

LIBRO DIGITAL DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN TRIFÁSICA

**JULIO CESAR PUERTA GOMEZ
JHONNATAN ALDEVIER ARIAS CADENA**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
PEREIRA
2013**

LIBRO DIGITAL DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN TRIFÁSICA

**JULIO CESAR PUERTA GOMEZ
JHONNATAN ALDEVIER ARIAS CADENA**

**PROYECTO DE GRADO
PARA OPTAR AL TÍTULO DE TECNÓLOGO EN ELECTRICIDAD**

**DIRECTOR
SANTIAGO GOMEZ ESTRADA
INGENIERO ELECTRICISTA**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
PEREIRA
2013**

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma director proyecto de grado

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

- A Dios, por permitirnos vivir una nueva experiencia, en la cual pudimos concretar este proyecto.
- El director de tesis, Ingeniero Santiago Gómez Estrada, por su paciencia e invaluable aporte al desarrollo de esta tesis, a través de comentarios y discusiones.
- A todos aquellos que nos alentaron para que este proyecto pudiera ejecutarse.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a nuestra familia, fuente de inspiración en los momentos de angustias, esmero, dedicación, aciertos, alegrías y tristezas que caracterizan el transitar por este camino que hoy vemos cumplido, sin cuyo empuje no hubiese sido posible.

JHONNATAN ALDEVIER ARIAS CADENA
JULIO CESAR PUERTA GOMEZ

CONTENIDO

Pág

1.	MODELOS PEDAGÓGICOS	16
1.1	PERSPECTIVAS Y MODELOS PEDAGÓGICOS	16
1.2	EL MODELO PEDAGÓGICO TRADICIONAL.....	17
1.3	EL MODELO PEDAGÓGICO ROMÁNTICO (experiencial o naturalista)..	19
1.4	EL MODELO PEDAGÓGICO CONDUCTISTA.....	20
1.5	EL MODELO PEDAGÓGICO SOCIAL-COGNITIVO	24
1.6	LA PERSPECTIVA PEDAGÓGICA COGNITIVA (constructivista).....	27
1.7	APLICACIÓN DEL CONSTRUCTIVISMO EN LA ENSEÑANZA DE LA TECNOLOGÍA.....	32
1.7.1	Características de la enseñanza a través de la tecnología.....	32
2.	MOTOR DE INDUCCION TRIFÁSICO	35
2.1	INTRODUCCIÓN	35
2.2	EL ROTOR (2)	37
2.2.1	Rotor de jaula de ardilla.....	37
2.2.2	Rotor bobinado o devanado	39
2.3	EL ESTATOR. (2)	41
2.4	MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS (2).....	43
3.	CONCEPTOS BÁSICOS	45
3.1	EL CAMPO MAGNÉTICO GIRATORIO.....	45
3.2	CONCEPTO DE DESLIZAMIENTO DEL ROTOR	47
3.3	FRECUENCIA ELÉCTRICA EN EL ROTOR	49
3.4	PÉRDIDAS Y DIAGRAMA DE FLUJO DE POTENCIA (4)	52
3.5	POTENCIA Y PAR (4)	54
3.5.1	Separación de las pérdidas en el cobre del rotor y la potencia convertida en el circuito equivalente	57
3.6	CURVA CARACTERÍSTICA	57
3.6.1	Comentarios sobre la curva par-velocidad de la Figura 22.....	58
3.7	PAR MÁXIMO (PAR DE DESVIACIÓN) (4).....	60
3.8	MOLEDAION DEL CIRCUITO EQUIVALENTE UTILIZANDO TEOREMA DE THEVENIN (4).....	63
3.9	CLASES (6)	66
3.9.1	Jaula de ardilla clase A.....	67
3.9.2	Jaula de ardilla clase B.....	68
3.9.3	Jaula de ardilla clase C.....	68

