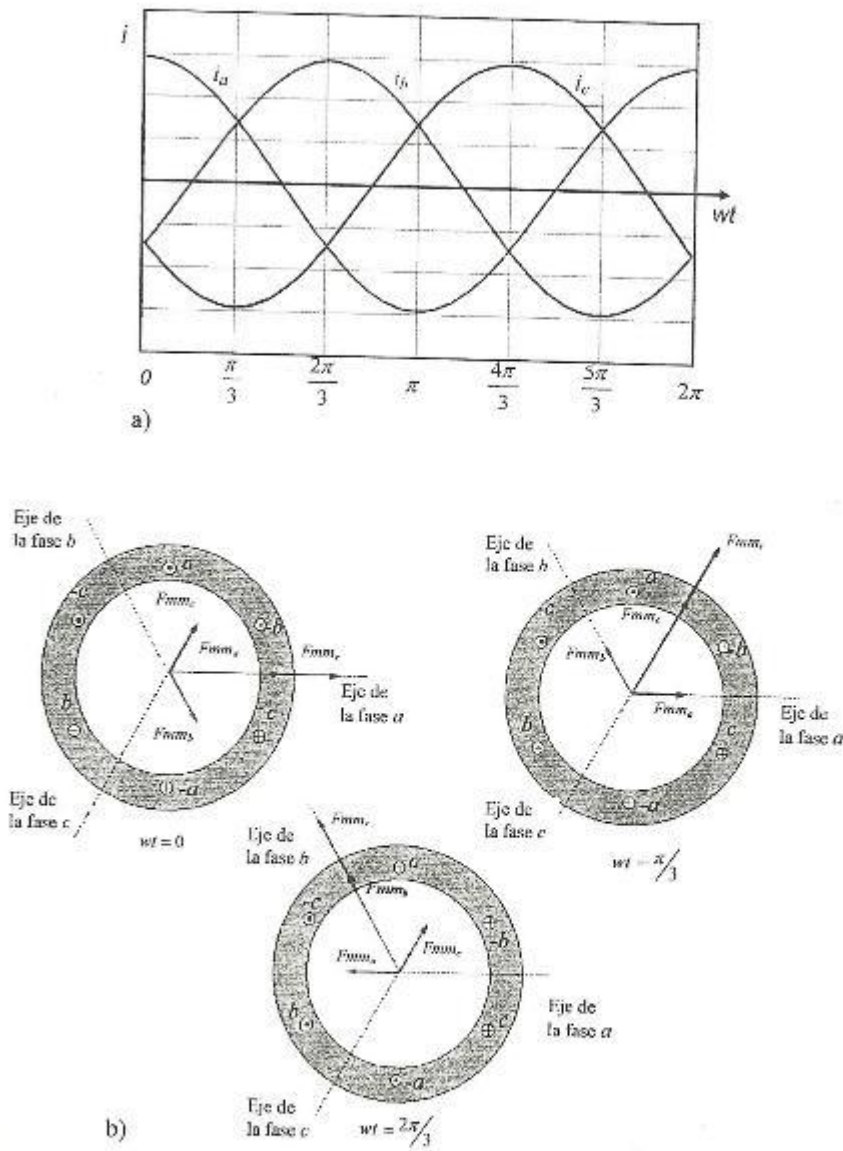


Figura 3.5. a) Corrientes instantáneas de fase bajo condiciones trifásicas balanceadas.
 b) Campo magnético rotatorio producido por corrientes trifásicas balanceadas.

3.2.2. Tensiones, corrientes rotóricas, deslizamientos

Antes de las deducciones de tensiones, corrientes y deslizamiento se explicará el circuito rotórico. Cuando el motor está en funcionamiento, en cada barra rotórica existirá una f.e.m. resultante, inducida por el campo giratorio resultante, cada barra tiene una cierta cantidad de resistencia y de reactancia de dispersión, por esto, la barra se representa desde el punto de vista circuital como una tensión resultante, \vec{E}_2 , en serie con una resistencia r_2 y una reactancia x_2 . Como se explicará más adelante la tensión E_2 se puede expresar $E_2 = S E_{2SS}$ y la reactancia x_2 se puede expresar como $s x_{2SS}$. Las barras tienen dos puntos comunes, que son los anillos posterior y anterior, entonces el conjunto de barras constituyen un sistema polifásico de tensiones (las inducidas en las barras) alimentando a un sistema polifásico de impedancias (las propias de las barras). Con estas consideraciones el circuito polifásico y el circuito por barra rotórica se indican en las figuras 3.6 y 3.7 respectivamente.

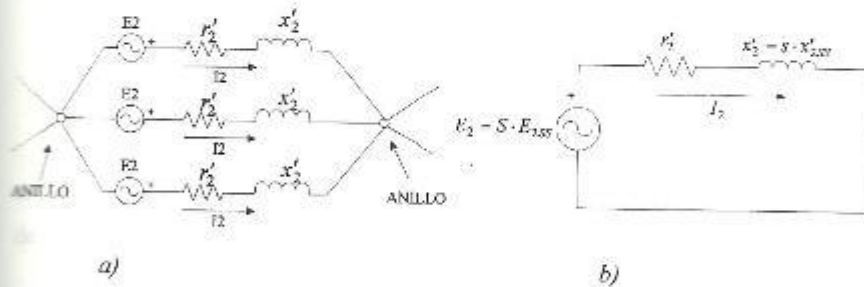


Figura 3.6. a) Circuito equivalente polifásico del rotor de un motor de inducción.
b) Circuito equivalente monofásico del rotor de un motor de inducción.

La f.e.m., \vec{E}_2 , depende de la magnitud del campo resultante y de la velocidad con que este campo corta la barra, de esto resulta:

$$\vec{E}_2 = K_{rot} \cdot B_{rp} \cdot (N_s - N_{rot}) \tag{3.20}$$

Donde:

B_m : Magnitud del pico de la onda espacial giratoria de densidad magnética resultante.

N_s : Velocidad en revoluciones por minuto del campo resultante.

N_{rot} : Velocidad del rotor.

K_{rot} : Constante de proporcionalidad.

La tensión a rotor bloqueado se deduce de la ecuación anterior. Haciendo $N_{rot} = 0$ tenemos:

$$\bar{E}_{2ss} = K_{rot} \cdot B_m \cdot N_s \quad (3.21)$$

Si se dividen las ecuaciones 20 y 21, resulta:

$$\frac{\bar{E}_2}{\bar{E}_{2ss}} = \frac{N_s - N_{rot}}{N_s} \quad (3.22)$$

A la expresión $\frac{N_s - N_{rot}}{N_s}$, de la ecuación 3.22, se le llama deslizamiento, que es la diferencia existente entre las velocidades del campo resultante y del rotor en función de la velocidad del campo resultante y se ha cognotado con la letra "S".

En la figura 3.7 se puede observar el triángulo de potencia y el defasaje existente entre la tensión y la corriente rotórica.

De las figuras 3.6 y 3.7 se pueden deducir la corriente y el factor de potencia.

$$I_2 = \frac{S \cdot \bar{E}_{2ss}}{\sqrt{(r_2')^2 + (S \cdot x_{2ss}')^2}} \quad (3.23)$$

$$\cos(\phi_2) = \frac{r_2'}{\sqrt{(r_2')^2 + (s \cdot x_{2ss}')^2}} \quad (3.24)$$

La corriente de una barra rotórica está en retardo respecto a la tensión resultante de la barra por un ángulo variable, el ángulo de la impedancia rotórica, ϕ_2 .

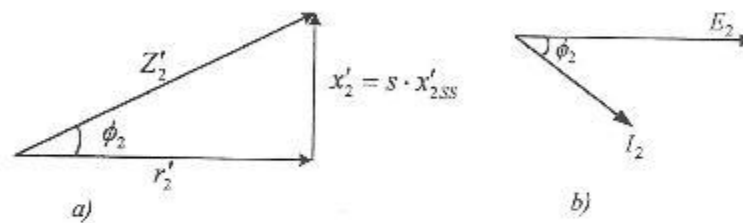


Figura 3.7. a) Triángulo de impedancia del circuito rotórico b) Diagrama fasorial del circuito rotórico

3.2.3. Torque electromagnético, ángulo de torque

Como se ha visto, el campo resultante induce en las barras rotóricas una f.e.m. neta que impulsan las corrientes de las barras. El carácter inductivo de la impedancia de fuga de las barras es el causante del defasaje entre el conductor de máxima f.e.m. y el de máxima corriente que es el ángulo de la impedancia de fuga, ϕ_2 .

En la figura 3.8 se observa que el ángulo $90 + \phi_2$ corresponde al desplazamiento entre el valor pico de la onda de inducción magnética debida al flujo rotórico y la debida al flujo resultante, la cual es llamado ángulo de torque. El torque es la reacción entre el campo rotórico y el campo estatórico que tienden a alinearse, de este modo tenemos:

$$T = K \cdot B_{rot} \cdot B_{est} \cdot \sin(B_{rot}, B_{est}) \quad (3.25)$$

T es el par, B_{rp} es la magnitud pico del flujo, B_{rot} es la magnitud pico del campo rotórico y la magnitud pico del campo estático es B_{arp}

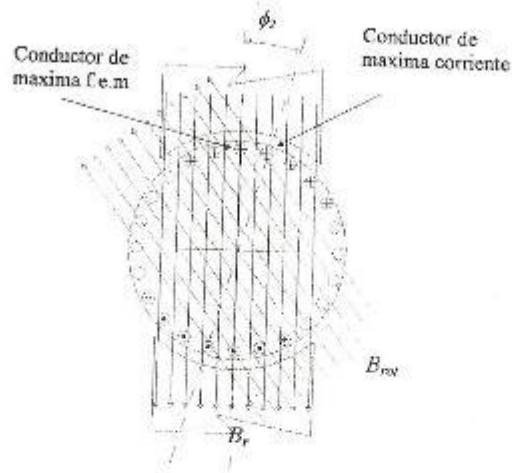


Figura 3.8. Relación espacial entre el campo resultante y el campo del rotor

En el diagrama vectorial se puede observar:

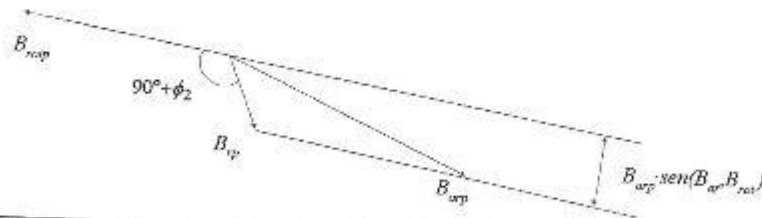


Figura 3.9. Diagrama fasorial de las ondas de inducción de armadura, rotórica y resultante.

De la figura 3.9 se puede deducir,

$$B_{arp} \cdot \text{sen}(B_{rp}, B_{arp}) = B_{rp} \cdot \text{sen}(90 + \phi_2) = B_{rp} \cdot \text{cos}(\phi_2) \quad (3.26)$$

como B_{rot} es proporcional a I_2 , por tanto la expresión de par queda, pero ajustando la constante de proporcionalidad:

$$T = K_t \cdot B_{rot} \cdot \bar{I}_2 \cdot \cos(\phi_2) \quad (3.27)$$

De las ecuaciones 3.23 y 3.24 se puede reescribir la ecuación 27 como:

$$T = K_t \cdot B_{rot} \cdot \frac{S \cdot \bar{E}_{2ss}}{\sqrt{(r_2')^2 + (S \cdot x_{2ss}')^2}} \times \frac{r_2'}{\sqrt{(r_2')^2 + (S \cdot x_{2ss}')^2}} \quad (3.28)$$

3.2.4. Característica Par-Velocidad: parámetros que las determinan, valores relevantes: par de arranque, par máximo, par nominal.

La relación existente entre el par de un motor de inducción y la velocidad, que en este caso se interpreta mediante el deslizamiento, es muy importante para la comprensión de los fenómenos desarrollados y funcionamiento en el motor de inducción.

Supongamos que tomamos una corriente I_2 en función de la velocidad, un $\cos(\phi_2)$ también en función de la velocidad y una constante y los multiplicamos entre si, se obtiene al par en función de la velocidad como se puede observar en la ecuación 3.29 que se representan simultáneamente estas variables. Anterior a este punto se verificó la veracidad de esta suposición. La corriente es la corriente de una barra rotórica, el $\cos(\phi_2)$ es el factor de potencia de una barra rotórica y la constante contiene la magnitud de la densidad de flujo resultante, ya que su magnitud depende de la tensión que se aplica y se puede suponer constante debido a su mínima variación.

La figura 3.10 muestra las gráficas de par, corriente y $\cos(\phi_2)$ para un motor de inducción en función del deslizamiento S . Como en el arranque $N_{rot}=0$, por lo tanto el

deslizamiento es igual a uno, observe que el par desarrollado por el motor no es elevado a pesar que la corriente tiene su máximo valor, esto es porque $\cos(\phi_2)$ es bajo (es decir, que las bandas de corrientes están desalineadas respecto al campo resultante, ver figura 3.7). En el arranque, el par del motor es ligeramente mayor que el par a plena carga o par nominal, por lo cual el motor arrancará soportando cualquier carga que se le coloque a plena potencia. Al disminuir la velocidad (esto es bajar S) se reduce ligeramente la corriente pero el $\cos(\phi_2)$ mejora (las bandas de corrientes se centran mejor con el campo), el par sube haciéndose aun mayor que el mecánico (par de la carga), con lo que la máquina continua acelerando. Hay un momento en que el par no aumenta más, este momento llamado par máximo es de dos a tres veces el par nominal a plena carga del motor y ocurre para $\phi_2=45$ grados. Luego el par comienza a disminuir hasta que se iguala al par nominal o par de la carga y entonces, ya no habrá aceleración y el conjunto motor carga quedará definido a cierta velocidad (ver la figura 3.10).

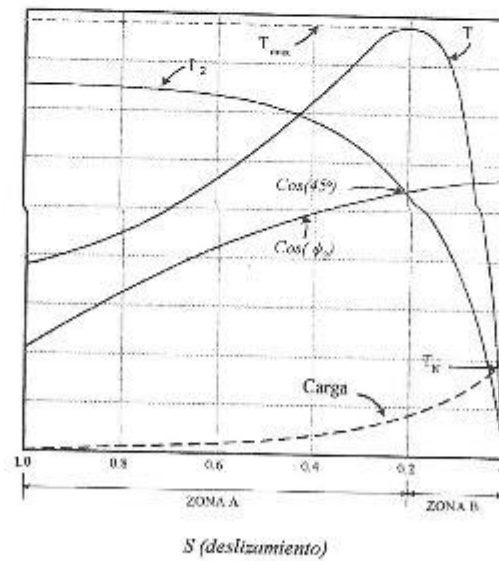


Figura 3.10. Par, corriente rotórica y $\cos(\phi_2)$ de un motor de inducción

Las gráficas mostradas en la figura 3.10 se pueden construir también de las ecuaciones siguientes:

$$Z_2 = \sqrt{(r_2)^2 + (s \cdot x_{2SS})^2} \quad (3.29)$$

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{S \cdot E_{2SS}}{Z_2} \quad (3.30)$$

$$\cos(\phi_2) = \frac{r_2}{Z_2} \quad (3.31)$$

$$T = k \cdot \vec{I}_2 \cdot \cos(\phi_2) \quad (3.32)$$

mediante el estudio de las variaciones de los parámetros, a través de dos casos y con la ayuda del triángulo de impedancia del circuito rotórico:

Caso 1. $r_2 \gg s \cdot x_{2SS}$

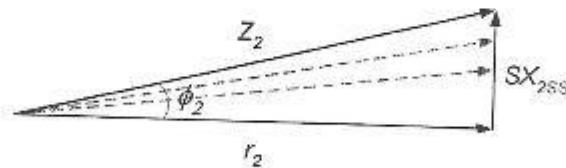


Figura 3.11. Triángulo de impedancia del circuito rotórico de un motor de inducción

Observe el triángulo de impedancia de la figura 3.11, la magnitud de Z_2 varía poco debido a que $r_2 \gg s \cdot x_{2SS}$ y es constante. Al estudiar la influencia de Z_2 en la ecuación 3.30 se observa que corriente rotórica es directamente proporcional a los cambios del deslizamiento, ya que E_{2SS} es constante y la impedancia no varía mucho

debido a la condición impuesta. Ahora haciendo referencia a la ecuación 3.31 se observa que el $\cos(\phi_2)$ aumenta poco ya que es inversamente proporcional a los pequeños cambios de Z_2 .

En conclusión el par (de la ecuación 3.32) varía en forma similar a la corriente porque presenta mayor variación comparada con el $\cos(\phi_2)$. El caso 1 representa el funcionamiento del motor para deslizamientos bajos y se observa en la zona b de la figura 3.10.

Caso 2. $r_2 \ll (s \cdot x_{2ss})$

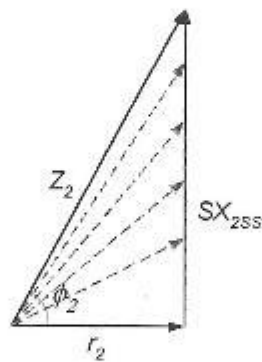


Figura 3.12. Triángulo de impedancia del circuito rotórico de un motor de inducción.

Observe el triángulo de impedancia de la figura 3.12, la magnitud de Z_2 varía considerablemente debido a que la magnitud sX_{2ss} tiene disminuciones relevantes y esta proporcionalmente relacionada a ella mediante la ecuación 3.29. El $\cos(\phi_2)$ presenta grandes aumentos, debido a que en la ecuación 3.31 que lo representa contiene a Z_2 en el denominador y su magnitud varía considerablemente. Observe la ecuación 3.30, la misma contiene a Z_2 en el denominador y en el numerador a S ,

ambos parámetros sufren grandes cambios que originan una alta variación de I_2 , el primero disminuye haciendo que aumente y el segundo disminuye originando una considerable disminución, entonces estas contribuciones se compensan causando en realidad una variación muy pequeña de I_2 .

El par presenta un aumento muy marcado, siendo el responsable el $\cos(\phi_2)$ que varía mucho en esta zona, la corriente I_2 como se dijo en el párrafo anterior no varía mucho, por lo que su contribución no es apreciable.

3.2.5. Característica Corriente-Velocidad: parámetros que la determina.

La figura 3.13, se deduce de la ecuación 3.33 que proviene del circuito monofásico rotórico de la figura 3.6. En dicha ecuación se observa que a muy bajos deslizamientos el término resistivo r_2'/s es mucho mayor que $x_{2\sigma}'$, de modo que la resistencia del rotor predomina y la corriente del rotor varía linealmente con el deslizamiento. A deslizamientos altos, $x_{2\sigma}'$ es mucho mayor que r_2'/s y la corriente del rotor se aproxima a un valor de estado estacionario mientras el deslizamiento se hace muy grande.

$$\bar{I}_2 = \frac{E_{2s\sigma}}{\frac{R_2'}{s} + jX_{2\sigma}'} \quad (3.33)$$

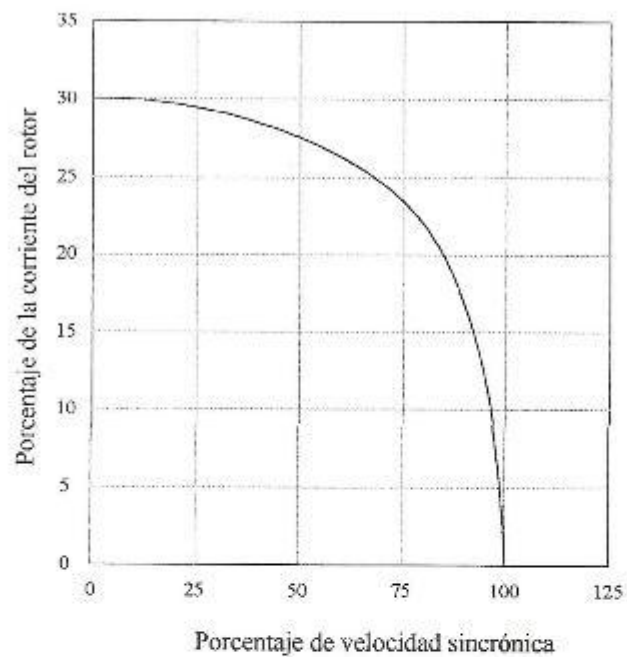


Figura 3.13 Corriente del rotor en función de la velocidad del mismo

3.3. DIAGRAMA FASORIAL Y CIRCUITO EQUIVALENTE

3.3.1. Diagrama Fasorial

Las corrientes del estator y del rotor crean sendas ondas de f.m.m. de amplitud constante que giran en el entrehierro a la velocidad de sincronismo. El conjunto de estas dos f.m.m. crea en el entrehierro una onda de densidad de flujo B_r , el ángulo ϕ_2 es el factor de potencia de la impedancia rotórica, o se podría decir, que es el comprendido entre el conductor de máxima f.e.m. y el de máxima corriente inducidos sobre el rotor. Esto quiere decir que cuando en una barra rotórica se induce por efecto del campo resultante la máxima tensión, cierto tiempo después (ϕ_2) esta misma barra será la de máxima corriente. Si consideramos esta barra como el lado de una bobina, en el eje magnético de ella ubicado a 90 grados se encontrará el máximo de B_{rot} , entonces el ángulo $90 + \phi_2$, será el correspondiente al desplazamiento entre el valor pico de la onda de inducción magnética rotórica B_{rot} y la inducción magnética resultante B_r . En base a esto podemos trazar el primer diagrama fasorial de espacio.

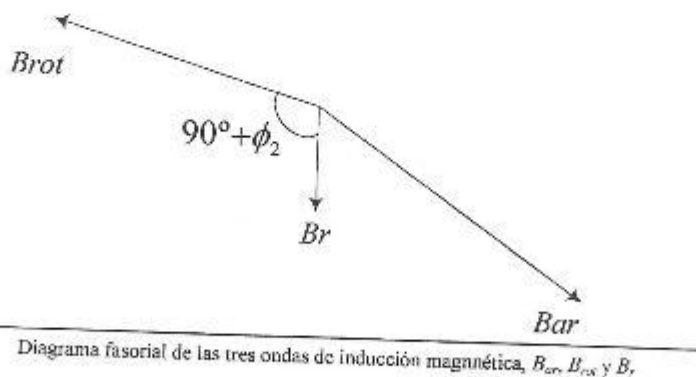


Figura 3.14. Diagrama fasorial de las tres ondas de inducción magnética, B_{rot} , B_{rot} y B_r .

La máquina de inducción no varía su onda de densidad de flujo B_r entre vacío y plena carga, debido a que la impedancia de las fases estatóricas es baja y por lo tanto

las caídas de tensión en ellas, observe la figura 3.15 que representa el circuito eléctrico de una fase del bobinado estatórico de un motor de inducción. La ecuación 3.34 representa matemáticamente este circuito, si se desprecia el término $I_1(r_1 + x_1)$ la tensión E_1 entre los terminales a y a' es igual a la tensión aplicada V_I que es constante, la cual proviene de una red de potencia infinita y dado que:

$$E_{rms} = 4.44 \cdot f \cdot K_w \cdot N_{ph} \cdot \Phi_r \quad (3.34)$$

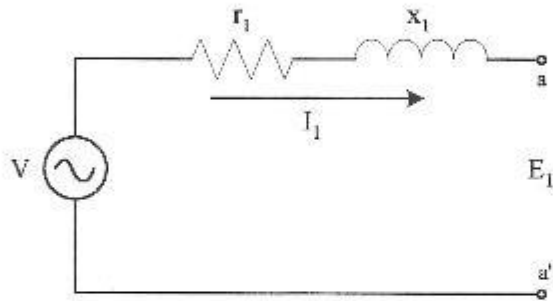


Figura 3.15. Circuito equivalente del estator de un motor de inducción

donde f es la frecuencia de la línea, N_{ph} es el número de vueltas por fase y K_w es el factor de devanado. En vista de que todos estos parámetros son constantes y E_{rms} no varía se deduce que Φ_r es constante.

$$\Phi_r = \int B_r \cdot ds \quad (3.35)$$

De la ecuación 3.35 el diferencial de superficie ds no varía y, en vista de que Φ_r permanece constante, B_r no varía.

Partiendo de vacío ideal, esto es sin carga y sin pérdidas, B_{rot} es igual a cero y la f.e.m. de la fase la induce solo B_{ar} , o lo que es igual a decir B_{ar} y B_r son las mismas.

Cuando la máquina se carga entonces pierde velocidad habiendo ahora una velocidad relativa entre la onda de inducción resultante y el rotor por lo tanto se induce tensión, corriente y una onda de inducción rotórica B_{rot} . Dado que B_r es sustancialmente constante durante el funcionamiento de la máquina, los cambios que se originan necesariamente los tendrá que compensar B_{ar} , para lo cual se descompone en B_L y B_m . B_L compensa neutralizando los efectos de la aparición de B_{rot} colocándose en contrafase con esta y B_m es responsable de la magnetización. Considerar de esta manera a B_{ar} es equivalente a decir que en vez de circular realmente por cada fase una sola corriente I_f , circulan dos: I_φ e I_L , la primera se asocia a la densidad magnética B_m y la segunda a la densidad magnética B_L . De conformidad con la teoría de campos magnéticos giratorios el diagrama fasorial temporal de corriente se sobrepone al diagrama temporal de flujos y se obtiene lo siguiente:

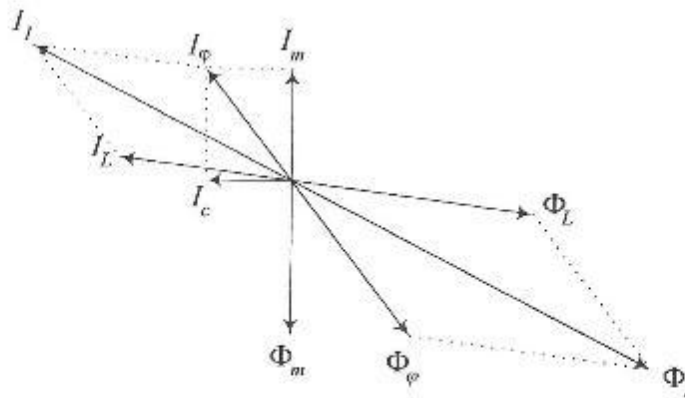


Figura 3.16. Diagrama fasorial de un motor de inducción con carga.

En el diagrama de la figura 3.16 la corriente se dibuja en contrafase por la convención existente, la cual expresa que la corriente que sale por el terminal correspondiente de la máquina cuando se trata de un generador se dibuja en fase con el flujo y cuando es un motor se dibujan en contrafase.

3.3.2. Circuito Equivalente

La onda de flujo resultante Φ_m en el entrehierro, crea una fuerza electromotriz E_1 en las fases del propio estator defasada 90 grados respecto a Φ_m , y la tensión en sus terminales difiere de la fuerza electromotriz en el valor de la caída de tensión en su impedancia estática. Esto es vectorialmente:

$$\vec{V}_1 = \vec{E}_1 + \vec{I}_1 \cdot (r_1 + jx_1) \tag{3.36}$$

Siendo V_1 la tensión en bornes, E_1 la fuerza electromotriz, I_1 la intensidad, r_1 la resistencia efectiva y x_1 la reactancia de dispersión del estator. Al agregar estas variables al diagrama fasorial de la figura 3.16 se obtiene el diagrama fasorial mostrado en la figura 3.17.

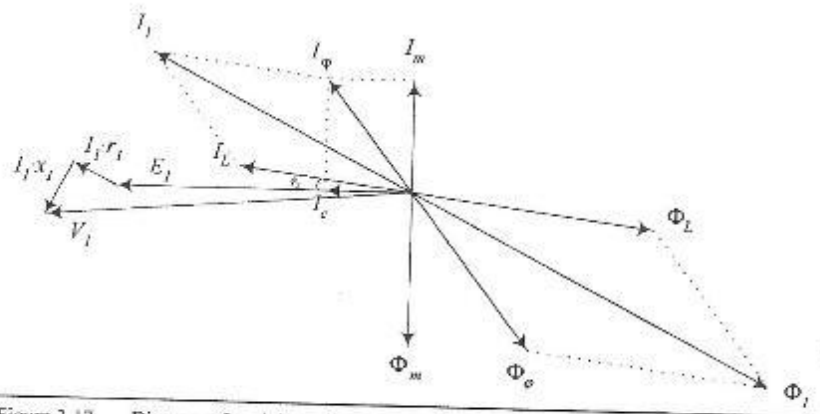


Figura 3.17. Diagrama fasorial por fase del estator de un motor de inducción

El flujo resultante en el entrehierro tiene su origen en la combinación de las f.m.m. de las intensidades en el estator y en el rotor. La corriente en el estator puede dividirse en dos componentes como se muestra en el diagrama fasorial de la figura 3.16, la de carga I_L y la de excitación I_ϕ . La componente de carga I_L produce una

f.m.m. que neutraliza exactamente la f.m.m. de la corriente en el rotor, evitando así que ésta modifique a la resultante. La corriente de excitación I_ϕ es la corriente adicional requerida en el estator para crear el flujo resultante en el entrehierro, corriente que es función de la f.e.m. E_f , de f , del N_{fob} , del K_w y de las características magnéticas del circuito. Partiendo del diagrama fasorial de la figura 3.17 se puede construir un circuito pasivo compuesto de dos rama en paralelo y de impedancias ajustadas de tal forma que con V_f aplicada al circuito, la corriente tenga el mismo valor en magnitud y fase, pero que contenga además el concepto de $I_f = I_c + I_m$. La naturaleza de la rama por donde pasa I_m proviene del defasaje que debe tener E_f e I_m según el diagrama fasorial de la figura 3.17, es decir I_m defasada 90 grados respecto a E_f , dicha rama debe ser una reactancia pura, llámese x_m . La corriente de excitación I_ϕ puede a su vez descomponerse en I_c en fase con E_f que corresponde a las pérdidas en el núcleo y se podría representar como una corriente que atraviesa una resistencia y otra I_m que corresponde a la corriente de magnetización, este fenómeno se representa mediante una derivación shunt formada por una resistencia r_c de las pérdidas en el núcleo y una reactancia magnetizante x_m en paralelo. Hasta ahora el circuito equivalente es el de la figura 3.18.

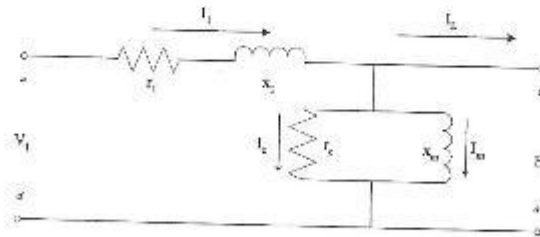


Figura 3.18. Circuito equivalente por fase del estator de un motor de inducción

Imaginemos que en lugar de E_f , entre los terminales a y a' , se coloca un circuito pasivo compuesto de un ramal en paralelo y de impedancia ajustada de tal forma que, con V_f aplicada al circuito la corriente tenga el mismo valor en magnitud y fase, es

decir, que I_1 permanezca inalterada. La naturaleza de la rama es deducible del defasaje entre E_1 e I_L , del diagrama fasorial está claro que el ángulo entre ellos es ϕ_2 , que es el mismo ángulo de la impedancia de dispersión de una barra rotórica cualquiera, bajo las condiciones de funcionamiento para la cual fue trazado el diagrama fasorial. Si la rama tiene por tensión E_1 y está condenada a tomar una corriente I_L a un ángulo ϕ_2 con E_1 a cero grados, entonces dicha rama debe tener una impedancia Z_L igual a:

$$Z_L = \frac{\bar{E}_1}{\bar{I}_L} = \frac{E_1}{I_L} \angle \phi_2 \quad (3.37)$$

Como el ángulo entre E_1 e I_1 es el mismo que entre E_2 e I_2 , es decir, entre la f.e.m. inducida en una fase cualquiera del circuito rotórico y su respectiva corriente, la corriente I_L de la fase del estator ha sido forzada, por definición, a crear un campo giratorio cuya distribución de la caída de potencial magnético a lo largo del entrehierro debe coincidir (aunque opuesta) con las caídas producidas por las corrientes rotóricas. Estas dos ondas espaciales deben ser iguales y opuestas, y esto conlleva a que haya una proporcionalidad directa entre el valor de I_L y el valor de I_2 . Para ampliar detalles sobre la ecuación mostrada a continuación dirijase al Apéndice B.

$$K_2 \cdot \bar{I}_2 = K_L \cdot \bar{I}_L \therefore \bar{I}_L = K_2 \cdot \bar{I}_2 \Rightarrow K_2 = \frac{K_2'}{K_L} \quad (3.38)$$

Con respecto a E_1 y E_2 , se puede decir que estas f.e.m. son inducidas por el mismo flujo Φ_m y se pueden expresar de la siguiente forma:

$$\bar{E}_1 = 4.44 \cdot N_{ph1} \cdot K_1 \cdot \bar{\Phi}_m \cdot f \quad (3.39)$$

$$\vec{E}_2 = 4.44 \cdot N_{p02} \cdot K_2' \cdot \vec{\Phi}_m \cdot f_2 = 4.44 \cdot N_{p02} \cdot K_2' \cdot \vec{\Phi}_m \cdot s \cdot f \quad (3.40)$$

f es la frecuencia de la red y f_2 es la frecuencia de deslizamiento, N_{p0i} es el número de vueltas por fase, los subíndices 1 y 2 indican que se refieren al estator y al rotor respectivamente. Dividiendo la ecuación 3.39 y la ecuación 3.40 (considerándolas, solamente, como magnitudes escalares) tenemos:

$$E_1 = \frac{1}{s} \cdot K_3 \cdot E_2 \therefore K_3 = \frac{K_1}{K_2} \quad (3.41)$$

sustituyendo la ecuación 3.38 y la ecuación 3.41 en la ecuación 3.37, tenemos:

$$Z_L = \frac{\vec{E}_1}{\vec{I}_1} = \frac{\frac{1}{s} \cdot K_3 \cdot \vec{E}_2}{K_2 \cdot \vec{I}_2} = \frac{1}{s} \cdot K_4 \cdot \frac{\vec{E}_2}{\vec{I}_2} = \frac{1}{s} \cdot K_4 \cdot Z_2' \quad (3.42)$$

donde :

$$K_4 = \frac{K_3}{K_2} \quad (3.43)$$

En el Apéndice B se demuestra que la constante K_4 es la relación entre las tensiones o las corrientes del estator y del rotor.

Como la impedancia rotórica es:

$$Z_2' = r_2' + j \cdot s \cdot x_{2s}' \quad (3.44)$$

y sustituyendo la ecuación 3.44 en la 3.42, resulta:

$$Z_t = \frac{1}{s} \cdot K_4 \cdot r_2' + j \cdot K_4 \cdot x_{2ss}' \quad (3.45)$$

siendo r_2' resistencia de una barra rotórica, x_{2ss}' la reactancia, en reposo, de una barra rotórica, estos valores son los que realmente tienen en el rotor.

La reactancia x_2' no es constante dado que la velocidad del campo resultante respecto a una barra no es constante. Como $x_2' = 2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot L_2$, donde L_2 es la inductancia de dispersión de una barra y f_2 es la frecuencia del circuito rotórico que es variable, ya que el número de pares de polo que pasa sobre una barra en una unidad de tiempo es variable. Cuando el rotor está quieto la frecuencia inducida es la frecuencia del estator (es decir 60 Hz), en ese momento la reactancia es llamada reactancia a rotor bloqueado y es: $x_{2ss}' = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_2$. Tomando los valores de la frecuencia de la red y de la frecuencia inducida en el circuito rotórico mostradas en la ecuación 3.46

$$f = \frac{P}{2} \cdot \frac{N_s}{60} \quad \text{y} \quad f_2 = \frac{P}{2} \cdot \frac{N_s - N_{rot}}{60} \quad (3.46)$$

dividiendo estas dos expresiones de frecuencia se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{f}{f_2} = \frac{1}{s} \quad (3.47)$$

La relación que existe entre la reactancia de rotor bloqueado x_{2ss}' y la reactancia en funcionamiento normal x_2' se puede expresar:

$$x_2' = s \cdot x_{2ss}' \quad (3.48)$$

llamando:

$$r_2 = K_4 \cdot r_2' \quad (3.49)$$

$$x_2 = K_4 \cdot x_2' \quad (3.50)$$

finalmente tenemos:

$$Z_L = \frac{r_2}{s} + j \cdot x_2 \quad (3.51)$$

de donde se concluye que el circuito equivalente, por fase, del motor es el siguiente:

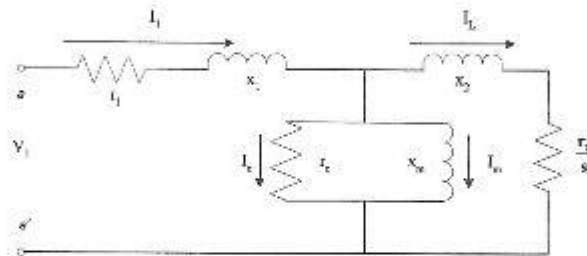


Figura 3.19. Circuito equivalente por fase de un motor de inducción

En la mayoría de los casos se utiliza un circuito equivalente simplificado para facilitar los cálculos matemáticos, en este circuito se elimina la resistencia r_c de la rama shunt como se muestra en la figura 3.20.

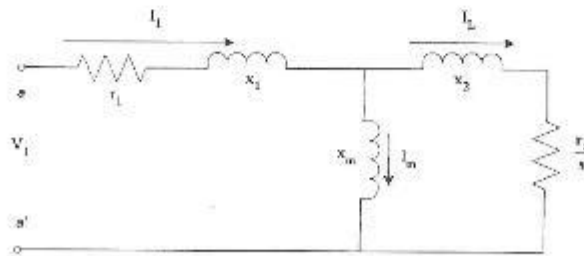


Figura 3.20. Circuito equivalente simplificado por fase de un motor de inducción

Los valores de I_L , r_2 , x_2 , son valores del rotor vistos desde el estator y K_r como ya se dijo es la relación de tensiones inducidas primario/secundario bajo condiciones estacionarias del rotor. La demostración de K_r se muestra en el Apéndice B

3.3.3. Analisis del Circuito Equivalente

La potencia de entrada al circuito, P_{ent} , es:

$$P_{ent} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos(\phi) \quad (3.52)$$

V_L es la tensión de línea y I_L solo en esta ecuación es la tensión de línea, en las demás ecuaciones representa la corriente de carga del circuito equivalente del motor de inducción. Las primeras pérdidas que se encuentran en la máquina son las pérdidas en el bobinado del estator (las pérdidas en el cobre del estator, P_{ent}).

$$P_{ent} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \quad (3.53)$$

Luego se pierde cierta cantidad de potencia por histéresis y por corrientes parásitas en el estator, llamadas pérdidas magnéticas o pérdidas en el núcleo, P_{mag} :

$$P_{mag} = 3 \cdot E_1^2 \cdot g_c = 3 \cdot \frac{E_1^2}{r_c} \quad (3.54)$$

La potencia restante en este punto se traslada al rotor de la máquina, a través del entrehierro entre el estator y el rotor. Esta potencia se llama potencia del entrehierro, P_G :

$$P_G = P_{ent} - P_{ent} - P_{mag} \quad (3.55)$$

El único elemento en el circuito equivalente donde la potencia del entrehierro puede disiparse es en la resistencia r_2/s , por lo tanto:

$$P_G = 3 \cdot I_L^2 \cdot \frac{r_2}{s} \quad (3.56)$$

Parte de la potencia que viene a través del entrehierro se disipa como pérdidas en el cobre del rotor, P_{rot} :

$$P_{rot} = 3 \cdot I_L^2 \cdot r_2 \quad (3.57)$$

y la otra parte de ella se convierte en potencia mecánica interna, P_{int} , para impulsar el eje del rotor:

$$P_{int} = P_G - P_{rot} \quad (3.58)$$

Las pérdidas en el cobre del rotor son iguales a la potencia en el entrehierro multiplicada por el deslizamiento. Entonces cuanto más bajo sea el deslizamiento del motor, en esa misma fracción baja las pérdidas del rotor de la máquina. Si el rotor no está girando la potencia del entrehierro se disipa completamente en el rotor. Esto es:

$$P_{rot} = s \cdot P_G \quad (3.59)$$

Introduciendo la ecuación 3.59 en la ecuación 3.58, la potencia interna queda:

$$P_{int} = (1 - s) \cdot P_G \quad (3.60)$$

introduciendo la ecuación 3.56 en la ecuación 3.60, queda:

$$P_{int} = 3 \cdot I_2^2 \cdot r_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (3.61)$$

Cuando se han de subrayar los aspectos de potencia, se puede dibujar el circuito equivalente de la manera que aparece en la figura 3.21. La potencia mecánica interna por fase del estator es igual a la potencia absorbida por la resistencia $r_2 \cdot (1-s)/s$. En la figura 3.22 se ilustra, en el diagrama de flujo de potencia, la relación entre la entrada de potencia eléctrica y la salida de potencia mecánica.

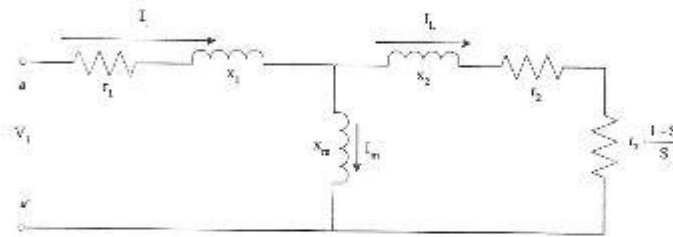


Figura 3.21. Forma alterna circuito equivalente simplificado por fase de un motor de inducción

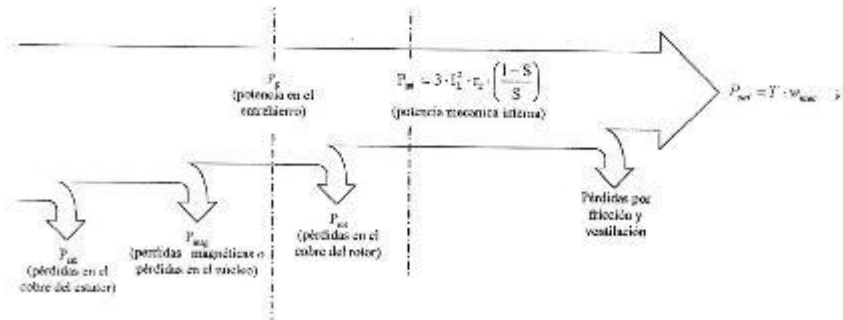


Figura 3.22. Diagrama de flujo de potencia

3.3.4. Expresiones de torque, corriente y potencia

La forma más fácil para calcular las expresiones de torque, corriente y potencia es determinando el circuito de Thevenin de la porción del circuito a la izquierda de los terminales a y b en la figura 3.23.

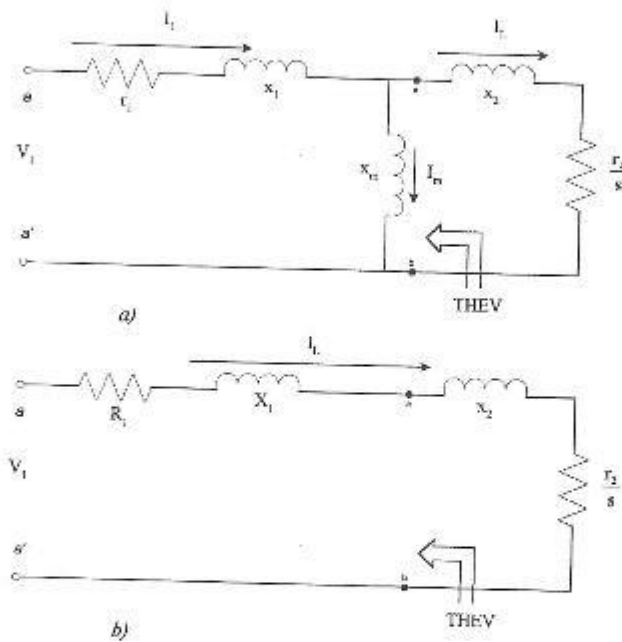


Figura 3.23 a) Circuito equivalente simplificado por fase
 b) Circuito equivalente simplificado de Thevenin

El circuito equivalente simplificado resultante se muestra en la figura 3.23-b, donde la tensión de Thevenin V_{th} es la tensión con el circuito abierto desde los terminales a y b hacia la izquierda y la impedancia de Thevenin es $R_1 + jX_1$, que resulta del paralelo de $r_1 + jx_1$ y la rama central, x_m .