3.9.4	Jaula de ardilla clase D.....	68
3.9.5	Jaula de ardilla de clase F	69
3.10	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	69
3.10.1	Prueba de funcionamiento	70
3.10.2	Prueba CD.....	71
3.10.3	Prueba de saturación en vacío	72
3.10.4	Prueba a rotor bloqueado.....	75
3.10.5	Pruebas sintéticas a motores de inducción	77
3.11	MÁQUINA DE INDUCCIÓN COMO GENERADOR (7)	78
3.12	FORMAS DE ARRANQUE (7)	80
3.12.1	Arranque a tensión reducida con resistor o reactor primarios	80
3.12.2	Arranque a tensión reducida con auto transformador	81
3.12.3	Arranque en estrella – delta	81
3.13	CARACTERÍSTICAS NOMINALES Y CONEXIONES (2).....	82
4.	EJERCICIOS RESUELTOS Y PROBLEMAS PLANTEADOS	86
4.1	EJERCICIOS RESUELTOS.....	86
4.2	PROBLEMAS PLANTEADOS,.....	99
5.	MANEJO LIBRO DIGITAL	103
5.1	DESCRIPCIÓN DEL LIBRO DIGITAL	103
5.1.1	Según los contenidos	103
5.1.2	Según los destinatarios	103
5.1.3	Según su estructura.....	103
5.1.4	Según su base de datos	103
5.1.5	Según los medios que integra	103
5.1.6	Según los objetivos educativos que pretende facilitar	103
5.1.7	Según las actividades cognitivas que activa.....	104
5.1.8	Según su comportamiento.....	104
5.1.9	Según su diseño.....	104
5.2	REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DEL EQUIPO	104
5.2.1	Hardware	104
5.2.2	Software	104
5.3	MODO DE EMPLEO	104
6.	CONCLUSIONES	109
7.	BIBLIOGRAFIA.....	110

LISTA DE FIGURAS

Pág

Figura 1 Dibujo de un motor de Inducción	35
Figura 2 Tipos de máquinas y la transformación de energía	36
Figura 3 Componentes del motor de inducción.....	37
Figura 4 Rotor jaula de ardilla	38
Figura 5 Rotor de doble jaula y ranuras profundas	38
Figura 6 Corte del motor de inducción con rotor jaula de ardilla	39
Figura 7 Rotor bobinado y su esquema eléctrico.....	40
Figura 8 Corte del motor de inducción de un estator	41
Figura 9 Bobinas de paso diametral	42
Figura 10 Devanados de un motor de inducción.....	43
Figura 11 Máquinas eléctricas rotativas (Motor y Generador)	43
Figura 12 Partes constituyentes máquinas eléctricas	44
Figura 13 Efectos estator y rotor (Motor y Generador)	44
Figura 14 Motor de 4 polos	46
Figura 15 Concepto deslizamiento.....	48
Figura 16 Circuito Equivalente de un transformador por fase que representa la operación de un motor de inducción	50
Figura 17 Circuito equivalente final por fase de un motor de inducción.....	51
Figura 18 Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción	52
Figura 19 Circuito equivalente del motor de inducción	54
Figura 20 Circuito equivalente por fase con las pérdidas en el rotor y las pérdidas en el cobre separadas	57
Figura 21 Curva característica Par vs. Velocidad, Deslizamiento y Corriente	58
Figura 22 Curva característica Par vs. Velocidad típica.....	59
Figura 23 Curva de característica Par vs. Velocidad (región de frenado y región de generador).	60
Figura 24 Curva Par Inducido y Potencia vs. Velocidad Mecánica	61
Figura 25 Curva Par Inducido vs. Velocidad (variando resistencia del rotor	63
Figura 26 Circuito equivalente por fase de un motor de inducción.	63
Figura 27 Tensión equivalente de Thevenin en el circuito de entrada de un motor de inducción.....	64
Figura 28 Impedancia equivalente de Thevenin en el circuito de entrada	65
Figura 29 Circuito equivalente simplificado.....	65
Figura 30 Circuito para al montaje de la prueba DC.	72
Figura 31 Circuito para al montaje de la prueba en vacio.	73
Figura 32 Circuito equivalente de la prueba en vacio	73
Figura 33 Si se dice que $R_{21} - SS >> 0, I = 0$	74
Figura 34 Si $R_{21} - SS << 0, V_{1/I} = X_1 + X_m$; el circuito queda:	75
Figura 35 Diagrama montaje prueba rotor bloqueado	76

Figura 36 Circuito equivalente de la prueba de rotor bloqueado.....	76
Figura 37 Esquema de un motor de inducción utilizado como generador	79
Figura 38 Máquina de inducción trifásica.....	82
Figura 39 Placa de características de un motor de inducción estándar.....	83
Figura 40 Placa de conexiones de un motor de inducción	84
Figura 41 Imagen de una conexión estrella	84
Figura 42 Circuito equivalente por fase del motor de inducción.....	98
Figura 43 Placa con caracterizas nominales de un motor de inducción.....	102
Figura 44 Página de menú.....	105
Figura 45 Primeros enlaces	105
Figura 46 Página principal	106
Figura 47 Campo #1	107
Figura 48 Campo #2	107
Figura 49 Otros botones	108