En el circuito de la figura 3.23-b la corriente \vec{I}_L está dada por:

$$\vec{I}_L = \frac{\vec{V}_m}{\left(R_1 + \frac{r_2}{s}\right) + j \cdot (X_1 + x_2)} \quad (62)$$

y su magnitud es:

$$|I_L| = \frac{|V_m|}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{r_2}{s}\right)^2 + (X_1 + x_2)^2}} \quad (63)$$

Sustituyendo la ecuación 3.63 en la ecuación 3.56, la potencia del entorchero queda:

$$P_G = \frac{3 \cdot V_m^2 \cdot \frac{r_2}{s}}{\left(R_1 + \frac{r_2}{s}\right)^2 + (X_1 + x_2)^2} \quad (3.64)$$

El par inducido o par electromagnético se halla de ésta manera:

$$P_{em} = T_{elec} \cdot \omega_2 \quad (3.65)$$

$$\omega_2 = (1 - S) \cdot \omega_s \quad (3.66)$$

ω_2 es la velocidad del rotor y ω_s es la velocidad sincrónica, despejando el par electromagnético T_{elec} o T de la ecuación 3.65 y sustituyendo ω_2 de la ecuación 3.66, queda:

$$T_{\text{mec}} = \frac{P_{\text{me}}}{(1-S) \cdot \omega_s} \quad (3.67)$$

Introduciendo I_L de la ecuación 3.61 en la ecuación 3.67, queda:

$$T = \frac{1}{\omega_s} \cdot 3 \cdot I_2^2 \cdot \frac{r_2}{s} \quad (3.68)$$

Insertando la ecuación 3.61, resulta:

$$T = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{3 \cdot V_m^2 \cdot \frac{r_2}{s}}{\left[\left(R_1 + \frac{r_2}{s} \right)^2 + (X_1 + x_2)^2 \right]} \quad (3.70)$$

Tanto el par máximo y la potencia máxima, T_{max} y P_{max} indicados en la figura 3.24 puede determinarse por consideraciones sobre el circuito. Obsérvese que el par máximo y la potencia máxima no se consiguen ambos a la misma velocidad, además, no hay potencia que se pueda convertir en mecánica, cuando la velocidad del rotor es cero. El par máximo posible se presenta cuando la potencia del entrehierro es máxima. Puesto que la potencia del entrehierro es igual a la potencia disipada en la resistencia r_2/s , el máximo par inducido se presenta cuando la potencia consumida por tal resistencia sea máxima. Esta aseveración se remite al principio de igualdad de impedancias en la teoría de circuito, esta potencia será mayor cuando la impedancia r_2/s iguale en magnitud a la potencia existente entre ella y la impedancia restante del circuito, esto es.

$$\frac{r_2}{s_{\text{max}}} = \sqrt{R_1^2 + (X_1 + x_2)^2} \quad (3.71)$$

Implantando esta ecuación 3.71 en la ecuación 3.70 resulta la expresión de par máximo:

$$T_{max} = \frac{3 \cdot V_{ab}^2}{2 \cdot \omega_s \cdot \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + x_2)^2} \right]} \quad (3.72)$$

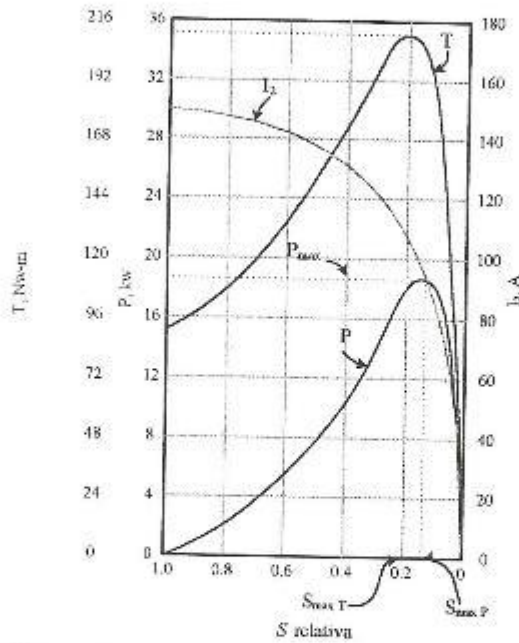


Figura 3.24. Curvas calculadas de par, potencia y corriente para un motor de inducción de 10 Hp

3.4. VARIACIÓN DE LA CARACTERÍSTICA PAR-VELOCIDAD

En el apartado 3.2.3. se demostró la ecuación que determina el par electromagnético y en el apartado 3.2.4. se explicó la gráfica par-velocidad conjuntamente con los parámetros que lo terminan. Ahora se explorará la influencia que tiene la resistencia y la reactancia en la característica par-velocidad.

3.4.1. Influencia de la reactancia

A bajo deslizamiento la frecuencia del rotor es muy pequeña entre 2 y 3 Hz, y las reactancias también son pequeñas en comparación con su resistencia. Para estos valores de deslizamiento la curva de par-velocidad es casi lineal y el par inducido disminuye linealmente al disminuir el deslizamiento.

Para deslizamientos altos, la reactancia es grande comparada con la resistencia del circuito rotórico, el factor de potencia se hace más bajo lo que contribuye a conseguir un par de arranque relativamente bajo y una disminución apreciablemente en el par máximo.

3.4.2. Influencia de la resistencia rotórica

Observe las ecuaciones 3.71 y 3.72, en ellas se muestra que el deslizamiento correspondiente al par máximo es directamente proporcional a la resistencia r_2 del rotor pero que el valor de dicho par máximo es independiente de ella (ver figura 3.24), al crecer r_2 en el circuito del rotor se mantiene el par interno máximo, pero puede regularse la velocidad a la que se produce.

Para conseguir un rendimiento máximo en las condiciones normales de servicio se requiere que la resistencia del rotor sea baja, pero una resistencia baja se traduce en un par de arranque pobre y en una fuerte intensidad de corriente con factor de

potencia bajo. Cuando la resistencia del rotor es alta se consigue un mayor par de arranque y una disminución de la corriente de arranque mejorando el factor de potencia. Estos efectos se pueden conseguir en un rotor de jaula de ardilla mediante el uso de rotores de doble barra o barra profunda y en inducidos de rotor devanado mediante la inserción de resistencias exteriores en el momento del arranque.

3.4.3. Influencia de la tensión aplicada

La relación que existe entre la tensión aplicada y la característica par-velocidad, consiste en que el par interno que desarrolla un motor de inducción es proporcional al cuadrado de la tensión aplicada en sus terminales primarios.

En La figura 3.25 se indica la variación del par de un motor normal de jaula de ardilla, expresado en tanto por ciento, en función de la tensión de alimentación. Hasta valores aproximados de un veinte por ciento del deslizamiento, el par aumenta casi proporcionalmente hasta un punto denominado par máximo del motor. A partir de este punto el par disminuye, a la vez que el deslizamiento aumenta. Las curvas del 80 por ciento y cincuenta por 50 evidencian la relación al cuadrado entre la tensión y el par en un motor de inducción.

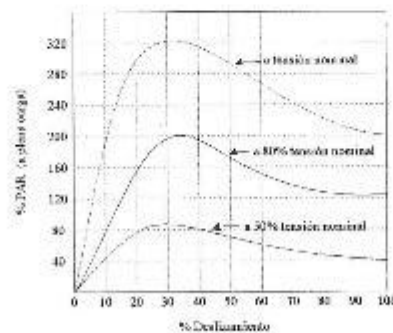


Figura 3.25. Variación el par motor en función del deslizamiento para varias tensiones de servicios, en un motor de jaula de ardilla

3.4.4. Clasificación de los motores de inducción según el estándar NEMA

Existen varios esquemas constructivos en los rotores de los motores de inducción los cuales hacen uso del efecto que tiene el flujo de dispersión en las ranuras, sobre la distribución de la corriente rotórica y la influencia que tiene la resistencia rotórica en el par de arranque, para ello se ha clasificado a los motores de inducción en varias clases según el diseño del rotor de jaula de ardilla.

La reactancia x_2 en el circuito equivalente representa la reactancia de dispersión del rotor, que es la debida a las líneas de flujo del rotor que no se acoplan con los bobinados del estator. Cuanto más retirado del estator esté el conductor o parte de él, mayor será la reactancia de dispersión puesto que un porcentaje más pequeño de flujo del conductor alcanzará al estator. Por tanto, si los conductores de un rotor se colocan cerca de las superficies del rotor tendrá solamente un pequeño flujo de dispersión y la reactancia x_2 será pequeña en el circuito equivalente.

Haciendo uso de un rotor de jaula de ardilla de barra profunda como es el clase D, se podrá explicar el efecto que tiene la resistencia rotórica. Suponiendo que la barra es la composición de varias láminas diremos que esta está compuesta por varias ramas en paralelo constituida por una resistencia y una reactancia, como se muestra en la figura 3.26. La reactancia de la rama superior será menor que la reactancia de la rama inferior por lo ya antes expuesto. En el momento del arranque S es igual a uno lo que hace que la reactancia sea mucho mayor en comparación con la resistencia, entonces la parte superior de la barra será de menor impedancia que la parte inferior obligando a la corriente que circule por la superficie de la barra como se observa en la figura 3.27, esto disminuye el área efectiva resultando una resistencia grande, que es lo que se busca para el momento del arranque. Para deslizamientos bajo la reactancia se hace muy pequeña comparada con la resistencia y no tiene casi influencia, haciendo el área de circulación de la corriente grande, es decir toda la barra, lo que es

lo mismo una resistencia efectiva pequeña, esta condición es la adecuada para la condición de trabajo del motor.

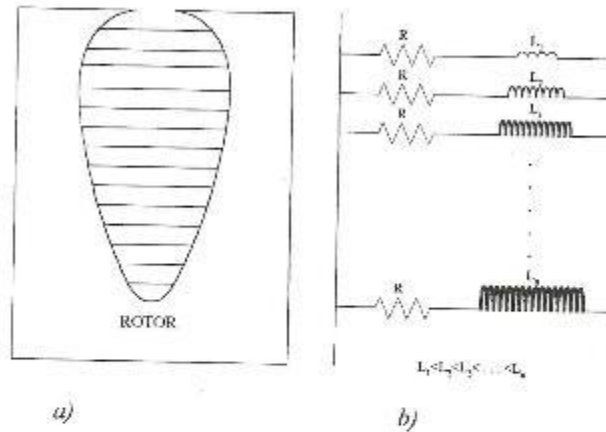


Figura 3.26. Barra profunda de un rotor de jaula de ardilla clase D a) Laminación de la barra b) Circuito representativo de la impedancia de la laminación de la barra

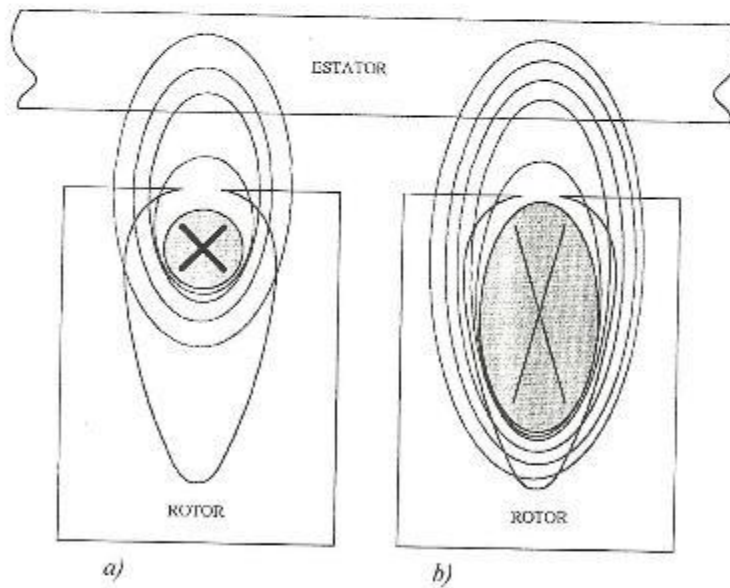


Figura 3.27. Flujo concatenado en una barra profunda a) En el momento del arranque b) En la condición de trabajo

La Asociación Nacional de fabricantes de la Industria Eléctricas (NEMA, en inglés National Electrical Manufacturers Association) en los Estados Unidos, a regularizado la practica dentro de la industria definiendo y estandarizando productos, procesos, construcciones, dimensiones, tolerancias, características de operaciones, rendimiento, calidad, también han especificado los tamaños de armazones, clasificaciones del par y bases para establecer la capacidad nominal entre otros.

Los motores trifásicos de potencias mayores de 1 Hp son clasificados por las normas NEMA, según el diseño de la jaula del rotor de la siguiente manera:

3.4.4.1. Motor de diseño NEMA A

Es un motor de inducción con rotor tipo jaula de ardilla sencilla de baja resistencia. El deslizamiento a plena carga es bajo en el orden del 1% o menos (en algunos casos) y la eficiencia a plena carga es alta. El par máximo es en general más del 200% del par a plena carga y se presenta a un deslizamiento bajo menor que el 20 %. El par de arranque a voltaje pleno varía de un 200% del par a plena carga, en los motores pequeños, hasta aproximadamente 100% en los motores grandes. Son usados para aplicaciones especiales donde se requiere un torque máximo mayor que el normal, para satisfacer los requerimientos de sobrecargas de corta duración. La alta corriente de arranque que es de 500 a 800% de la corriente de plena carga cuando se arranca a voltaje nominal, es la principal desventaja de este diseño. El motor de clase A es el tipo normal básico para tamaños desde menos de 7.5 hp hasta más de unos 200 hp.

3.4.4.2. Motor de diseño NEMA B

Este diseño tiene aproximadamente el mismo par de arranque que el clase A con solo el 75% de la corriente de arranque, se puede entonces usar arranque a voltaje pleno en tamaños mayores que los de clase A. La corriente de arranque se reduce por diseño para una reactancia de dispersión relativamente alta, el par de arranque se mantiene

mediante el empleo de rotor de doble jaula o de barras profunda. La eficiencia, y deslizamiento a plena carga son buenos, aproximadamente los mismos que para el diseño clase A. Sin embargo, el uso de alta reactancia disminuye un poco el factor de potencia y definitivamente baja el par máximo, en general un poco más de 200% del par de plena carga. Así, como un bajo deslizamiento de carga de aproximadamente 4% como máximo. En general es el motor típico dentro del rango de 1 a 125 Hp. Este tipo de motor proporcionará un arranque y una aceleración suave para la mayoría de las cargas y también puede resistir temporalmente picos elevados de carga sin detenerse.

Este diseño es el más común para capacidades de 7.5 a 200 hp. Se usa para impulsadores de velocidad esencialmente constante donde no son muy severos los requisitos de par de arranque, ejemplo: ventiladores, bombas, máquinas-herramientas y otros.

3.4.4.3. Motor de diseño NEMA C

Par de arranque alto, corriente de arranque bajo. Son motores de inducción con rotor de doble jaula de ardilla, de mayor resistencia que el diseño clase B, que desarrollan un alto par de arranque de 250 % a plena carga y por ello son utilizados para cargas de arranque pesado. Estos motores tienen un deslizamiento nominal menor que el 5% a plena carga, la eficiencia es menor que las clases A y B.

3.4.4.4. Motor de diseño NEMA D

Alto par de arranque aproximadamente 275% o más del par nominal, alto deslizamiento nominal, baja corriente de arranque. Generalmente se presentan dos tipos de diseño, uno con deslizamiento nominal de 5 a 8% y otro con deslizamiento nominal de 8 a 13%. Cuando el deslizamiento nominal puede ser mayor del 13%, se les denomina motores de alto deslizamiento o muy alto deslizamiento (ULTRA

HIGH SLIP) y en consecuencia tiene menor eficiencia en condiciones normales. El torque de arranque es generalmente de 2 a 3 veces el par nominal aunque para aplicaciones especiales puede ser más alto. Estos motores son recomendados para cargas cíclicas y para cargas de corta duración con frecuentes arranques y paradas, con mucho trabajo de aceleración y cargas de alto impacto como troqueladoras y cizallas.

3.4.4.5. Motores de diseño NEMA F

Torque de arranque bajo, corriente de arranque baja, bajo deslizamiento nominal. Son motores poco usados, destinándose a cargas con frecuentes arranques. Pueden ser de altos torques y se utiliza en casos en los que es importante limitar la corriente de arranque.

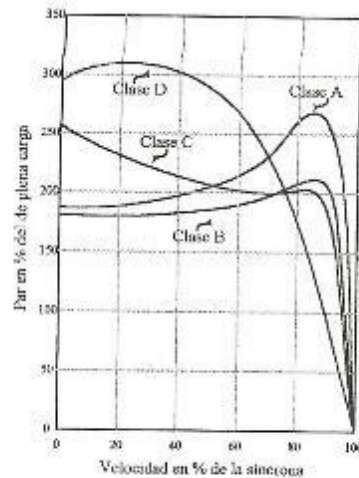


Figura 3.28. Curvas clásicas Par-Velocidad de motores de inducción de uso general a 1500 rpm.

En la figura 2.28 se muestran las diferentes curvas par-velocidad para los diferentes diseños de NEMA. En la figura 3.29 se muestra los diseños de los rotores de las diferentes clase de motores establecidas por NEMA con lo cual se consigue los diferentes parámetros que caracteriza a cada diseño.

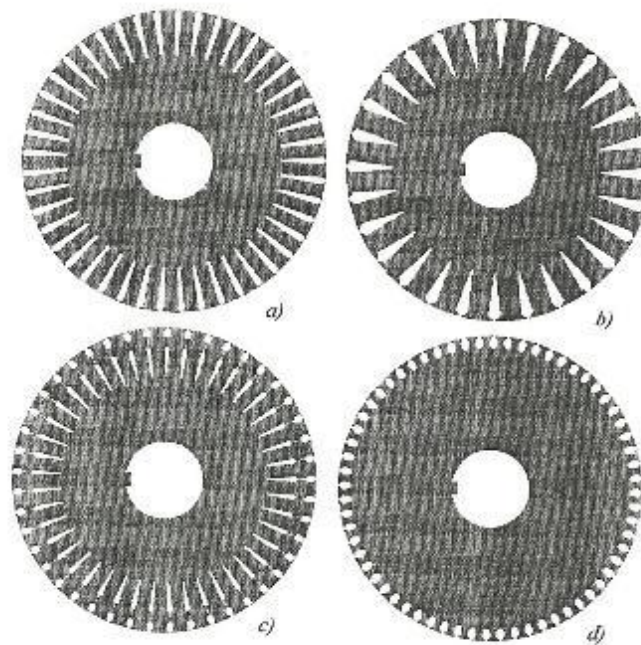


Figura 3.29. Laminaciones de rotores de jaula de ardilla de un motor de induccion
a) NEMA clase A. *b)* NEMA clase B. *c)* NEMA clase C. *d)* NEMA clase D.

3.5 ARRANQUE DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN

El siguiente apartado se refiere a los diferentes métodos que se utilizan en el arranque en los motores de inducción para minimizar la incidencia de las altas corrientes que se producen sobre el sistema de distribución.

3.5.1. Arranque a plena tensión, problemas asociados

Algunos motores de inducción ocasionan problemas al conectarse directamente a la red por su excesiva corriente durante el arranque, sin embargo, en muchos casos el sistema de potencia tiene la fortaleza para permitir estos arranques directos hasta para motores de cientos de Kva, como es el caso de las redes de distribución de las zonas industriales. Es necesario conocer el sistema para observar la relación potencia de generación/potencia del motor, y de esta forma conocer si el motor entra en los rangos establecidos se puede arrancar en forma directa en una determinada zona, de lo contrario se debe utilizar alguna forma de arranque para controlar los problemas de la caída de tensión en el sistema de potencia al cual están conectados.

3.5.2. Arranque a tensión reducida

Un arranque a tensión reducida supone una disminución de la tensión en los terminales del motor y con ello, a su vez, lograr una disminución en la corriente y en la caída de tensión de la red. Es importante tener en cuenta que mientras la corriente de arranque se reduce en proporción directa a la disminución de la tensión de los bornes, el par de arranque disminuye en proporción al cuadrado de la tensión que se aplica (ver ecuación 3.71), por tanto, si el motor se arrancara con carga en el eje, solamente se podrá reducir una determinada cantidad de corriente. Esta disminución en la tensión se podrá conseguir mediante los procedimientos siguientes:

3.5.2.1. Arranque a tensión reducida por resistencias

El motor se conecta a la línea a través de una resistencia en serie, obteniendo un voltaje reducido en virtud de la caída de tensión a través de la resistencia. Conforme el motor acelera, disminuye la corriente tomada de la línea y en consecuencia disminuye la caída de tensión a través de la resistencia aumentando la tensión en los terminales del motor. Por consiguiente el par entregado por el motor aumenta en forma constante, conforme se incrementa la velocidad de este. Después de un intervalo definido, se cortocircuita la resistencia, esto último se puede lograr en varios pasos, obsérvese la figura 3.30.

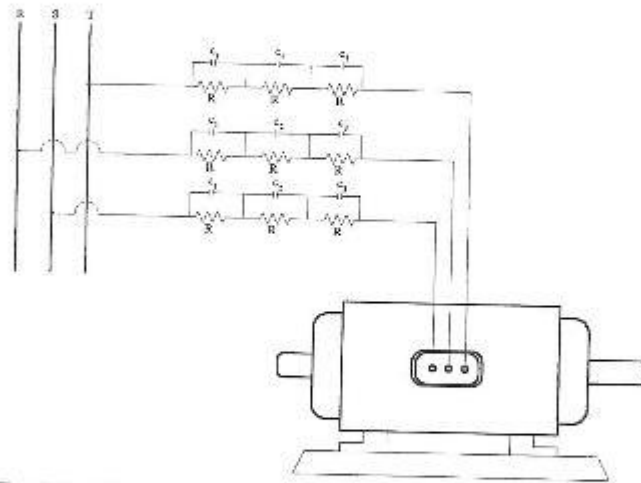


Figura 3.30. Arranque de un motor de inducción mediante resistencias

3.5.2.2. Arranque a tensión reducida por reactancias

Este procedimiento es similar al explicado en el punto anterior. En los motores grandes a veces se usan arrancadores con tensión reducida del tipo de reactor, con mayor frecuencia en los motores de alto voltaje (2.300 V o más). Una de sus características es que reduce apreciablemente el par de arranque, baja un poco el

factor de potencia y es más costoso que el de resistencia, sin embargo las pérdidas que genera son inferiores por su naturaleza reactiva, lo que justifica su utilización, obsérvese la figura 3.31.

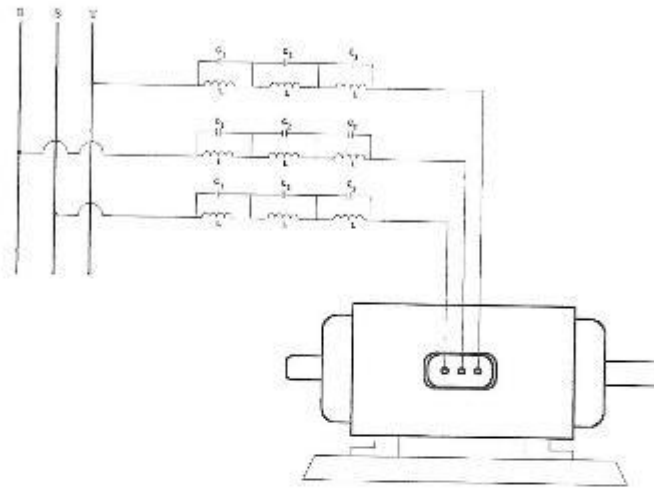


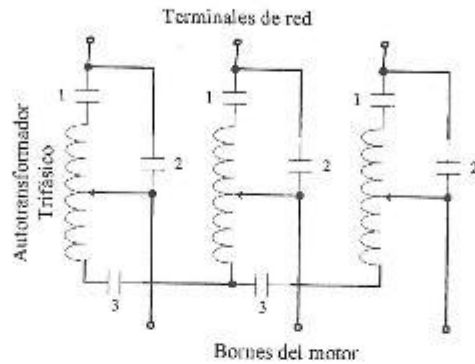
Figura 3.31. Arranque de un motor de inducción mediante reactancias

3.5.2.3. Arranque a tensión reducida por autotransformadores

En los autotransformadores de arranque llamados comúnmente arrancadores, la corriente del motor en el secundaria varía en forma directa con la tensión aplicada en sus terminales. La corriente de línea varía proporcionalmente al cuadrado de la tensión aplicada en el primario del autotransformador. Por lo tanto una toma del 50 por ciento de la tensión dará lugar a un par de arranque del 25 por ciento. Las características de este tipo de arrancador son: bajas corrientes de líneas, potencia baja en la línea y un bajo factor de potencia.

Los autotransformadores de arranque se encuentra en los tipos: manual y automático, maniobrados mediante unos relés que conectan la tensión plena cuando el

motor a adquirido velocidad. El procedimiento a seguir es el siguiente: durante el arranque, los contactos 1 y 3 se cierran, alimentando el motor con una menor tensión. Tan pronto el motor esta próximo a levantar velocidad, tales contactos se abren y los contactos 2 se cierran, estos contactos conectan la tensión total de la línea con el motor. (ver figura 3.32)



Secuencia de operaciones:

- (a) Cerrar 1 y 3
- (b) Abrir 1 y 3
- (c) Cerrar 2

Figura 3.32. Conexión de un autotransformador

3.5.2.4. Arranque a tensión reducida en estrella-delta (Y-Δ)

Generalmente los motores de dos tensiones que cumplen con la relación $1:\sqrt{3}$, por ejemplo 220-380 V, están dispuestos para funcionar con la tensión más alta en estrella y la baja en triángulo, la razón de esto es: la impedancia de una fase no depende del tipo de conexión efectuada, pero la corriente por fase es proporcional a la tensión, empleando la conexión en triángulo la tensión y la corriente de fase son $\sqrt{3}$ veces mayores que utilizando la conexión estrella. En triángulo se componen las corrientes

de las fases, resultando una corriente absorbida ($\sqrt{3}I$) mayor que una cualquiera de las componentes, es decir, que la corriente de la línea arrancando en estrella es la tercera parte de la producida haciéndolo en triángulo. En estos casos sólo podrá aplicarse el arranque estrella-triángulo si dichos motores funcionan estando alimentados por una red de tensión igual a la menor de las indicadas.

Estos son un tipo de arrancador a tensión reducida, que se usa con motores de seis terminales en los que se aplica el 57 por ciento de la tensión a los devanados en el primer paso y toda la tensión en el segundo paso. La corriente de arranque y el par de arranque son el 33 por ciento de los valores a plena tensión.

El arrancador de la figura 3.33 actúa de la siguiente manera: se energiza el contactor S y con ello se cierran todos los contactos, con lo que se conectan los devanados del motor en Y. Se cierra un contactor auxiliar normalmente abierto que está en el contactor S, con lo que se energiza el contactor 1M. Sus contactos se cierran y se energizan los devanados del motor en Y. Después de un intervalo predeterminado, se desenergiza el contactor, se abren los contactos en el contactor

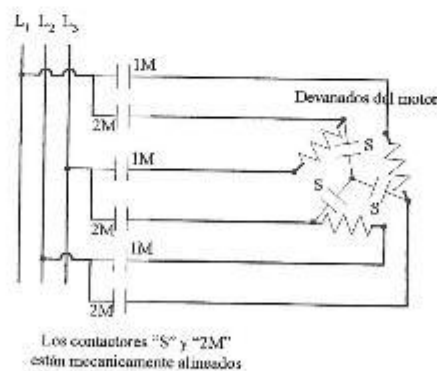


Figura 3.33. Arrancador Delta-Estrella de transición abierta.

TR, con lo que se desenergiza el contactor S, se abren sus contactos y en

consecuencia, se abre el devanado conectado en "Y". El motor queda ahora temporalmente desenergizado, de esta forma no desarrolla par y experimenta una reducción de velocidad. Se cierra un contacto auxiliar normalmente abierto que esta en el contactor S y se energiza el contactor 2M, además del 1M. El motor se vuelve a energizar en A.

En la figura 3.34-a, se indica una gráfica de la variación del par de arranque empleando la conexión estrella-triángulo, correspondiente a los motores de media potencia. Y la figura 3.34-b, representa las curvas de corriente relativa de arranque. Nótese que como se menciono anteriormente, el par y la corriente sufren una variación del 66 por ciento.

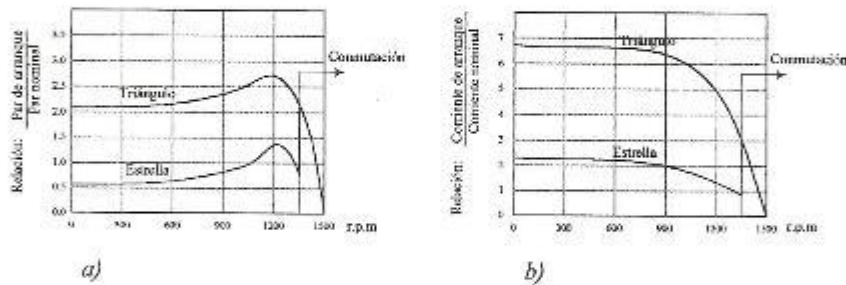


Figura 3.34. Curvas características en función de la velocidad: a) Par de arranque/par nominal. b) Corriente de arranque/corriente nominal

3.5.2.5. Arranque del motor de por devanado parcial

El devanado del motor debe estar en dos partes y tener acceso a ellos mediante 6 terminales para obtener arreglos en "Y" para la tensión superior o "YY" para la tensión inferior del motor. Por lo tanto, el método es aplicable a aquellos motores que están diseñados para usarse en cualquiera de dos tensiones, con los devanados en paralelo en la tensión más baja y en serie en la mas alta, obsérvese la figura 3.35.

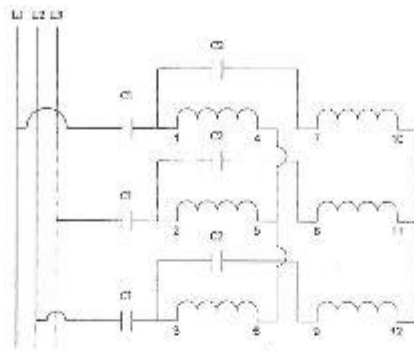


Figura 3.35 Arrancador por devanado parcial

Por ejemplo, se podría usar un motor de 230/460 V a 230 V, con un controlador para devanado parcial. Entonces se dispondría el controlador para conectar una sección del devanado a las líneas de alimentación, tan pronto como se oprima el botón de arranque. A continuación, después de un retardo, proporcionado por un relevador de tiempo, un segundo contactor conectaría la otra sección del devanado del motor a las líneas de alimentación, en paralelo con la primera sección. De esta manera, la corriente de arranque se reduce aproximadamente a la mitad de la que se requeriría si se conectaran al mismo tiempo las dos secciones del devanado.

3.5.3. Arranque del motor de rotor devanado

También llamado arranque por reostato. Los motores de rotor devanado se arrancan con una resistencia externa. A medida que el motor va adquiriendo velocidad puede irse reduciendo la resistencia externa de tal forma que durante la aceleración actúe siempre el par máximo. Una vez ya en marcha normal, el devanado del rotor puede cerrarse en cortocircuito sobre las mismas escobillas. La mayor parte de las pérdidas en el circuito del rotor, durante la aceleración, se disipa en la resistencia externa, en lugar de hacerlo dentro del motor. Con este procedimiento se

permite que el motor entregue altos pares de arranque y de aceleración y, sin embargo, extraiga una corriente de línea relativamente baja.

Al estar estos tipos de reostatos constituidos por resistencias conectadas a intervalos con los sucesivos contactos, se producen, a pesar de todo, oscilaciones de los valores de par y corriente. Por ejemplo en la figura 3.36 aparece un motor cuyo reostato de arranque tiene siete posiciones, o sea, seis resistencias intermedias, en la figura 37-a se indica la variación de la corriente versus la velocidad según se realizan los cambios de las resistencias indicadas en la figura 3.37-b, y en la figura 3.38 se indica la variación del par. Naturalmente se considera siempre sumando a los diversos valores $R_1 + \dots + R_6$ la resistencia de los devanados del rotor.

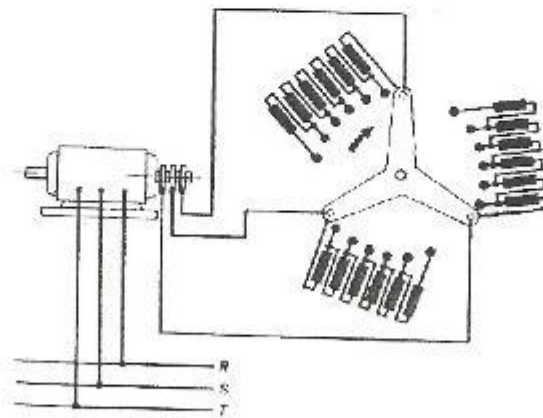


Figura 3.36 Arrancador por resistencia en el circuito del rotor

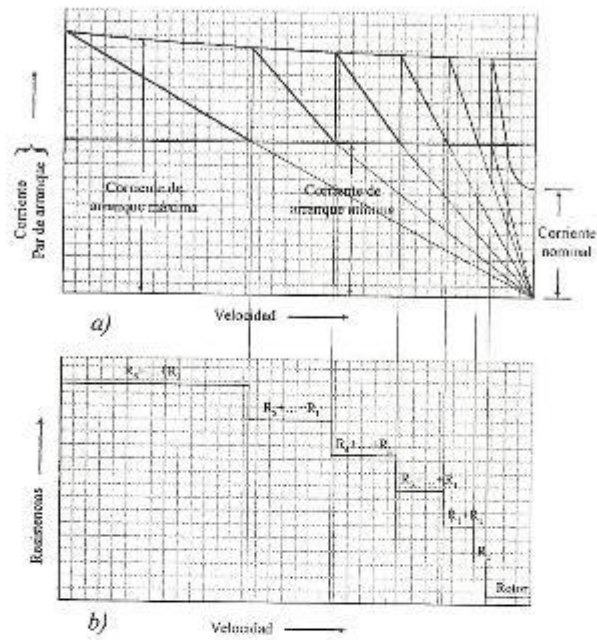


Figura 3.37. Curvas características de los reostatos de arranque
 a. Variación del par y la corriente en función de la velocidad
 b. Variación de las resistencias en función de la velocidad

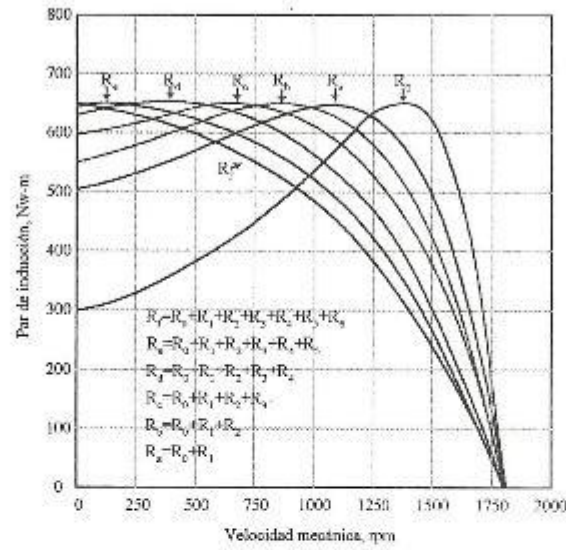


Figura 3.38. Efecto de la variación de la resistencia del rotor en la característica par-velocidad de un motor de inducción de rotor devanado

3.6. CONTROL DE VELOCIDAD DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

3.6.1. Cambio del número de polos

En la figura 3.39-a se muestra un estator con el dibujo de una de las fases, el devanado es imbricado de dos capas, si se examina el comportamiento de las corrientes en su dirección en cada grupo se observará que crea un campo de dos polos, por lo tanto, se concluirá que las bobinas son acortadas de paso igual a la mitad del paso diametral. La figura 39-b muestra el mismo estator con el mismo devanado, si se examina de igual forma se observa que el arreglo es de cuatro polos y se concluye que las bobinas son de pasos diametral. Esto se origina al cambiar la conexión de devanado imbricado normal de polos alternados en la figura 3.39-a a un

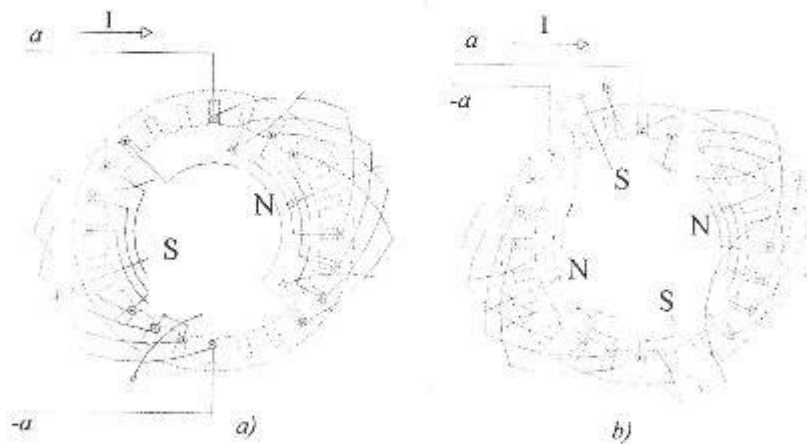


Figura 3.39 Cambio de velocidad cambiando el número de polos
a) Motor de dos polos. b) Motor de cuatro polos

devanado de polos consecuentes en la figura 39-b. Nótese que de esta manera, a pesar de estar usando las mismas bobinas, se ha construido un nuevo estator de cuatro polos que funciona perfectamente. Así pues, el mismo estator nos da con simples cambios en las conexiones dos campos de diferentes velocidades, el estator de la figura 3.38-a

generará un campo de dos polos que gira a 3600 r.p.m. ($f=60$ Hz) y el de la figura 39-b generará uno de cuatro polo girando a 1800 r.p.m., si ahora, imaginamos meter un rotor de jaula de ardilla dentro de la carcasa, se comprenderá que se ha construido un motor de dos velocidades.

Para verificar el número de polos en uno y en otro caso basta asumir un instante cualquiera de funcionamiento en que por ejemplo, la corriente en la fase $a-a$ entre por a y salga por $-a$, el sentido instantáneo de la corriente en los diferentes conductores hace deducir cuantos polos crea esta fase al ser recorrida por la corriente. Como se sabrá, el número de polos del campo estacionario (en el espacio) de una sola fase es igual al número de polos del campo rotatorio resultantes de las tres fases.

Un rotor de jaula de ardilla dentro de un campo rotórico gira independientemente del número de polos del campo. La relación que existe entre las velocidades que se originan mediante este método de cambio de polos es 2:1. Para motores de rotor devanado este procedimiento no es aplicable debido a que los polos del rotor son predeterminados dependiendo de los polos del estator, los cuales deben ser numéricamente iguales.

Si el motor debe desarrollar el mismo par en una y otra velocidad, se presenta dos casos: a) que en uno y otro caso de velocidad este alimentado por tensiones de valores tales que en ambos casos de velocidades den el mismo valor de densidades magnéticas pico, b) o desarrollar diferentes densidades magnéticas, pero al desarrollar uno de los pares con menor densidad de flujo en el entrehierro implica que se debe tener mayor magnitud de corriente rotórica, y por tanto, bajo rendimiento al disiparse mayor cantidad de calor. Si en la alta velocidad el motor debe mover una carga que impone un torque mayor que en baja velocidad (caso ventilador) entonces es deseable que en alta velocidad el motor tenga en el entrehierro una densidad magnética mayor para que pueda desarrollar su par sin necesidad de corrientes rotóricas de valor

excesivo, que significan bajo rendimiento. El torque desarrollado quien lo determina es la carga y no el motor.

Según la aplicación que se le dé al motor de dos velocidades puede resultar necesario variar la densidad magnética en el entrehierro, bien sea, mantenerla igual en las dos velocidades o tener la mayor en alta revolución. Para lograr esto se debe ver de inmediato que puede ser necesario alimentar el motor con tensiones de diferentes valores pues es la tensión aplicada la que fundamentalmente determina el valor de la densidad magnética. *Recuérdese, ante todo, que los dos grupos de bobinas de la figura 3.39, se puede conectar en serie o paralelo y que luego las tres fases pueden conectarse en "Δ", "Y", "ΔΔ" ó "YY", y así obtener varias tensiones.*

Se nota, entonces, que a este punto es necesario recurrir a alguna fórmula que nos relacione la tensión y la densidad magnética para poder determinar el valor de tensión para la deseada condición de densidad magnética en el entrehierro.

Partiendo que:

$$E_{ga} = 4.44 \cdot \Phi_a \cdot f \cdot N_{pa} \cdot N_k \cdot K_{na} \quad (3.73)$$

$$E_{gb} = 4.44 \cdot \Phi_b \cdot f \cdot N_{pb} \cdot N_k \cdot K_{nb} \quad (3.74)$$

donde:

E_{ga} : f.e.m. de la máquina de alta revolución (dos polos).

E_{gb} : f.e.m. de la máquina de baja revolución (cuatro polos).

K_{na} : Factor de devanado de la máquina de alta revolución.

K_{nb} : Factor de devanado de la máquina de baja revolución.

Φ_a : flujo por polo de la máquina de alta revolución.

Φ_b : flujo por polo de la máquina de baja revolución.

D : diámetro del estator.

Haciendo las sustituciones de:

$$\Phi_a = \frac{2}{\pi} \cdot B_{maxa} \cdot D \quad (3.75)$$

$$\Phi_b = \frac{2}{\pi} \cdot B_{maxb} \cdot \frac{D}{2} \quad (3.76)$$

en las ecuaciones de tensiones y dividiendo una expresión entre la otra, se concluye que:

$$\frac{E_{gb}}{E_{ga}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{K_{wb}}{K_{wa}} \cdot \frac{B_{maxb}}{B_{maxa}} \quad (3.77)$$

Para el caso de la figura 3.39 donde la máquina es de 24 ranuras para 2 y 4 polos, $K_{wb}=0.837$ y $K_{wa}=0.672$ la ecuación queda:

$$\frac{E_{gb}}{E_{ga}} = 0.62 \cdot \frac{B_{maxb}}{B_{maxa}} \quad (3.78)$$

De la expresión se deduce que si ponemos a ambas máquinas a funcionar como motor y queremos que las densidades netas pico en el entrehierro sean iguales, entonces sería necesario aplicar al motor de baja revolución una tensión 0.62 de la que se aplicaría en alta revolución (esto suponiendo la tensión aplicada y la f.e.m. neta iguales).

Si se conecta la máquina en "Δ", para baja velocidad, y luego en "YY" para alta velocidad y, en ambos casos, se aplica la misma tensión resultaría la ecuación 3.79. Esta forma de conexión es usada cuando la máquina mueve cargas de par constante,

esto sucede cuando los niveles de flujo se mantienen constante, en la siguiente figura 3.40 se ilustran las mencionadas conexiones.

$$\frac{B_{max_b}}{B_{max_a}} = 1.4 \quad (3.79)$$

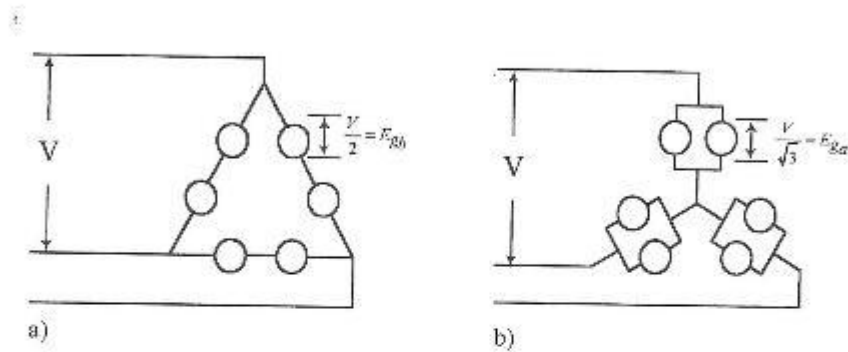


Figura 3.40. Esquema de conexión de un motor de dos velocidades a) conexión Δ b) conexión YY

También para esta conexión el flujo se mantiene constante resultando para una conexión de potencia constante:

$$\frac{B_{max_b}}{B_{max_a}} = 1.86 \quad (3.80)$$

y para la conexión de torque variable, es porque el flujo es variable:

$$\frac{B_{max_b}}{B_{max_a}} = 0.8 \quad (3.81)$$

3.6.2. Control de la frecuencia de la línea

La velocidad de sincronismo cambia en proporción a los cambios registrado por la frecuencia eléctrica aplicada a un motor de inducción. Usando el control de frecuencia variable es posible ajustar la velocidad del motor por encima o por debajo de la velocidad sincrónica del motor en condiciones normales, a esta velocidad también se le conoce como velocidad base.

Cuando se opera a velocidades por debajo de la velocidad base, es necesario reducir la tensión aplicada al estator en los bornes para una operación apropiada, esta tensión se debe disminuir linealmente reduciendo la frecuencia del estator. De no ser así, el acero del núcleo del motor de inducción se satura y se producirán corrientes de magnetización excesivas que circulan por la máquina, como se puede ver en la figura 3.41, en la zona no saturada de la curva de magnetización del motor el aumento de la corriente será en proporción al aumento que tenga el flujo, pero en la zona saturada de la curva un aumento pequeño de flujo traerá como consecuencia un aumento desmesurado de la corriente de magnetización que llegaría a valores mayores de la corriente nominal del estator, produciendo daño por recalentamiento al devanado estatórico. Para entender los cambios que se necesitan realizar en este caso recuérdese que un motor de inducción es análogo a un transformador giratorio, haciendo uso de la fórmula de tensión utilizada anteriormente se puede conseguir una relación de flujo y frecuencia:

$$E_{rms} = 4.44 \cdot f \cdot K_w \cdot N_{ph} \cdot \Phi_r \quad (3.82)$$

$$\Phi_r = \frac{E_{rms}}{4.44 \cdot f \cdot K_w \cdot N_{ph}} \quad (3.83)$$

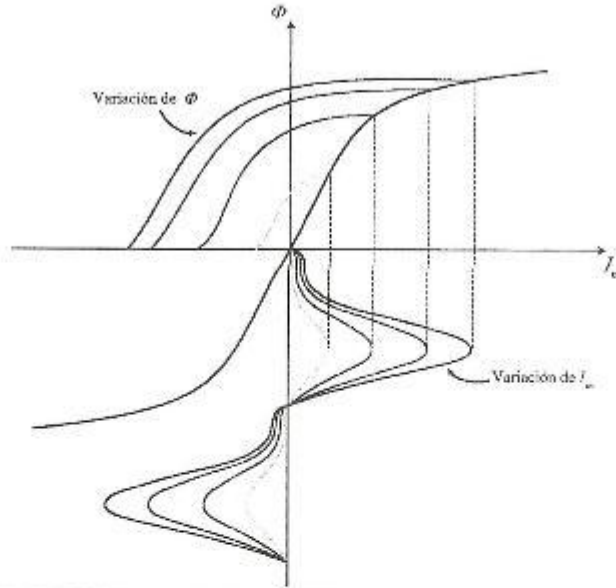


Figura 3.41. Flujo resultante de un motor de inducción

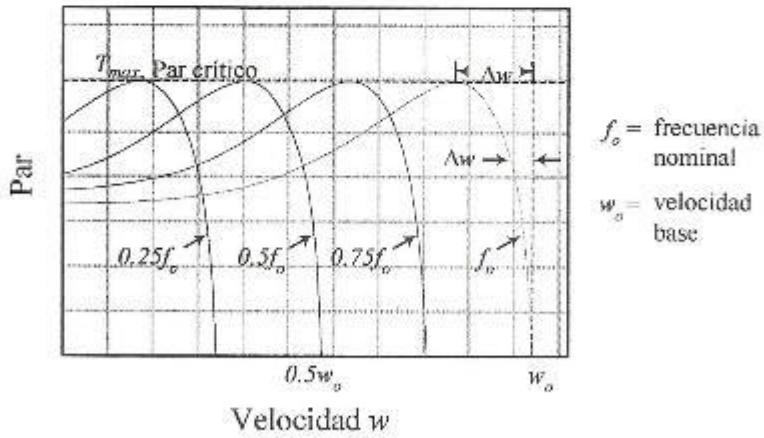


Figura 3.42. Curvas teóricas par-velocidad de un motor de inducción regulado por variación de frecuencia por debajo de la velocidad base

A este procedimiento se le conoce como control V/f constante, consiguiéndose así los mismos niveles de flujo y con ello los mismos niveles de pares para cualquier valor de frecuencia por debajo de la velocidad base, esto también conlleva a conseguir siempre la misma densidad de flujo (ver figura 3.42).

Por el contrario cuando la frecuencia eléctrica que utiliza el motor sobrepasa su frecuencia nominal, esto es cuando se tiene que operar por encima de la velocidad base, la tensión del estator mantiene constante su valor nominal, por no ser posible un aumento de tensión más allá de su valor nominal por parte del sistema. Cuanto más alto es la frecuencia eléctrica sobre la velocidad base más grande se volverá el denominador de la ecuación 3.83, puesto que el término del numerador se mantiene constante por encima de la frecuencia nominal, por consecuencia tanto el flujo resultante como el par (en toda la curva) se reducen en proporción inversa en la máquina. Como se recordará, de la ecuación 3.84 que puede decir que para los mismos niveles de flujo se obtiene los mismos niveles de par ya que son proporcionales. La figura 3.43 se muestra el caso del aumento de la frecuencia por encima de la velocidad base, si observamos la ecuación 3.70 y colocamos el par en función de la frecuencia podemos deducir que la curva conserva su comportamiento al variar la frecuencia en toda su trayectoria.

$$T = K \cdot \Phi_m \cdot I_L \cdot \cos(\phi_2) \quad (3.84)$$

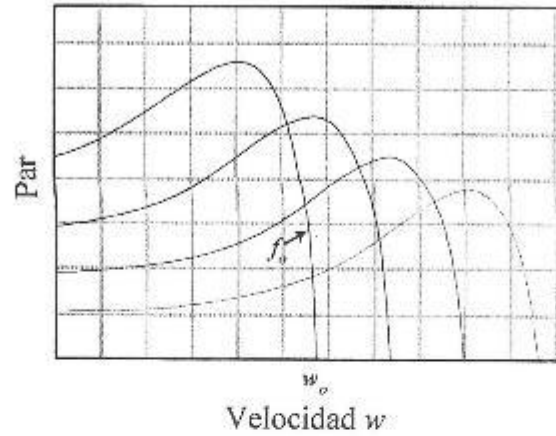


Figura 3.43. Familia de las curvas par-velocidad para velocidades por encima de la velocidad base, suponiendo que el voltaje de línea se mantiene constante.

3.6.3. Control de la tensión en línea

El par interno desarrollado por un motor de inducción es proporcional al cuadrado de la tensión aplicada a sus terminales primarios, como puede verse en las dos curvas par-velocidad de la figura 3.44, si la carga tiene la característica par/velocidad señalada con líneas de trazos y se quiere reducir la velocidad de n_1 a n_2 , al bajarle la tensión a la máquina a la mitad se conseguirá otra característica par-velocidad y la máquina se estabilizará en la velocidad n_2 y su par será un cuarto del inicial. Este procedimiento de regulación de velocidad se emplea en pequeños motores de jaula de ardilla accionando ventiladores.

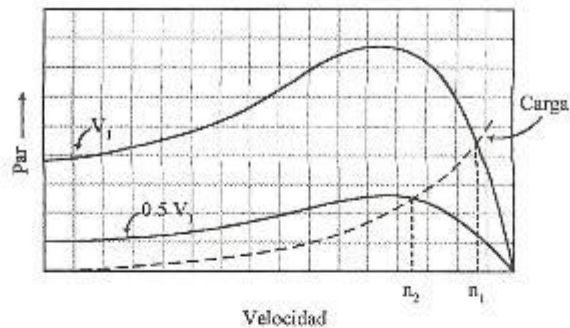


Figura 3.44. Regulación de la velocidad mediante la tensión de alimentación

3.6.4. Control de deslizamiento: resistencia rotórica

En los motores de inducción es posible cambiar la forma de la curva par-velocidad al variar la resistencia en el circuito del rotor, como se puede deducir de la ecuación 3.70 esta variación es proporcional. Si la curva par-velocidad de la carga es como la que se ve en la figura 3.45, entonces cambiando la resistencia del rotor se cambia la velocidad de funcionamiento del motor, sin embargo, se reduce seriamente su eficiencia. Entre unas de sus desventajas de este procedimiento es el poco rendimiento el motor a velocidades bajas y la mala regulación con cambios de la carga, esta desventaja también la presenta el control de la tensión en línea.

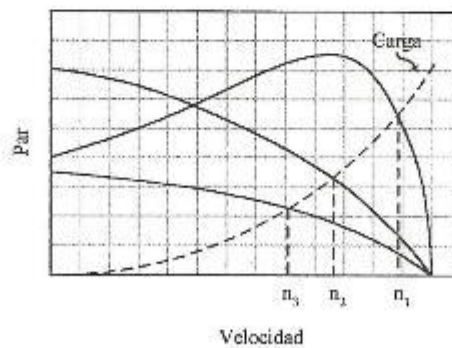


Figura 3.45. Regulación de la velocidad mediante la resistencia rotórica

CAPÍTULO IV

MOTORES MONOFÁSICOS DE C.A.

4.1. MOTOR MONOFÁSICO DE INDUCCIÓN

4.1.1. Construcción

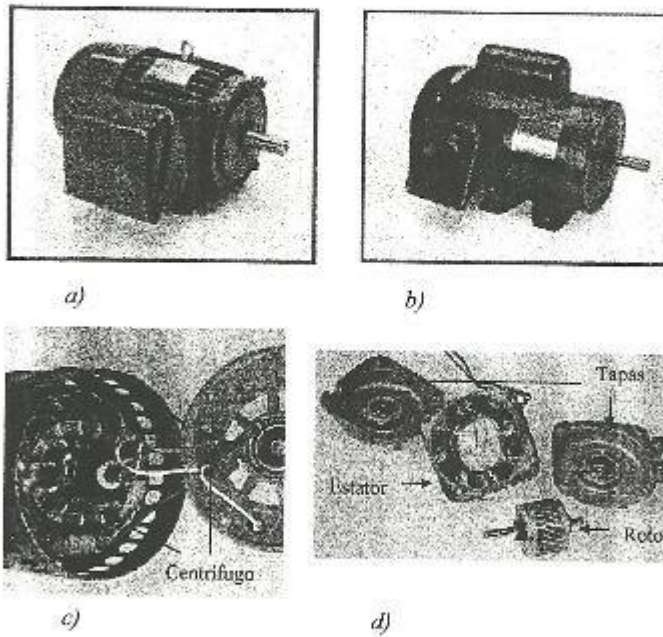


Figura 4.1 Motor monofásico de inducción a) Motor de fase partida b) Motor con condensador c) Motor con la parte giratoria del interruptor centrifugo d) Despiece de un motor monofásica

El motor monofásico de inducción tiene el aspecto exterior como se muestra en la figura 4.1. Consta de un estator bobinado que lleva dos arrollamientos, el principal o de régimen y el auxiliar o de arranque, también posee un rotor de jaula de ardilla análogo al de los motores trifásicos de inducción y un interruptor centrífugo o relé temporizado accionado electrónicamente cuya finalidad es desconectar el devanado auxiliar según sea el caso, algunos tienen la peculiaridad de tener un condensador que se conecta en serie con este devanado, que en unos casos funcionan permanente y en otros se desconecta después del arranque.

4.1.2. Funcionamiento

Los mecanismos para lograr el arranque del motor monofásico se fundamentan en la creación de un campo rotatorio, originado por la interacción del campo principal con el campo producido por un devanado auxiliar (o de arranque), cuyo flujo está desfásado en el espacio y en el tiempo respecto del principal. El devanado de arranque se dispone en cuadratura respecto del arrollamiento principal (o de trabajo), y se desconecta automáticamente luego del arranque, cuando la velocidad del motor alcanza un valor próximo a 0.75 - 0.80 de la velocidad de sincronismo; la desconexión se realiza con dispositivos que son accionados por la fuerza centrífuga o mediante de un relé temporizado por accionamiento electromagnético y electrónico.

En la figura 4.2 representa gráficamente el fenómeno de arranque. Si se aplica una corriente alterna en los terminales, aparecerá el correspondiente flujo alterno necesario para engendrar la f.e.m. de la bobina del estator, en consecuencia, en el rotor aparecerán corrientes alternas cuyo flujo debe oponerse al flujo inductor, si el flujo es positivo y creciente, entonces las corrientes rotóricas tendrían la dirección instantánea mostrada en la figura 4.2-a (lo cual crea un efecto desmagnetizante sobre el campo inductor), pero cuando el flujo decrece sin cambiar el sentido (figura 4.2-b) las corrientes rotóricas se opondrán a este decrecimiento, por lo que la dirección instantánea de las corrientes sería invertida, esto quiere decir que las corrientes

rotóricas (estas corrientes son corrientes parásitas) crean en todo momento un campo alineado con el campo inductor. El eje del campo del estator permanece fijo en la dirección del eje de las bobinas, como se alimentan las bobinas con corriente alterna al variar la intensidad de la corriente del estator en magnitud y sentido el flujo únicamente oscila en un sentido o en otro, por tal razón se habla de un campo alterno o pulsante, es decir, la intensidad del campo es alternativo en polaridad y variable senoidalmente en el tiempo. En el rotor se inducen corrientes en un sentido tal que la f.m.m. que produce se opone a la del estator, el eje de la onda de f.m.m. del rotor coincide con el eje de la del estator, y por consiguiente el ángulo de par es nulo así como el par de arranque.

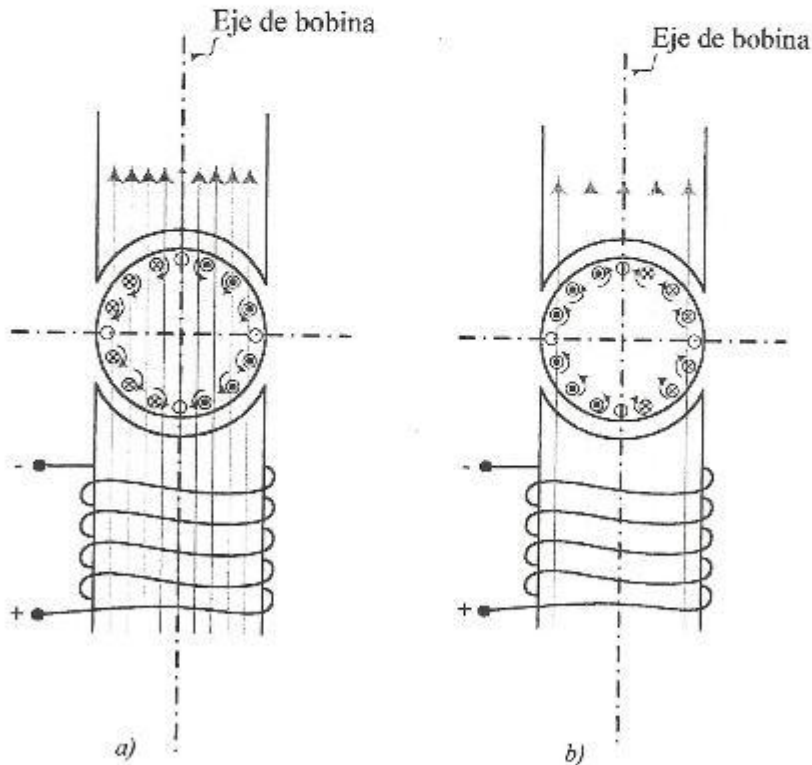


Figura 4.2. Representación del efecto de arranque en el motor monofásico de inducción

Como las corrientes del rotor están en fase con las f.m.m. de la figura 4.3-a se deduce que todas las corrientes del lado izquierdo del eje de bobina entran en el plano del dibujo y salen de él las del lado derecho del eje. En los conductores del cuadrante izquierdo superior del rotor situados dentro del campo magnético actúa una fuerza hacia la izquierda mientras que en los del cuadrante de la derecha actúa en la parte superior una fuerza hacia la derecha, ambas fuerzas se compensan y lo mismo podemos afirmar de los conductores situados en los cuadrantes inferiores, a la izquierda y derecha del rotor.

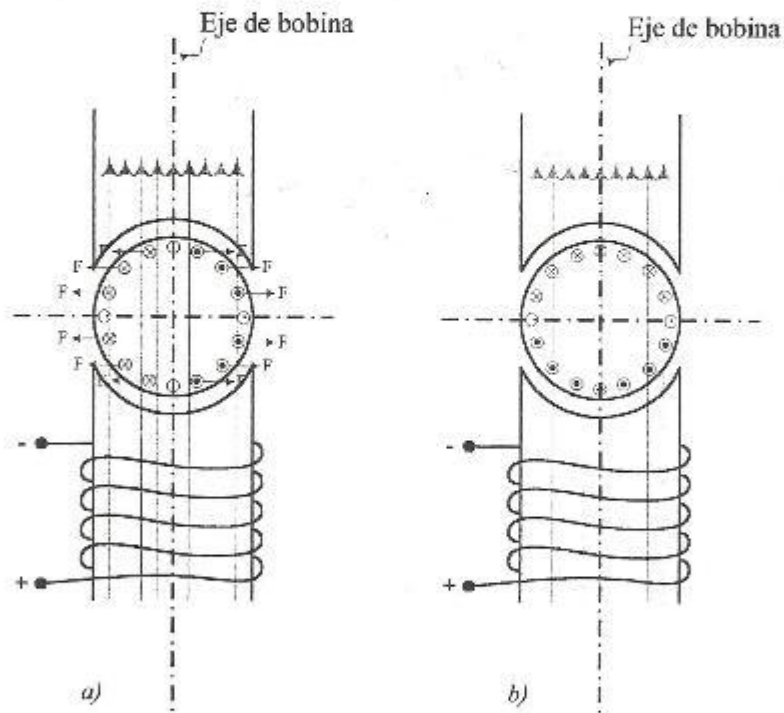


Figura 4.3. Representación del efecto de arranque en el motor monofásico de inducción

Cuando se hace girar el rotor existirá en él además de la tensión inducida por el campo estatórico otra tensión inducida en virtud de su movimiento de rotación en el campo fijo del estator, las tensiones inducida en los conductores del rotor debida el movimiento de este, tienen la misma dirección en todos los conductores de la mitad superior del dibujo y la dirección contraria en todos los de la mitad inferior (figura 4.3-b), estas tensiones debidas al movimiento crean una componente de corriente en el rotor y una componente de onda de f.m.m. del mismo, cuyo eje esta desplazado 90° eléctricos respecto al eje del estator, el ángulo de par correspondiente a esta componente de la f.m.m. del rotor es de 90° , con la que realmente se genera un par.

La f.m.m. que es pulsante, por lo antes dicho, se puede representar por un vector de dos direcciones en el espacio, de longitud variable ya que el valor instantáneo de la onda f.m.m. en el eje de la bobina varia senoidalmente con el tiempo, una de la dirección apunta hacia arriba durante la mitad del tiempo y otra apunta hacia abajo la otra mitad del tiempo (ver figura 4.4), y cuya magnitud y dirección en cualquier momento esta determinada por la magnitud y dirección instantánea de la corriente en el estator, a su vez, la onda estacionaria y pulsante se puede representar en dos ondas

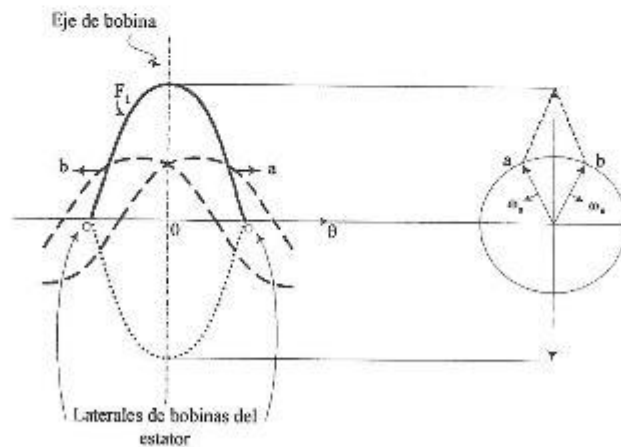


Figura 4.4. Ondas de f.m.m. en un motor de inducción monofásico

giratorias de amplitud constante y sentido opuesto (a y b, en la figura 4.4), en la figura puede verse que dicho vector puede ser considerado como la suma de dos vectores iguales girando en sentido opuesto a la velocidad de sincronismo.

Si el rotor permanece parado, las dos ondas de flujo (a y b), directa e inversa, creadas por la f.m.m. del estator y por las corrientes del rotor serán iguales entre sí, y también serán iguales las correspondientes componentes de par, es decir que no existirá par de arranque alguno. Cuando el rotor está en movimiento, la componente de la corriente que es creada por el campo inverso es mayor que cuando está parado, por la ley de Lenz, esta crea una f.m.m. que se opone a la f.m.m. de la corriente del estator debilitando la onda de flujo inversa, y el factor de potencia es menor. Caso contrario sucede con la componente de la corriente creada por el campo directo, a medida que aumenta la velocidad la onda de flujo directa crece y la inversa decrece manteniéndose constante su suma, debido a esto el par ocurrido por el campo directo es mayor y el ocurrido por campo inverso es menor. En la figura 4.5 se puede

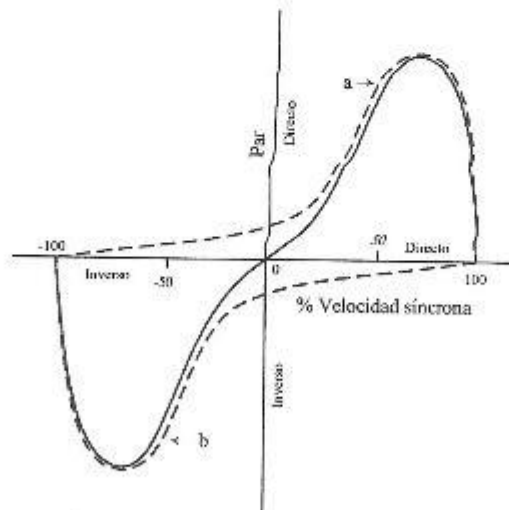


Figura 4.5. Característica par-velocidad de un motor de inducción monofásico

observar en la zona de poco deslizamiento que el campo directo es varias veces mayor que el inverso.

Las propiedades del motor monofásico son cualitativamente similares a las del motor trifásico, aunque cuantitativamente mucho menos favorables, su caída de velocidad es mayor. A igualdad de dimensiones su potencia es más pequeña, de aquí resulta también su bajo rendimiento y el factor de potencia es más reducido que el de un motor trifásico equivalente.

4.1.3. Motor de fase partida

Se puede obtener un par de arranque al agregar un devanado de arranque o auxiliar, desfasado 90 grados en el espacio respecto al devanado principal de un motor monofásico de inducción. Lo normal es que este devanado auxiliar se arrolle con menos vueltas de un alambre de menor diámetro, para así obtener una resistencia considerablemente mayor para la razón de reactancias del devanado principal y se conecta del modo directo a través de la alimentación de energía eléctrica en paralelo con ese devanado, como se muestra en la figura 4.6.

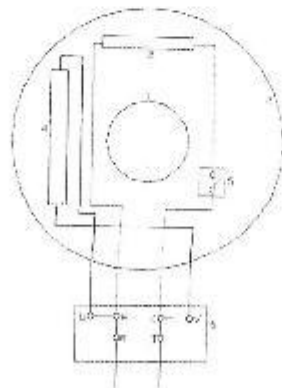


Figura 4.6. Esquema de conexión de un motor de fase partida: 1- Rotor 2- Estator 3- Arrollado de arranque 4- Arrollado de régimen 5- Interruptor centrífugo 6- Placa de bornes.

-Red	Bornes R-T
-Motor con un arrollamiento	Bornes U-V
-Motor con dos arrollamientos: Principal (o de régimen)	Bornes U-V
Auxiliar (o de arranque)	Bornes W-Z

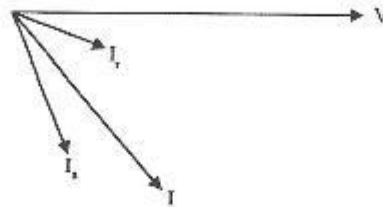


Figura 4.7. Diagrama fasorial en el arranque de un motor de fase partida

Al haber el defasaje de 90 grados en el espacio, las corrientes y por tanto el flujo magnético pasan por un valor máximo en el arrollado principal antes que por el arrollado auxiliar. Como la corriente auxiliar está en retraso, el flujo auxiliar también lo estará. En la figura 4.7 se puede observar el diagrama fasorial de las corrientes del arrollado principal y auxiliar en condiciones de arranque. La composición de ambos flujos dará lugar a un campo magnético giratorio que permitiera el arranque. En la figura 4.8 se muestra la disposición de estos dos devanados y su flujo.

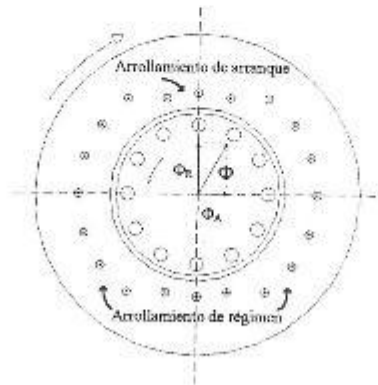


Figura 4.8. Formación del campo magnético giratorio de un motor de fase partida

Una vez puesto en marcha el motor se desconecta el devanado auxiliar generalmente por un interruptor centrífugo que actúa cuando la velocidad a llegado al 75 por ciento de la velocidad sincrónica.

El par de arranque de estos motores es moderado, por lo tanto, su campo de aplicación se limitará a aquellos caso en que no se precise un par de arranque elevado, como eh lavadoras, mezcladoras, pequeñas maquinas herramientas, bombas centrifugas, maquinas soplantes, agitadora, maquinas multicopistas, quemadores de petróleo, entre otros. Los motores de fase partida, se construye normalmente de dos y cuarto polo, es decir, para velocidades sincrónicas de 3600 y 1800 r.p.m. respectivamente y su gama de potencia s abarca generalmente desde 1/20 a 1/2 c.v. siendo los más económicos. La figura 4.9 muestra una curva par-velocidad característica.

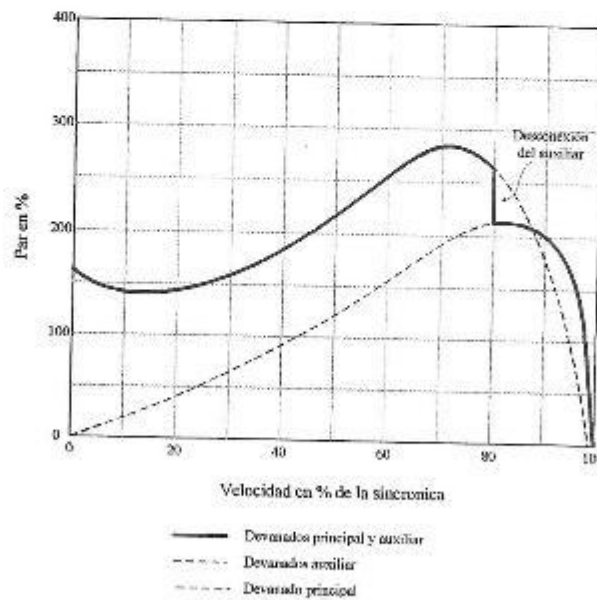


Figura 4.9. Característica par-velocidad de un motor de fase partida

4.1.4. Motor de condensador

El motor monofásico de condensador tiene la apariencia que se demuestra en la figura 4.10, se puede observar que el condensador se instala encima del motor unido a la carcasa.

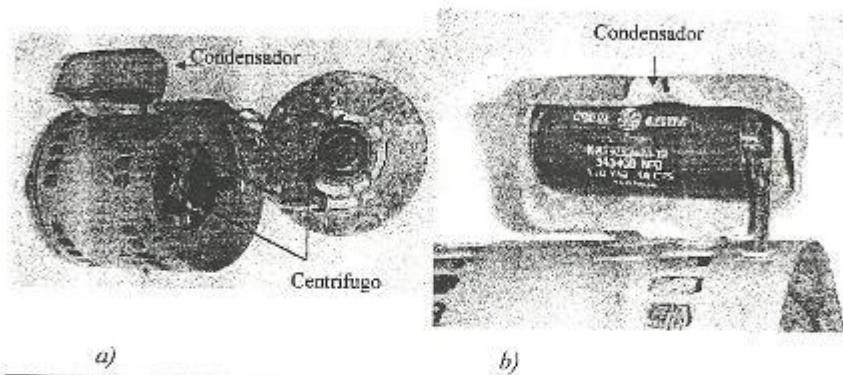


Figura 4.10. a) Motor con condensador b) Condensador de un motor monofásico

Para este motor monofásico también se han situado los dos devanados a 90 grados en el espacio, ver figura 4.11-a, pero esta vez el arrollamiento de arranque está conectado en serie con un condensador de capacidad suficiente para permitir que la corriente de arranque pase por su valor máximo antes que la principal, también en este motor su devanado auxiliar es desconectado aproximadamente cuando el motor alcanza un 80 por ciento de su velocidad nominal. Esta vez el desfase es capacitivo. La figura 4.11-b es la representación esquemática de un motor de condensador. La única diferencia con el motor de fase partida, es la presencia del condensador que proporciona una corriente desfasada en adelanto respecto a la corriente principal y permitir el desfase de 90°. En la figura 4.12 se puede observar el diagrama fasorial de las corrientes del arrollado principal y auxiliar en condiciones de arranque. Todo lo que se ha dicho a propósito de los motores de fase partida en lo que se refiere a velocidad, se aplica a los motores de condensador. Como el condensador puede

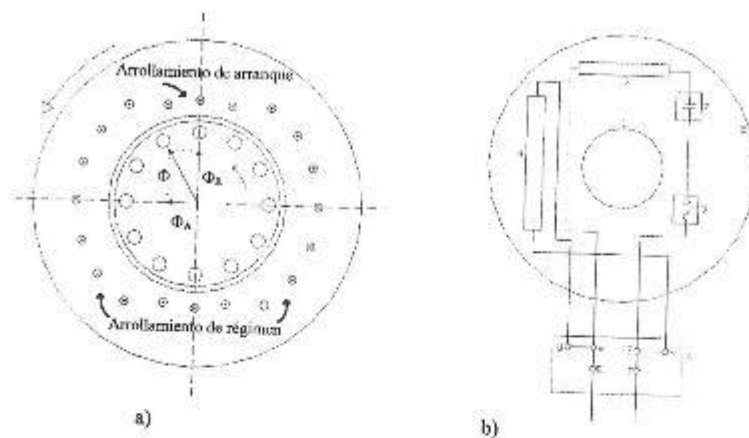


Figura 4.11. a) Formación del campo magnético giratorio en un motor con condensador de arranque b) Esquema de conexión de un motor de fase partida: 1- Rotor 2- Estator 3- Arrollado de arranque 4- Arrollado de régimen 5- Interruptor centrífugo 6- Placa de bornes 7- Condensador.

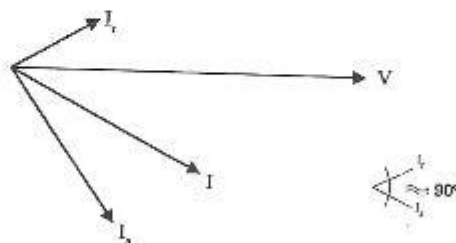


Figura 4.12. Diagrama fasorial en el arranque de un motor con condensador

proyectarse de capacidad suficiente, con este tipo de motor se consigue en el arranque un desfase mayor que en el de tipo de fase partida y, por lo tanto, mayor par de arranque y mejor rendimiento. La potencia de construcción normal es entre 1/8, 2 y 3 c.v. Ver la figura 4.13 la característica par-velocidad. Su campo de aplicación es muy extenso, ya que su gran par de arranque y su velocidad casi constante lo hacen idóneo

para compresores de aire, compresores de refrigeración, sistemas hidroneumático, bombas de gasolina, quemadores de petróleo, gas-oil y fuel-oil.

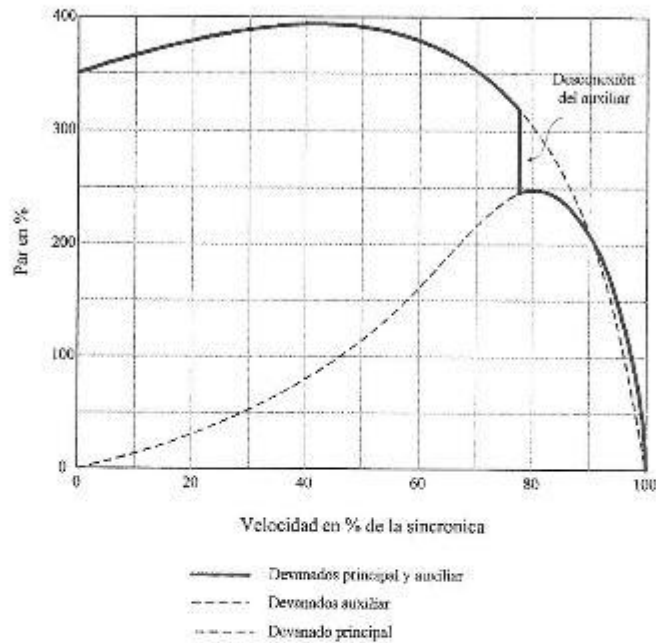


Figura 4.13 Característica par-velocidad de un motor con condensador

4.1.5. Motor de condensador permanente

En algunos casos de motores más pequeños que los anteriores, con necesidades de bajo par de arranque, es permisible dejar el capacitor en forma permanente en circuito, es el mismo esquema que del motor con condensador pero se elimina el interruptor centrífugo para dejar permanente el condensador. Las limitaciones del par de arranque y el tamaño del motor en este tipo resulta de la tendencia inherente de la corriente del devanado auxiliar de aumentar su magnitud y desplazarse hacia atrás en la fase en el tiempo, conforme el motor se acelera, de modo que, a menos que la

impedancia del capacitor sea muy alta, el motor tendrá pérdidas objetables, se mejora el factor de potencia, el rendimiento y las pulsaciones del par a plena velocidad. A continuación se muestra la gráfica par-velocidad. Ver figura 4.14.

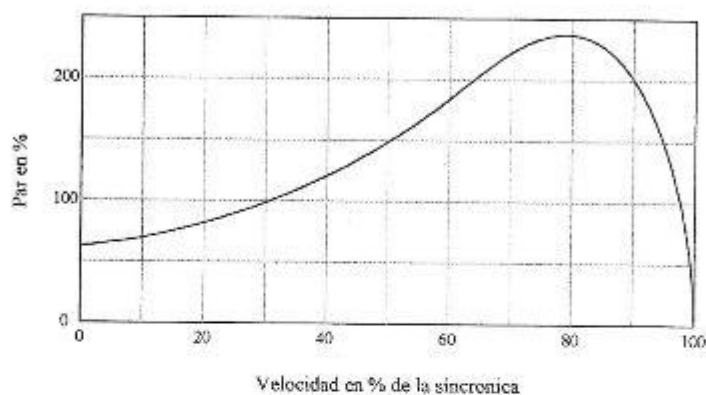


Figura 4.14. Característica par-velocidad de un motor con condensador permanente

Se usa principalmente para calefactores unitarios o para otros ventiladores montados en flechas, es en esencia un motor de velocidad constante pero, por medio de un conmutador de dos velocidades o por medio de un autotransformador, se puede obtener otras velocidades.

4.1.6. Conexión de un motor trifásico como monofásico

Cuando se dispone de un motor trifásico que se desea emplear circunstancial o definitivamente como monofásico, puede hacerse también del sistema de fase auxiliar con condensador. Para ello se conecta dos fase, U y V, por ejemplo, en serie, directamente a la línea monofásico, mientras que la tercera fase, W, se empalma también a la línea a través del condensador, como se muestra en la figura 4.15. Un motor así, arranca por sí solo con las mismas características de un motor monofásico

normal. Aplicando un condensador adecuado, la potencia del motor como monofásico puede llegar al 80-90 por ciento de su valor normal como trifásico.

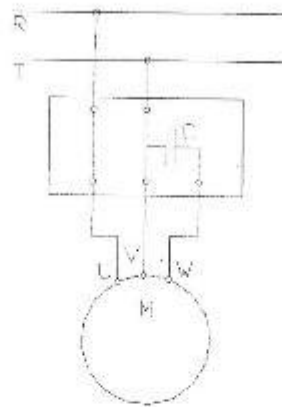


Figura 4.15. Esquema de conexión de un motor trifásico como monofásico

4.2. MOTOR UNIVERSAL

4.2.1. Construcción

Se llama Motor Universal al que puede funcionar indistintamente con corriente continua y con corriente alterna sin que sus características de funcionamiento tales como velocidad y par motor entre otras, sufran variaciones sensibles, generalmente se construyen para potencia inferior a 1 c.v. (alrededor de $\frac{1}{2}$ Hp). La constitución del motor universal es muy parecida a la del motor serie de corriente continua y se ha representado esquemáticamente en la figura 4.16-a, consta de un estator bobinado y un rotor también bobinado provisto de colector y escobillas. En los motores de pequeña potencia el estator es de polos salientes, semejante en todo al estator de las maquinas de corriente continua, en los motores mayores el estator es ranurado y con arrollamientos parecidos a los de los motores de inducción, como se muestran en la figura 4.17. El arrollamiento inductor va conectado en serie con el arrollamiento del inducido a través de las escobillas. Ver figura 4.16-b.

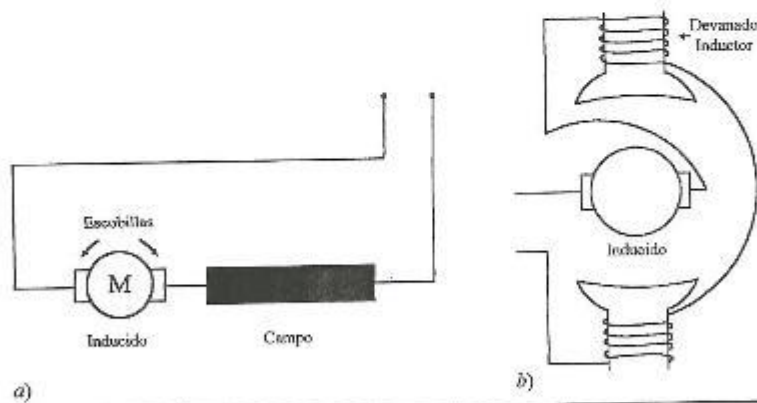


Figura 4.16. a) Representación esquemática de un motor universal. b) En los motores universales el devanado inductor está en serie con el devanado inducido

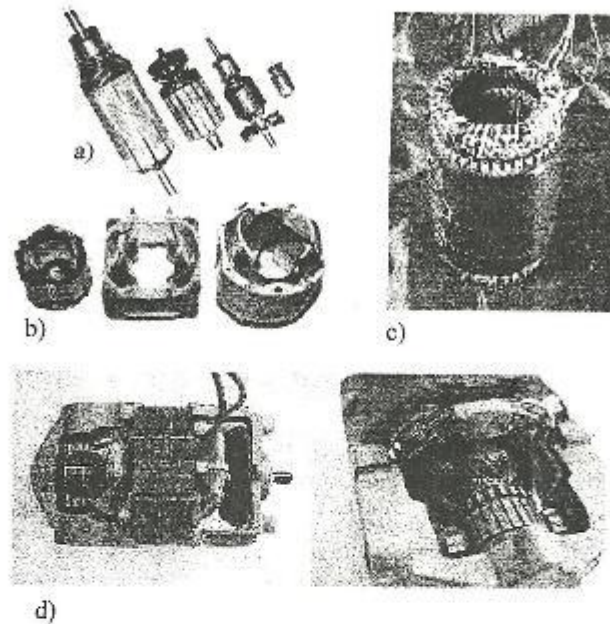


Figura 4.17. Partes componentes de un motor universal. a) Diferentes tipos de rotores. b) Estatores de polos salientes. c) Estator ranurado. d) Motor universal de polos salientes

4.2.2. Funcionamiento

Mediante la figura 4.18 se explicará el funcionamiento del motor universal, en ella colocan bobinas sobre un solo polo por simplicidad, se indicaron la polaridad y los sentidos positivos para la tensión, corrientes y flujo respectivamente, también el sentido de giro. Se notará que cuando la corriente es positiva, la f.e.m. inducida por velocidad en las escobillas (E_{23}), es positiva, por tanto la corriente (I) y E_{23} estarán en fase. El ángulo de par está fijado por la posición de las escobillas, normalmente es de 90° que es el valor óptimo. Como se sabe la caída en el devanado serie ($I \cdot jX_{serie}$) adelanta a la corriente por 90 grados debida a su propiedad inductiva, al igual que la caída en el inducido ($I \cdot jX_{armadura}$). Nótese que el flujo estará en fase con la corriente

según el sentido positivo elegido (ver figura 4.19.-b). Con la información anterior se puede trazar el diagrama fasorial del motor y se muestra en la figura 4.19-a, donde $I \cdot R$ es la caída resistiva total ocurrida entre 1 y 3 (campo serie más el inducido). En la figura 4.20 se muestra el circuito correspondiente al diagrama fasorial.

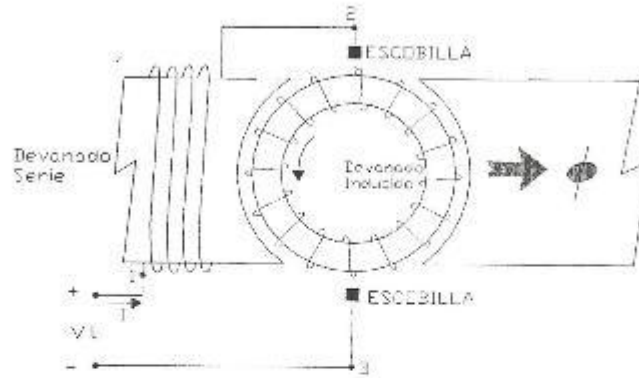


Figura 4.18. Representación esquemática de un motor monofásico

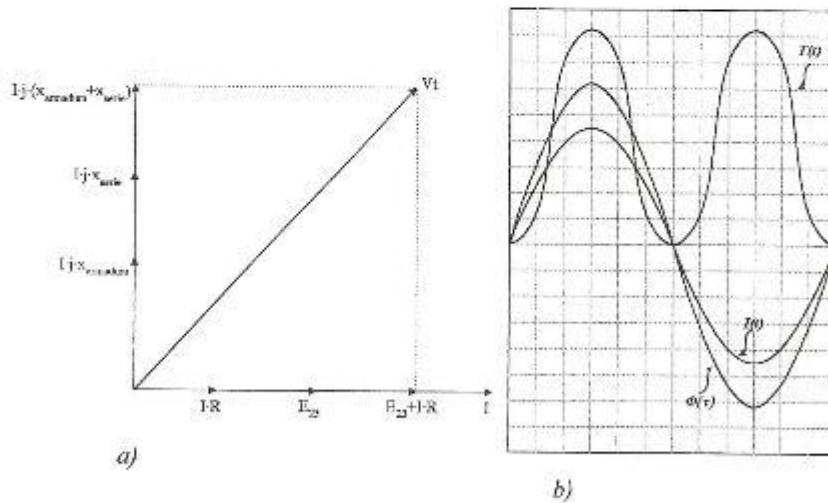


Figura 4.19. a) Diagrama fasorial del motor universal de la figura 36 b) Sentido tomado para el flujo, la corriente y el torque.

Al ser alimentado el motor con corriente alterna las intensidades de los campos del estator y del rotor varían iguales en el tiempo colocándose en fase, por esto el par es unidireccional de magnitud pulsatoria y con frecuencia el doble de la red. Este fenómeno es semejante si se alimenta con corriente continua. Ver figura 4.19-b.

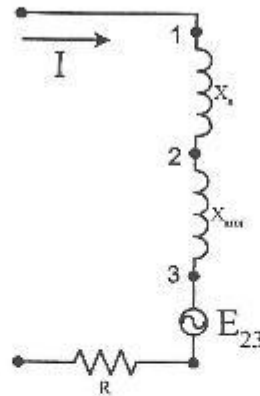


Figura 4.20. Circuito equivalente del motor universal

Del diagrama de la figura 4.19-a se deduce que el motor funciona con corriente en retardo. Un Motor Universal diseñado para funcionar en corriente alterna, ordinariamente tiene ciertas diferencias respecto al de continua con el objeto de mejorar el factor de potencia (fp). Estas diferencias las podemos resumir de la siguiente forma: menor f.m.m. inducida en el inductor ya que las caídas de tensión en las reactancias del inducido e inductor afecta a la tensión aplicada, y la velocidad tiende a disminuir, sufre de saturación cuando la onda de corriente está en su máximo y el valor eficaz de flujo es menor y por consecuencia el par tiende a ser menor

Los motores universales tienen características de funcionamiento muy semejantes a los motores serie de corriente continua en ambos el par de arranque es muy elevado y la velocidad es muy variable con la carga (ver figura 4.21), existiendo también el embalamiento cuando la carga es muy pequeña o nula, por esta razón los motores

universales se utilizan rígidamente acoplados a la carga correspondiente, formando con ellos un solo bloque (ejemplos: molinos de café, trituradoras domésticas, pulidoras de pisos, licuadoras, aspiradoras, entre otros.). Sus aplicaciones se extienden a aspiradoras, máquinas de coser y máquinas herramientas manuales (taladros, rectificadoras, pulidoras, entre otros), normalmente este tipo de motores trabaja a grandes velocidades de 1500 hasta 5000 r.p.m. Como ejemplo de aplicación véase la figura 4.22, donde se muestra un esmeril manual accionada por un motor universal.

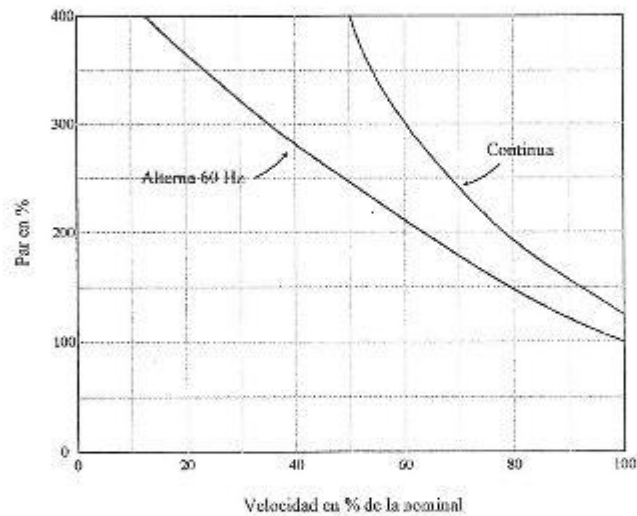


Figura 4.21. Característica par-velocidad clásica de un motor universal

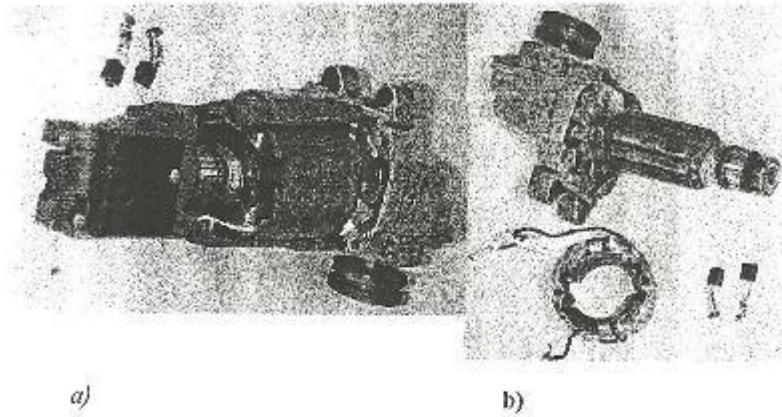


Figura 4.22. Esmeril a) Corte transversal de un esmeril b) Despiece de un esmeril

CAPÍTULO V

ELABORACIÓN DEL MULTIMEDIA

5.1. INTRODUCCIÓN

Macromedia Flash constituye la plataforma de programación para el desarrollo del multimedia, este programa posee grandes ventajas entre las cuales se encuentran la edición en formato "html" para crear páginas web y "swf" que constituyen películas con animaciones de gran formato. Una de sus principales ventajas es la capacidad y flexibilidad como medio ideal que hace posible el desarrollo de los diferentes módulos de simulación que contienen diseños animados, controles de navegación, y mucha interactividad.

MAQMEDIA IV cuenta con el soporte de varios programas que hacen posible la construcción y edición de las imágenes para la creación de las animaciones, entre ellos se encuentran: Autocad R2000, Microsoft Visio Tecnical, Microsoft Office ® 2000 Premium, Adobe Photoshop 5.0, Xara 3D 4.0.

5.2. DESCRIPCIÓN DEL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN

5.2.1. Conceptos Básicos

Escenario y línea de tiempo. Las películas de Flash dividen el tiempo y cada división se denomina fotogramas. El escenario se compone del contenido de los fotogramas individuales de la película, que pueden ser dibujados directamente o bien por ilustraciones importadas.

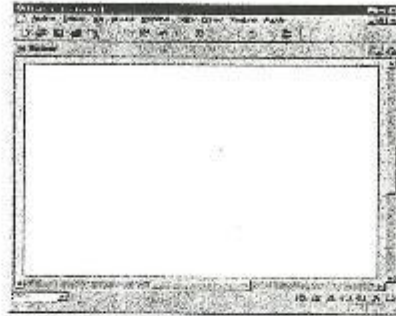


Figura 5.1. Escenario

En la Línea de tiempo se coordina el desarrollo de la animación y se ensambla en distintas capas que contienen todos los fotogramas de la película.

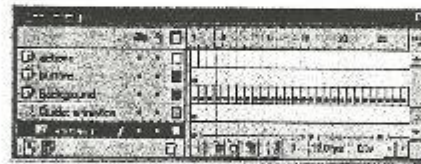


Figura 5.2. Línea de tiempo

Capas. Las capas actúan como una serie de hojas de acetato transparente superpuestas, manteniendo las diferentes ilustraciones por separado, de forma que puedan combinarse distintos elementos en una imagen visual conjunta.

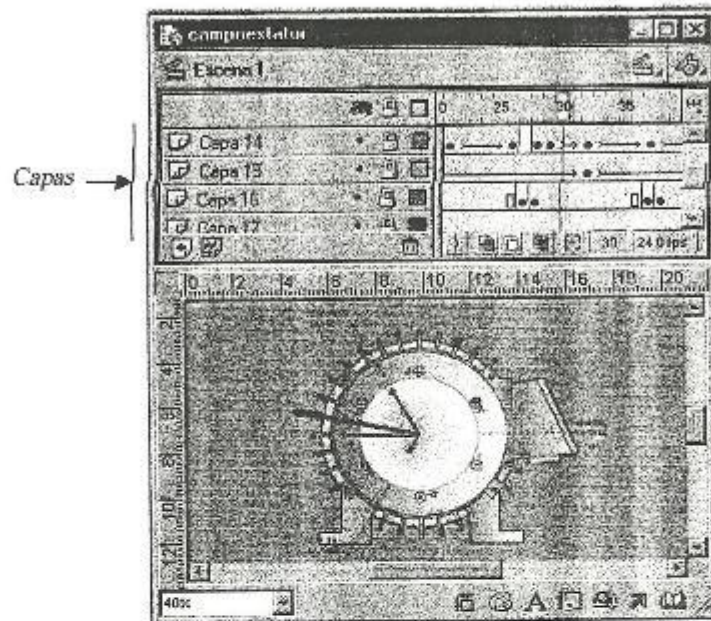


Figura 5.3. Capas

Simbolos e instancias. Los simbolos son elementos que crea el usuario para la conformación de la película, pueden ser gráficos, botones, clips de película, archivos de sonido o fuentes. Son reutilizables porque al crearlos se almacena en la Biblioteca y al colocarlo en el Escenario, se crea una instancia del simbolo.

Nombre	Tipo	Número de
corrientes	Clip de película	1
corrientes y campos	Gráfico	1
detener	Botón	1
Eraser	Sonido	1

Figura 5.4. Simbolos

Ventana Biblioteca. La ventana Biblioteca es donde se guardan y organizan los símbolos, además de archivos importados tales como archivos de sonido, imágenes de mapa de bits que los permite ver y organizar durante la ejecución del trabajo. La ventana biblioteca muestra una lista desplegable con los nombres de todos los elementos contenidos en ella, donde un icono situado junto al nombre de cada elemento indica el tipo de archivo y se pueden organizar en carpetas. Puede crear bibliotecas compartidas para utilizar los componentes de una película en varias películas de Flash.



Figura 5.5. Ventana biblioteca

Barra de herramientas. La barra de herramientas permite dibujar, pintar, seleccionar y modificar las ilustraciones, así como cambiar la visualización del escenario. Se divide en cuatro secciones:

- La sección Herramientas contiene las herramientas de dibujo, pintura y selección.
- La sección Ver contiene herramientas para ampliar y reducir, así como para realizar recorridos de la ventana de la aplicación.
- La sección Colores contiene modificadores de los colores de trazo y relleno.
- La sección Opciones muestra los modificadores de la herramienta seleccionada, los cuales afectan a las operaciones de pintura o edición de dicha herramienta.

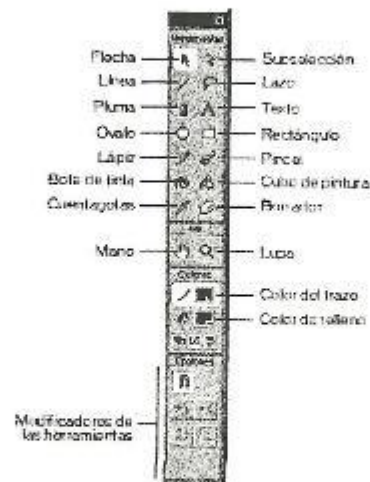


Figura 5.6 Barra de herramientas

Paneles. Los paneles flotantes contienen los comandos y las opciones relacionados con cada tipo de elemento, permiten ver, organizar y modificar los elementos de una película. Con el uso de estos paneles es posible modificar símbolos, instancias, colores, tipo, fotogramas y otros elementos.

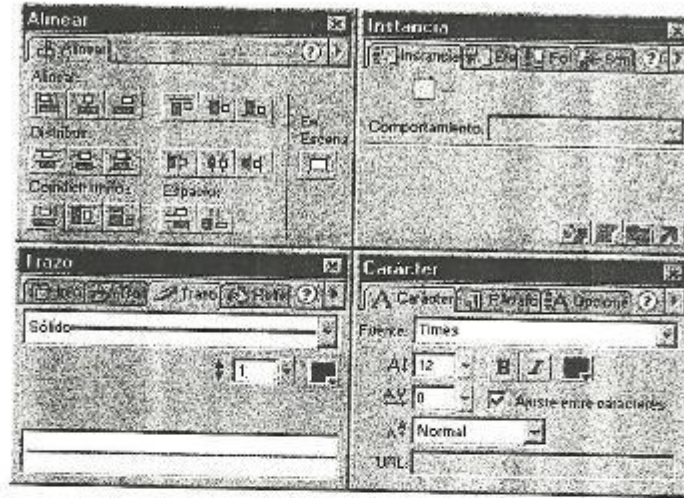


Figura 5.7. Paneles flotantes

Línea de tiempo. Representa los cambios de una película en el tiempo. Los componentes principales de la línea de tiempo son las capas, los fotogramas y la cabeza lectora, ver la figura 5.8. La línea de tiempo organiza y controla el desarrollo del contenido de una película en capas y fotogramas.

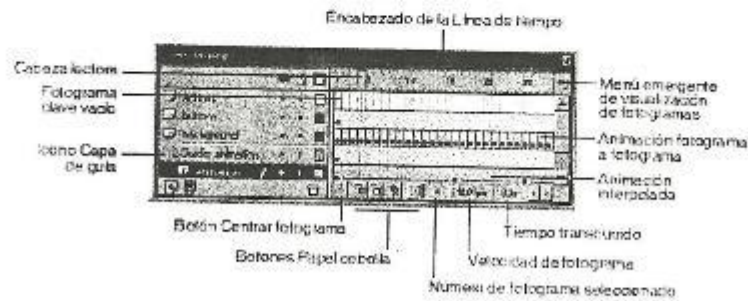


Figura 5.8. Línea de tiempo

Escenas. Las escenas se utilizan para organizar una película por temas. Al publicar una película de Flash que contiene más de una escena, las escenas del archivo SWF se reproducen en una sola secuencia en el orden en el que aparecen en el panel Escena del archivo FLA. Los fotogramas del archivo SWF están numerados consecutivamente entre las diferentes escenas.

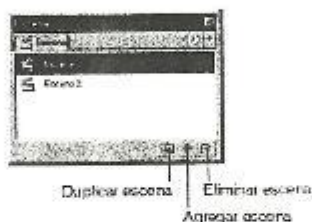


Figura 5.9. Panel de control de escenas

Cuadrícula, guías y reglas. La cuadrícula aparece como un conjunto de líneas debajo de las ilustraciones en todas las escenas. Se puede modificar el tamaño de la cuadrícula, el color de las líneas que la componen y ajustar los objetos a esta, facilitando el trabajo de centrado y alineación de los símbolos. Las reglas se muestran en la parte superior y a la izquierda del área de trabajo y se puede seleccionar la unidad de medida a utilizar. Al mover un elemento en el Escenario con las reglas visibles, aparecerán unas líneas indicadoras de las dimensiones del elemento.

5.2.2 Action Script

Action Script es el lenguaje de programación de Flash que permite generar las instrucciones para configurar la ejecución de las películas, de manera que los símbolos, fotogramas y demás elementos que la conforman se comporten de la forma deseada, con el fin de crear películas altamente interactivas y aplicaciones web.

El lenguaje ActionScript de Flash 5 sigue el estándar ECMA-262 (la especificación escrita por la Asociación Europea de Fabricantes de computadores, European Computer Manufacturers Association) derivado de "JavaScript" y admite los siguientes tipos de datos: cadena, número, booleano, objeto y clip de película. Los distintos tipos de datos permiten utilizar diferentes tipos de información en ActionScript.

Los objetos predefinidos se pueden utilizar para acceder y manipular ciertos tipos de información. A continuación se muestran algunos de estos objetos:

- El objeto "Math" dispone de un complemento de constantes y funciones matemáticas integradas como: E (constante de Euler), cos (Coseno), y atan (arco tangente), entre otras.
- El objeto "Date" permite obtener información sobre la fecha y la hora del sistema en el que se esté ejecutando Flash Player.
- El objeto "Sound" permite agregar sonidos a una película y controlarlos a medida que se reproduce. Por ejemplo, puede ajustar el volumen (setVolume), o el balance (setPan).
- El objeto "Mouse" permite ocultar el cursor estándar para que pueda utilizar un cursor personalizado.
- El objeto "MovieClip" permite controlar clips de película, llamando a un método como "play", "loadMovie", o "duplicateMovieClip" desde un nombre de instancia de símbolo utilizado.

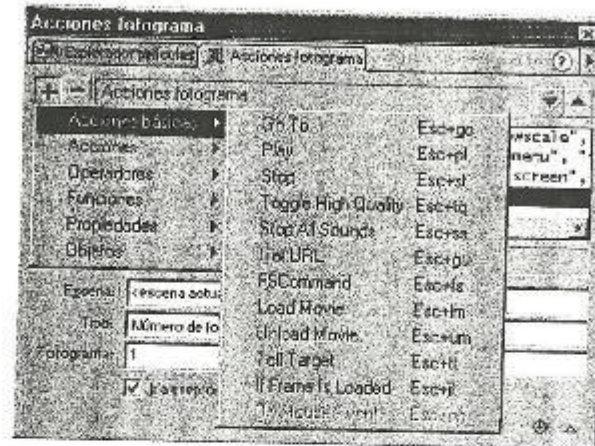


Figura 5.10. Ventana de asignación de acciones

Se puede declarar variables locales que expiran al final de la lista de acciones o de la llamada de función, esto permite gestionar memoria y volver a utilizar los bloques de código en los scripts. Se puede definir funciones con parámetros que devuelven valores, y estos se pueden volver a utilizar como bloques de código. Entre las acciones que se encuentra en Action Script tenemos: la acción `onClipEvent` para asignar acciones directamente a instancias de clip de película en el Escenario y dispone de eventos como `load`, `enterFrame`, `mouseMove`, y `data` que le permiten crear nuevas clases de interactividad avanzada. Puede utilizar acciones como "do..while y for" para crear ciclos complejos. Otras acciones se implementan como métodos del objeto `MovieClip`: `getBounds`, `attachMovie`, `hitTest`, `swapDepths`, y `globalToLocal`.

Los scripts se pueden introducir directamente en el panel acciones en modo experto o elegir elementos de un menú emergente o de una lista de la caja de herramientas mostrada en la figura 5.10.

5.3. MANUAL DEL USUARIO

El manual del usuario se refiere a los requerimientos del sistema y guía para la instalación y utilización satisfactoria de MaqmediaIV.

Requerimientos del sistema. MaqmediaIV necesita de ciertos requerimientos en el sistema para que el funcionamiento sea el previsto, libre de problemas:

- Para Microsoft Windows: Un procesador Intel Pentium® de 200 Mhz o equivalente (se recomienda 600Mhz) con Windows 95 o posterior (incluyendo Windows 2000) o NT versión 4.0 o posterior; 32 MB de RAM mínimo (se recomiendan 64 MB); 40 MB de espacio disponible en disco duro, un monitor a color con una resolución de 800 por 600 y una unidad de CD-ROM.
- Para Macintosh®: Un Power Macintosh (se recomienda G3 o superior) con System 8.5 o posterior; 32 MB de RAM de memoria de aplicaciones libre, además de 40 MB de espacio disponible en disco duro; un monitor a color con una resolución de 800 por 600 y una unidad de CD-ROM.

Uso de MaqmediaIV. Para la instalación del programa se debe insertar el disco en la unidad de CD ROM del computador, a partir de ese momento el programa se ejecutará automáticamente iniciando con las pantallas del módulo de presentación, donde se identifica el programa, los autores y la institución que respalda al proyecto. La primera pantalla de este módulo proporciona al usuario la opción de omitir o ver la presentación y de acceder a la pantalla de identificación de los autores . (Figura 5.11)



Figura 5.11. Pantalla de inicio.



Figura 5.12. Pantalla de presentación.

Si siguiendo a los módulos de presentación están los módulos de contenido, donde se exponen de forma muy explícita las opciones del contenido programático de maqmedialV.

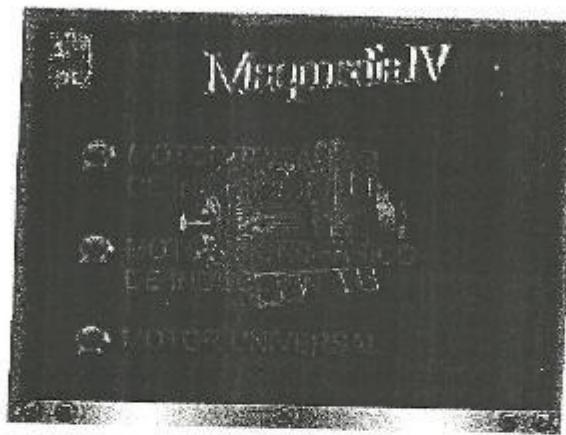


Figura 5.13. Pantalla principal del menú.



Figura 5.14. Pantalla de menú secundario.

Al seleccionar cualquiera de los puntos que conforman la pantalla principal del menú (figura 5.13), se exhiben las pantallas de los menús secundarios. (figura 5.14). Haciendo clic con el botón derecho del ratón sobre los iconos correspondientes al módulos en los menús secundarios, se desplegaran los módulos de simulación (figura 5.15) que explican los fenómenos y principios de funcionamiento de los motores de inducción trifásicos, monofásicos y los motores universales.



Figura 5.15. Módulo de simulación.

MaqMedia IV cuenta con un amplio sistema de control, que proporciona al usuario las herramientas necesarias para interactuar con el programa mediante las interfaces del computador. La figura 5.16, muestra las diferentes barras control, botones e iconos y la función que corresponde a cada uno de ellos.

La figura 5.17 muestra módulo que se despliega al accionar el botón de navegación. Este módulo resume en una pantalla los contenidos de todos los menús y le permite al usuario ubicarse en cualquier punto del programa desde el modulo en que se encuentre, facilitando la navegación.

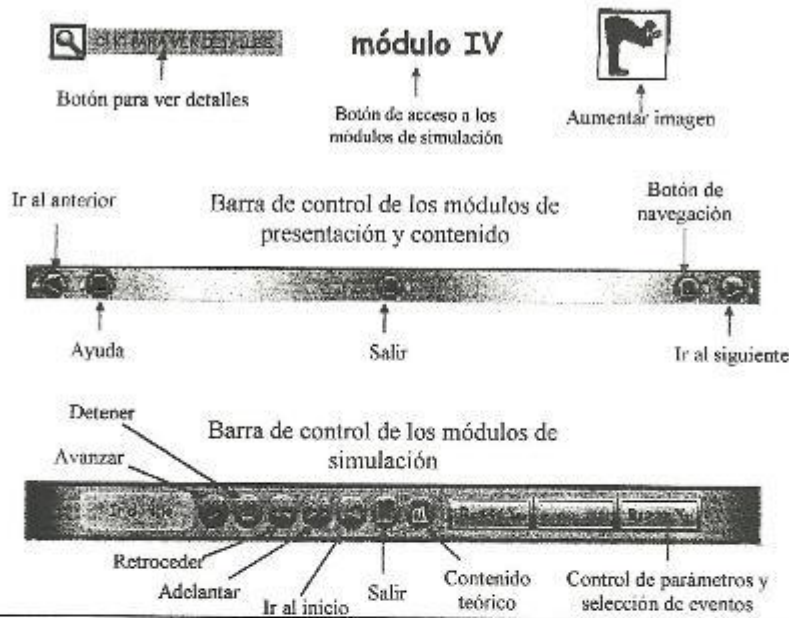


Figura 5.16. Iconos, botones y Barras de control.



Figura 5.17. Módulo de navegación.

El módulo de ayuda de MaqmediaIV se puede acceder haciendo clic en el botón de ayuda en los módulos de presentación y de contenido. Proporciona al usuario una *guía básica de fácil manejo para el uso del programa* y esta concebida en tres temas *principales: los requerimientos del sistema, estructura del programa y barras de controles e iconos*. La figura 5.18 muestra la pantalla principal del módulo de ayuda.

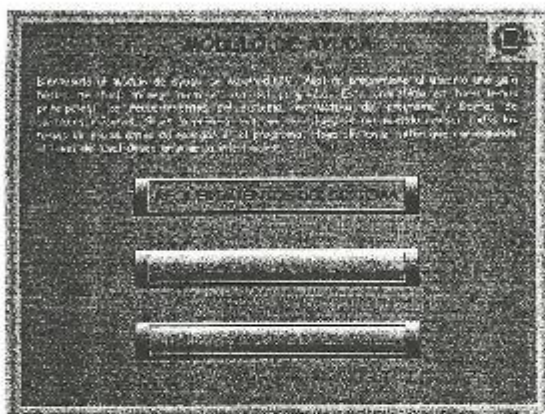


Figura 5.18. Pantalla principal del módulo de ayuda.

Se puede seleccionar el tema de interés en el módulo de ayuda haciendo clic en el botón respectivo. El botón de requerimientos del sistema indican mediante una pantalla los requisitos que debe cumplir el sistema para que la ejecución del programa sea el adecuado. El botón de estructura del programa proporciona mediante un diagrama de flujo la composición y forma en que están comunicados las principales partes (figura 5.19). Haciendo clic en los bloques del diagrama de flujo se puede ampliar la información al respecto. El botón de iconos y las barras de control informa al usuario sobre las herramientas para interactuar con el programa mediante las interfaces del computador. (ver la figura 5.16)

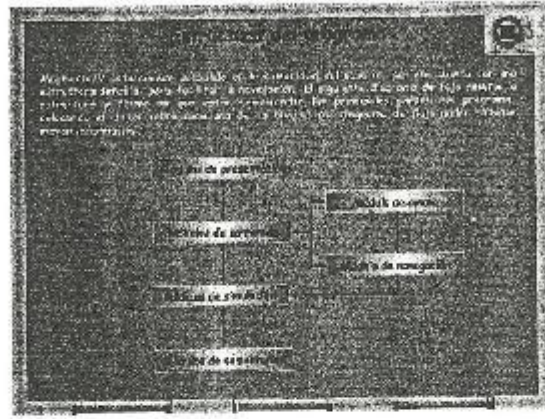


Figura 5.19. Pantalla de estructura del programa del módulo de ayuda.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El instructor debe hacer significativo el aprendizaje, como una manera de estimular al aprendiz, al tiempo que debe proveerles ambientes para interactuar una vez que haya despertado la motivación intrínseca. La buena forma y la interacción inquisitiva por parte del aprendiz con el ambiente de aprendizaje, permitirán que se lleguen a conocimiento.

No se trata de que el instructor simplemente envíe a los aprendices a investigar y lo demás corre por cuenta de ellos. Dificilmente podrá desarrollarse una indagación de algo, si no se tiene claridad respecto a lo que se busca y su razón de ser. La motivación intrínseca no es innata, hay que despertarla. La percepción es relativa, pero es selectiva, por lo que se puede orientar o focalizar desde la perspectiva que interesa. Por otra parte no todos los alumnos llegan por sí mismos al conocimiento; por tanto, se impone dar seguimiento a los logros alcanzados por los diversos participantes y sobre esta base reorientar o dar pistas que conduzcan al conocimiento. En fin, la responsabilidad que implica orientar la búsqueda del conocimiento es tan o más demandante que la de transmitirlo.

Desde la perspectiva del instructor, lo criticable es que se centre en el contenido que le interesa cubrir, no es propiciar su proceso de la información por parte del estudiante. La actividad central del instructor es la presentación, en muchas ocasiones excelentes desde el punto de vista de organización y de forma, de aquello que enseña. Igual importancia debiera dar a su procesamiento por parte de los aprendices, ligando o asociando con lo que ya saben, propiciando la práctica en variedad y cantidad de contextos, de aquellas destrezas, habilidades o conceptos que interesa aprender.

Conclusiones y recomendaciones

Desde la perspectiva del aprendiz lo criticable es que se centre en memorizar aquello que el profesor o los materiales le propongan, sin crear los medios para asociarlo con lo que ya sabe, derivar nuevos conceptos, contrastarlos con los que ya posee, practicarlos en variedad de contextos, hallar claves para recuperar los nuevos conocimientos, en fin, utilizar la información, conocimientos o destrezas.

Dar énfasis en la actividad del aprendiz y atender debidamente cada una de las etapas del proceso de aprendizaje es un compromiso difícil, pero de gran importancia.

Unas conclusiones basadas en el potencial que tiene el aprendizaje programado debido a la forma en que se utilice se citarán a continuación: Primero, el aprendizaje programado puede ser eficaz. Segundo, el aprendizaje programado puede deducir las equivocaciones de los alumnos en la medida en que el material haya sido probado y ajustado. Tercero, un programa de aprendizaje puede nivelar las diferencias en las capacidades de los estudiantes para el aprendizaje. Aunque todos los estudiantes pueden mejorar, los procesos parecen ser más evidentes entre los más atrasados. Esto se puede deber a la variación de los límites de tiempo, como al hecho de que cualquier secuencia programada tiende a imponer un límite superior a lo que se puede aprender. Cuarto, el tiempo de aprendizaje individual puede variar mucho, puesto que se trabaja a ritmo propio. Quinto, la posibilidad de predecir el éxito individual puede disminuir debido a que quienes tardan en aprender puede lograr mejores resultados con materiales programados que con otros métodos de aprendizaje. Sexto, la motivación del aprendizaje puede aumentar realmente debido al hecho de que los aprendices saben inmediatamente si han tenido éxito. Por otra parte, la anticipación de refuerzos (motivación extrínseca) puede servir de ignición al motor del proceso de aprendizaje.

Son fundamentales los medios de que dispongan para crear y administrar ambientes educativos ricos en situaciones que sean significantes para los aprendices y

Conclusiones y recomendaciones

relevantes a lo que se aprende. Algunos temas y objetivos podrán desarrollarse en un *aula de clase convencional*, supliendo el profesor los contextos que hagan *significante el aprendizaje*, proponiendo retos y actividades que lo hagan *motivante y que promuevan* que se dé el discernimiento. La buena forma pueda ir ligada a las *explicaciones claras e interesante* que haga el profesor. En otros caso un buen material textual o audiovisual podrá ser un *ambiente rico y apropiado para lograr* aquello que se desea aprender.

Pero habrá temas para los que la audiencia no tiene un contexto, en los que la *experiencia es fundamental para entender* de qué se trata, en los que no basta con oír ni ver, sino que se impone hacer. En circunstancia como estas se requerirá que haya actividad de parte del aprendiz, explorando, intercalando u observando inquisitivamente ambientes vivenciales.

Se sugiere incentivar en el estudiante el uso de MaqmediaIV como material de apoyo en el curso de Máquinas Eléctricas II paralelamente al desarrollo de las actividades académicas. MaqmediaIV está diseñado de forma que permite la edición y modificación de su contenido teórico y a demás que sirva de base para la creación de programas similares fundamentados en las nuevas tecnologías con el objeto de adaptarlos a las exigencias de la época.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Giménez, C. y González, M. (2000). Normas para la Evaluación y Presentación del Trabajo Especial de Grado en la Escuela de Ingeniería Eléctrica. Trabajo de ascenso no publicado. Universidad de Carabobo, Bárbula.

Donald G., Fink y Wayne Beaty, H. (1996). Manual de Ingeniería Eléctrica (Romo, J., García, R., Pérez, J., de la Cera, J., Salas, J., Ramírez, E., trads). México: McGraw-Hill Interamericana de México, S.A. de C.V. (Trabajo original publicado en 1993).

Chapman, Stephen J. Maquinas Eléctricas (2a. ed.). Mc Graw Hill.

Danilo, L. (s.f.) Algunos aspectos de la maquina de inducción. Trabajo no publicado. Universidad de Carabobo, Bárbula.

Danilo, L. (s.f.) Cambio de velocidad en motores trifásicos de inducción cambiando el numero de polos. Trabajo no publicado. Universidad de Carabobo, Bárbula.

Danilo, L. (s.f.) Motor de inducción trifásico, conceptos introductorios. Trabajo no publicado. Universidad de Carabobo, Bárbula.

Urbina, J. y Brito, C. (1999). Aplicaciones interactivas asistidas por el computador para la enseñanza de máquinas eléctricas. Trabajo Especial de Grado no publicado, Universidad de Carabobo, Bárbula.

Ramos, E. (1998). Aplicaciones interactivas asistidas por el computador para la enseñanza de máquinas eléctricas, segunda parte: Flujo magnético y campos

magnéticos giratorios. Trabajo Especial de Grado no publicado. Universidad de Carabobo, Bábula.

Villalonga C., L. y Figuera V., C. (2001). Sensores de Fibra Optica. Trabajo Especial de Grado no publicado. Universidad de Carabobo, Bábula.

Enciclopedia CEAC de Electricidad.(1994). Maquinas de Corriente Alterna (7ma. ed.), España, Barcelona.

Hurtado León, I. y Toro Garrido, J. (1999). Paradigmas y Metodología de la Investigación. Carabobo, Valencia.

H., A. y Panqueva, G. (1992). Ingeniería de Software Educativo. Universidad de los Andes. Colombia, Santa Fe Bogotá.

Ferrandez, A., Sarramona, J. y Tarín L. (1988). Tecnología Didáctica. España, Barcelona.

Kingsley, C., Fitzgerald, A. E., y Kusko, A. (1980). Teorías y Análisis de las Máquinas Eléctricas (Beñiza Valls, E., trads). España, Barcelona.

Macromedia, Inc. (2000). Tutorial de Flash 5.0. San Francisco, EE. UU.: Autor.

APÉNDICE A**A.1. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS EN EL MODELO DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO**

Para predecir el comportamiento de un motor de inducción a los cambios de la carga, estos se pueden conocer mediante el circuito equivalente del motor, pero para esto, es necesario determinar cual es el valor de los elementos que va en el modelo. Estos elementos informativos se pueden encontrar realizando una serie de ensayos sobre el motor de inducción. Los detalles exactos de cómo se deben realizar cada ensayo de motor de inducción, con el objeto de lograr resultados oficiales, se describen en la norma 112 del IEE. Aunque los detalles de los ensayos son muy complicados, los conceptos que permanecen detrás de ellos son relativamente exactos.

A.1.1. Ensayo de cc para la resistencia del estator

Básicamente se aplica una tensión de cc al bobinado del estator de un motor de inducción. Puesto que la corriente es cc, no hay tensión inducida ni flujo de corriente resultante en el circuito del rotor. La única cantidad que limita el flujo de corriente en el motor es la resistencia del estator. El circuito básico para el ensayo de cc se muestra en la figura A.1. Para realizar el ensayo, se ajusta la corriente a los valores nominales al bobinado del estator y se mide la tensión entre los terminales. La resistencia total en el recorrido de la corriente es $2 \cdot r_1$. Por tanto:

$$2 \cdot r_1 = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \quad (\text{A.1})$$

$$r_1 = \frac{V_{cc}}{2 \cdot I_{cc}} \quad (\text{A.2})$$

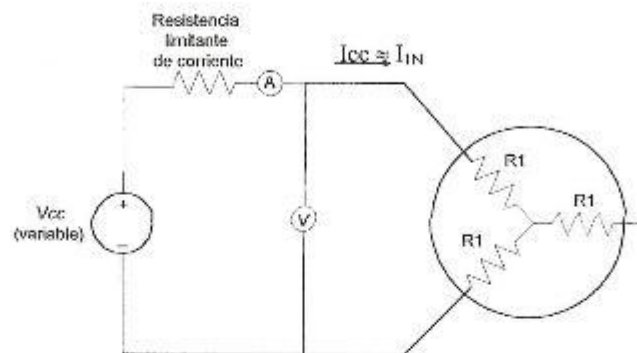


Figura A.1. Circuito de prueba para un ensayo por resistencia de corto circuito.

A.1.2. Ensayo a rotor bloqueado

Debido a que en este ensayo la tensión es baja el flujo también lo es y las pérdidas por histéresis y foncauld son despreciables, tampoco hay pérdidas mecánicas, así que toda la potencia absorbida por la maquina es la debida a las pérdidas en los devanados. En la figura A.2.-a, se muestran las conexiones de este ensayo, para realizarlo se aplica una tensión alterna el estator y el flujo de corriente se ajusta para que sea aproximadamente igual al valor de plena carga. Se mide la tensión, la corriente y la potencia que fluye en el motor. Como r_2 y x_2 son tan pequeños casi toda la corriente de entrada circula a través de ellos, en lugar de hacerlo a través de la rama shunt. La figura A.2.-b representa el recorrido de la corriente.

En condiciones de funcionamiento normal, el deslizamiento de la mayor parte de los motores esta solamente entre 2 y 4 por ciento y la frecuencia resultante del rotor esta dentro de la franja de 1 a 3 Hz. Esto crea un problema que consiste en que la

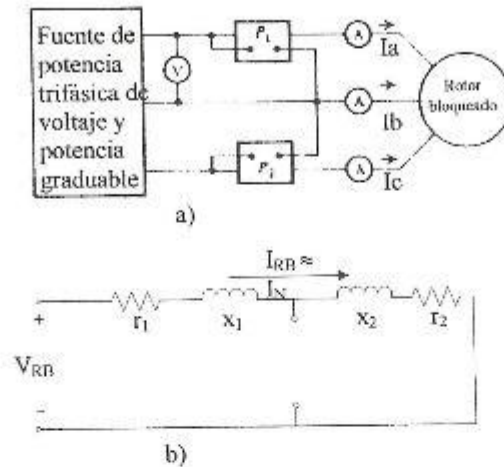


Figura A.2. Ensayo de rotor bloqueado de un motor de inducción.
 a) Circuito de ensayo. b) Circuito y corriente del motor

frecuencia de la línea no representa las condiciones de funcionamiento normales del rotor. Para el diseño de los motores clase B y C, la resistencia efectiva es función directa de la frecuencia, una solución típica es usar una frecuencia de un 25 por ciento o menos de la frecuencia nominal. Para motores de diseño clase A y D como la resistencia es esencialmente constante el método es aceptable.

Procedimiento a seguir ya con los valores obtenidos, para el cálculo de r_2 , x_1 y x_2 :
 El factor de potencia y el ángulo de impedancia del rotor bloqueado se encuentra mediante:

$$fp = \cos(\phi) = \frac{P_{out}}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L} \quad (A.3)$$

$$\phi = \cos^{-1}(fp) \quad (A.4)$$

La magnitud de la impedancia total en el circuito del motor es:

$$|Z| = \frac{V_t}{I_L} = \frac{V_t}{\sqrt{3} \cdot I_L} \quad (\text{A.5})$$

$$\dot{Z} = R_{eq} + j \cdot X'_{eq} = |Z| \cdot \cos(\phi) + j \cdot |Z| \cdot \sin(\phi) \quad (\text{A.6})$$

La resistencia del rotor bloqueado R_{eq} es igual a:

$$R_{eq} = r_1 + r_2 \quad (\text{A.7})$$

Despejando r_2 :

$$r_2 = R_{eq} - r_1 \quad (\text{A.8})$$

Mientras que la reactancia del rotor bloqueado X'_{eq} es igual a:

$$X'_{eq} = x'_1 + x'_2 \quad (\text{A.9})$$

En donde x'_1 y x'_2 son las reactancias del estator y del rotor a la frecuencia del ensayo, respectivamente. Como la reactancia es directamente proporcional a la frecuencia, la reactancia total equivalente a la frecuencia de funcionamiento normal puede encontrarse mediante:

$$X_{eq} = \frac{f_{normal}}{f_{ensayo}} \cdot X'_{eq} = x_1 + x_2 \quad (\text{A.10})$$

La forma de hallar las reactancias por separado es mediante una proporcionalidad que hay entre ellas dependiendo del diseño a que pertenezca, que aparece en la tabla siguiente.

Diseño del Rotor	X_1 y X_2 como funciones de X_{LR}	
	X_1	X_2
Rotor bobinado	$0.5 \cdot X_{LR}$	$0.5 \cdot X_{LR}$
Diseño A	$0.5 \cdot X_{LR}$	$0.5 \cdot X_{LR}$
Diseño B	$0.4 \cdot X_{LR}$	$0.6 \cdot X_{LR}$
Diseño C	$0.3 \cdot X_{LR}$	$0.7 \cdot X_{LR}$
Diseño D	$0.5 \cdot X_{LR}$	$0.5 \cdot X_{LR}$

Tabla I. Reglas empíricas para dividir el circuito de reactancia del rotor y del estator.

A.1.3. Ensayo en vacío

El ensayo en vacío de un motor de inducción mide las pérdidas rotacionales del motor y proporciona información sobre su corriente de magnetización, \bar{I}_m . La única carga en el motor es la fricción y las pérdidas por ventilación, P_{roce} , por tanto, toda la potencia mecánica de este motor la absorben las pérdidas mecánicas, en estas condiciones la corriente que absorbe la máquina es muy pequeña, y el deslizamiento también es pequeño. En condiciones de vacío, la potencia de entrada debe ser igual a las pérdidas en el motor, es decir, igual a las pérdidas por fricción y ventilación más las pérdidas en el hierro (P_{mag} , llamadas también pérdidas magnéticas) más pérdidas en el devanado del estator y del rotor (P_{est} y P_{rot} , respectivamente). Las pérdidas en el cobre del rotor se desprecian, porque la corriente

\bar{I}_2 es extremadamente pequeña (por razón de la gran resistencia de carga $r_2 \cdot (1-s)/s$). Entonces, la potencia de entrada debe ser igual a:

$$P_{ent} = P_{est} + P_{mag} + P_{roce} = P_{ent} + P_{rot} \quad (\text{A.11})$$

$$P_{rot} = P_{mag} + P_{roce} \quad (\text{A.12})$$

$$P_{est} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \quad (\text{A.13})$$

Para calcular las pérdidas magnéticas se traza una curva, potencia versus tensión. Se obtiene graduando la tensión desde cero hasta alcanzar la tensión nominal, V_N , anotando varias tensiones para construir la gráfica. Los valores de potencia empiezan a resaltar a partir de ciertos valores pequeños de tensión, por ende, los valores cercanos a cero no son visibles, entonces, luego de trazar la curva se extrapola para conocer el valor de la potencia cuando la tensión es cero, que vendrían siendo las pérdidas por roce. Ya al conocer las pérdidas de roce el resto sería las pérdidas magnéticas y las pérdidas eléctricas (pérdidas en el cobre del estator). Despejando las pérdidas magnéticas se calcula la rama shunt, así que r_c y x_m queda:

$$r_c = \frac{V_N^2}{\frac{P_{mag}}{3}} \quad (\text{A.14})$$

$$x_m = \frac{V_N}{I_m} = \frac{V_N}{\sqrt{I_1^2 - \left(\frac{V_N}{r_c}\right)^2}} \quad (\text{A.15})$$

APENDICE B

B.1. DEMOSTRACIÓN I

Demostración que la potencia disipada en la resistencia de carga del circuito equivalente $r_2' \cdot \left(\frac{1-S}{S}\right)$ corresponde a un tercio de la potencia mecánica del motor.

Supóngase un motor funcionando con un deslizamiento S , tomará una potencia de la red para vencer la carga y la fricción (potencia mecánica), y el resto se disipa en calentar las tres fases del estator y las n fases del rotor. Por tanto, la potencia P_{out} de la ecuación B.1, que es:

$$P_{out} = n \cdot I_2'^2 \cdot r_2' + 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 + P_{me} \quad (B.1)$$

debe ser igual a la tomada por el circuito equivalente de una fase multiplicada por tres. Del circuito equivalente, entonces resulta que:

$$P_{out} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 + 3 \cdot I_L^2 \cdot r_2 + 3 \cdot I_L^2 \cdot r_2 \cdot \left(\frac{1-S}{S}\right) \quad (B.2)$$

Igualando las dos expresiones se tiene:

$$n \cdot I_2'^2 \cdot r_2' + 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 + P_{me} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 + 3 \cdot I_L^2 \cdot r_2 + 3 \cdot I_L^2 \cdot r_2 \cdot \left(\frac{1-S}{S}\right) \quad (B.3)$$

Para demostrar que $3 \cdot I_L^2 \cdot r_2 = n \cdot I_2'^2 \cdot r_2'$ basta observar que el circuito equivalente del motor mostrado en la figura B.1, es también el de un motor cuyo rotor hubiese

sido bloqueado y a cuyas barras se le añade imaginariamente en serie resistencias ficticias de valor $r_2 \cdot \left(\frac{1-S}{S}\right)$ y que bajo estas condiciones, las pérdidas por calentamiento del rotor son las mismas que bajo condiciones normales de funcionamiento de deslizamiento S .

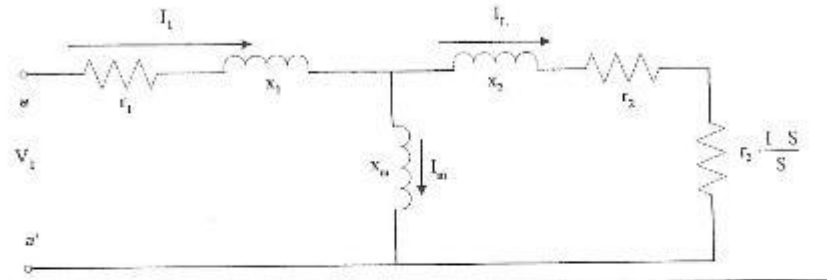


Figura B.1. Circuito equivalente por fase de un motor de inducción

Frénese el motor y añádase a cada barra en serie resistencias de valor $r_2 \cdot \left(\frac{1-S}{S}\right)$ supóngase que ahora se alimenta y se ajusta la tensión aplicada en modo que el flujo neto sea el mismo en valor, al que había en condiciones de funcionamiento, ya que si a un motor que esté funcionando a deslizamiento S y se le frena en la misma mancha indicada sin cambiar la tensión en bornes, entonces, I_1 no cambiará en magnitud ni en fase, ni se modificará B_r . Por tanto el motor frenado con resistencias adicionales, en lo que respecta a la tensión de entrada es equivalente al motor en funcionamiento normal tomando la misma I_1 al mismo ángulo y por ende la misma potencia. Bajo frenado, la posición (respecto a la inducción magnética resultante) de las bandas de corrientes rotóricas es la misma y de la misma magnitud, esto origina entonces, la misma caída de potencial magnético del estator, y que había antes para neutralizar el campo rotórico, y como además el B_r es el mismo, la deducción el circuito equivalente bajo frenado estará basada exactamente sobre los mismos elementos, de la misma magnitud y fase, y forzosamente, siguiendo el mismo procedimiento usado en el apéndice A habría que llegar al mismo circuito equivalente. Se puede decir que como consecuencia de lo anterior la I_2 en ambos casos, su valor eficaz y su f.p.

respecto a la f.e.m. que la impulsa es la misma, lo cual hace que en ambos casos, la posición de las bandas de corrientes rotóricas respecto a B , sea igual a la que posee con I_1 , y siendo que r_1 y x_1 no han variado, entonces V_1 que se obtiene de E_1 y de las caídas $r_1 \cdot \bar{I}_1$ y $j \cdot x_1 \cdot \bar{I}_1$, será del mismo valor. De todo esto se demuestra que:

$$3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 = n \cdot I_2^2 \cdot r_2' \quad (\text{B.4})$$

entonces por diferencia la ecuación B.3 se reduce a:

$$3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \left(\frac{1-S}{S} \right) = P_m \quad (\text{B.5})$$

B.2. DEMOSTRACIÓN II

Demostración que $K_1 = "a"$.

Siendo a la relación de tensiones inducidas primario-secundario bajo condiciones estacionaria de rotor.

Como se dijo en el Capítulo III, la ecuación 3.41 para $S = 1$ queda:

$$K_1 = \frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_{2SS}} \quad (\text{B.6})$$

y para cualquier condición la ecuación 3.38 queda:

$$K_2 = \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} \quad (\text{B.7})$$

Supongamos que el estator y el rotor estuviesen bobinados con devanados imbricados (por ser este el más usado).

Para $S = 1$:

$$E_1 = 4.44 \cdot \Phi_e \cdot K_{1\sigma} \cdot N_{1ph} \cdot f \quad (B.8)$$

$$E_{2SS} = 4.44 \cdot \Phi_e \cdot K_{2\sigma} \cdot N_{2ph} \cdot f_{2SS} \quad (B.9)$$

$$\frac{E_1}{E_{2SS}} = \frac{K_{1\sigma} \cdot N_{1ph}}{K_{2\sigma} \cdot N_{2ph}} \quad (B.10)$$

Bajo esas condiciones habrá corriente I_2 en el rotor e I_1 en el estator y los picos de las ondas espaciales de la *f.m.m.* producidas por una y otra corriente deben ser iguales. Estos picos son:

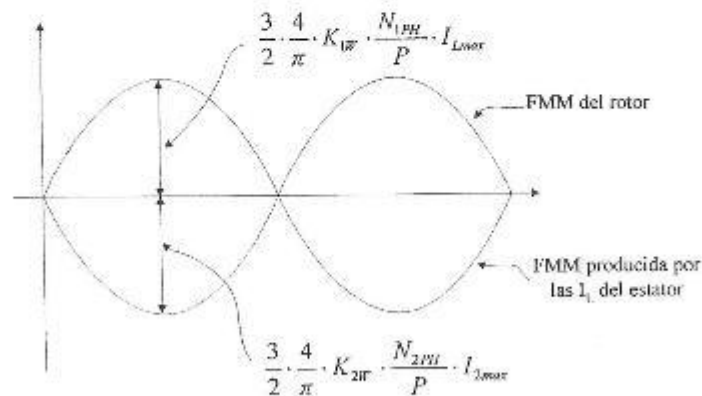


Figura B.2. Ondas de fuerzas magnetomotrices producidas por I_1 e I_2 .

Igualando los picos de las ondas de la figura B.2, y reduciendo queda:

$$K_{1w} \cdot N_{1pb} \cdot I_{1max} = K_{2w} \cdot N_{2pb} \cdot I_{2max} \quad (B.11)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{K_{2w} \cdot N_{2pb}}{K_{1w} \cdot N_{1pb}} \quad (B.12)$$

haciendo semejanza con la ecuación B.10 y la ecuación B.12, resulta la relación:

$$\frac{E_{1L}}{E_{2SS}} = \frac{I_2}{I_1} = a \quad (B.13)$$

Acoplando las ecuaciones 3.43, B.6, B.7 y B.13, llegamos a lo que se quiere demostrar:

$$K_1 = \frac{K_3}{K_2} = \frac{\frac{E_1}{I_2}}{\frac{E_{2SS}}{I_1}} = \frac{a}{\frac{1}{a}} = a^2 \quad (B.14)$$

APÉNDICE C

C.1. CLASIFICACIONES ESPECIALES DE MOTORES DE INDUCCIÓN

Para casos especiales en que se necesitan características especiales que no se encuentran en la clasificación NEMA, tenemos los siguientes tipos de motor:

C.1.1. Motores con rotor de jaula para mecanismos elevadores

En el servicio de los mecanismos elevadores, raras veces los motores funcionan durante largo tiempo a plena velocidad de rotación. No tiene por tanto, gran importancia que exista una elevada pérdida de velocidad (deslizamiento elevado). Debido a ello, es posible fabricar los motores con una capacidad de deslizamiento máximo mayor. De esta manera resulta un arranque elástico.

Para el servicio de los mecanismos elevadores, los motores con rotor de jaula se construyen con capacidad de entrega de torque de las clases KL 13h y KL 16h es decir, que el motor puede arrancar con seguridad venciendo un par resistente del 130% o del 160% del par nominal. La letra "h" indica que el curso de la característica del par motor se ha adaptado a las condiciones particulares del servicio de ésta clase de mecanismos.

Por ejemplo, con una duración de conexión del 40%, estos motores, en lo que afecta a la potencia, ofrecen un par de arranque doble o triple del normal y una intensidad de arranque aproximadamente cuatro o cinco veces mayor que la normal. En este caso, el par de arranque es el par máximo que puede presentarse en la gama comprendida entre el estado de reposo y la velocidad de rotación nominal.

C.1.2. Motores con rotor de jaula para accionamiento de prensas

Para accionar prensas con grados de inercia elevados, se utilizan frecuentemente motores provistos de rotores llamados de deslizamiento o de resistencia. Estos motores tienen una capacidad aproximadamente a sólo el 80% de la potencia nominal normal, y presentan un deslizamiento igual al doble de lo normal.

La clasificación del torque es, por ejemplo, KLI OS (rotor de deslizamiento). Los motores tienen un torque de arranque de 1,7 veces el torque nominal (aproximadamente) y absorben una intensidad inicial en el arranque que es igual a unas cuatro veces la intensidad nominal.

C.1.3. Motores de muy alto deslizamiento para unidades de bombeo de petróleo

El motor de muy alto deslizamiento está específicamente diseñado para impulsar unidades de bombeo de petróleo tipo balancín por varilla de succión.

Este es un motor asíncrono trifásico de rotor bobinado; sus características eléctricas y mecánicas son diseñadas para tener un óptimo comportamiento, libre de fallas, en el duro trabajo de los campos petroleros. Poseen características que los hacen superiores a los motores con diseño NEMA D y con deslizamientos nominales del 5 al 8%.

Considerando las características particulares, como el funcionamiento y la instalación a la intemperie en zonas polvorrientas, con lluvia y alta humedad relativa, etc., donde deben funcionar durante largo tiempo casi sin mantenimiento, estos motores se construyen completamente cerrados y con ventilación externa. La clase de protección de IP 45 o IP 55 y el aislamiento es de clase F.

Los motores de muy alto deslizamiento, comúnmente disponen de 9 terminales, lo que permite conectar el motor en cualquiera de las cuatro modalidades de torque:

alto, medio, medio-bajo y bajo; para una óptima utilización de la capacidad y para facilitar el esfuerzo operacional en la unidad de bombeo. Se fabrican con torques de arranque promedio 330, 230, 200 y 180% del nominal para sus modalidades de alto, medio, medio-bajo y bajo torque, respectivamente. Mientras que los motores convencionales se fabrican con torques promedio de 200% del nominal. Si en el motor convencional la demanda de torque excede este nivel, el motor arrancará y se frenará. Lo contrario sucede en el motor de muy alto deslizamiento, que, con el aumento de la demanda de torque disminuirá su velocidad a medida que la demanda de torque aumenta. Los motores de muy alto deslizamiento presentan, respecto a los del diseño NEMA D una enorme ventaja: la corriente de arranque es mucho más baja, aproximadamente la mitad, lo que significa caídas de tensión en los bornes del motor mucho menores, requisito sumamente importante para un arranque satisfactorio, pues el torque del motor, como ya se ha visto, varía en forma proporcional con el cuadrado de la tensión en los bornes.