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1 Valores correspondientes para el número de polos	49
Tabla 2 Características de los motores comerciales de inducción de jaula de ardilla de acuerdo con la clasificación en letras NEMA.	69

FORMULACION DEL PROBLEMA

Para la mayoría de los estudiantes, las fuentes bibliográficas deben tener una característica fundamental: aportar conceptos nuevos. En el entorno multimedia es quizás más necesario, pues las diferentes aplicaciones se van modificando a medida que se conocen los resultados de otras investigaciones. La mejor manera de fomentar el conocimiento es poniéndolo a disposición de todos, y para ello Internet se ha convertido en la herramienta perfecta.

Las tecnologías de la información y la comunicación agrupan los elementos y las técnicas utilizadas en el tratamiento y la transmisión de las informaciones, principalmente de informática, internet y telecomunicaciones. Por extensión, designan el sector de actividad económica.

El uso de las tecnologías de información y comunicación entre los habitantes de una población, ayuda a disminuir la brecha digital existente, ya que aumentaría el conglomerado de usuarios que utilizan las TIC (tecnologías de la información y comunicación), como medio tecnológico para el desarrollo de sus actividades y por ende se reduce el conjunto de personas que no las utilizan.

Por lo tanto, el objetivo del proyecto es crear un libro digital para que los estudiantes puedan investigar y aprender sobre las máquinas de inducción trifásicas, El proyecto propone talleres para solución de inquietudes y explicaciones claras sobre el funcionamiento de las máquinas de inducción trifásicas. Además estas van acompañadas de imágenes y animaciones que ilustran sus partes funcionamiento.

JUSTIFICACION

Es importante contar con interesantes fuentes de información multimedia porque de esta forma se dispone de un punto de partida para precisar cómo afecta la educación cuando se utilizan los conceptos multimedia y cómo incide en los proyectos y las empresas de servicios.

El salto más cualitativo en el mundo de la educación se produce como consecuencia de la llegada de las nuevas tecnologías y la configuración de una sociedad basada en la información. Ya no se trata de ofrecer tan solo datos, de mostrar las cosas tal y como sucedieron, sino de aportar otros aspectos, de contrastarlos con otras personas y de intercambiar opiniones en apenas unos segundos. La educación, lo mismo que la comunicación, terminará por ser en tiempo real, aunque siempre quede la figura del profesor, como aquella persona que nos ayuda a valorar e interpretar las diferentes opiniones que podemos reunir sobre una idea.

Esta última década del siglo ha vivido cambios importantes en la enseñanza. Se ha pasado de métodos clásicos, aplicados desde los griegos y romanos, que siguen teniendo como valor fundamental la presencia y el contacto directo del alumno con el profesor, a una enseñanza activa en la que la separación y el alejamiento no significa que estén más aislados; al contrario, las nuevas tecnologías ofrecen la posibilidad de intercambiar de manera personal cada una de las dudas que se vayan planteando. No se trata de defender las nuevas tecnologías y defenestrar un sistema que ha permitido que la ciencia llegue a cotas impensables hace varios siglos. A la postre se implantará un sistema combinado que recoja lo mejor de la vieja tradición educativa y los logros que se vayan obteniendo de la enseñanza a distancia con el ordenador como protagonista.

La mayoría está de acuerdo en que las posibilidades de conseguir más información va a favorecer el estudio y la investigación, el hecho de que haya más no asegura el éxito, pues es muy difícil separar lo bueno de lo que no sirve.

Libros electrónicos que se recargan una vez leídos; muchas obras clásicas dentro del mismo soporte; enciclopedias en CD-ROM para consultar y preparar trabajos; ordenadores con multitud de funciones; cadenas de televisión que ofrecen canales educativos; videoconferencias para intercambiar información en escasos segundos; realidad virtual para comprender procesos que antes resultaban demasiado complicados, e Internet para acceder a multitud de informaciones. Todos estos elementos emplean técnicas multimedia, lo que aporta una serie de ventajas tanto para el profesional de la educación como para el alumno, porque ahora ambos están implicados en las nuevas tecnologías

Por ende el trabajo que se pretende realizar tiene el objetivo de ayudar a solucionar el problema de falta de información digital en el programa de tecnología eléctrica acerca de las máquinas de inducción trifásicas, Adicionalmente la pedagogía que se utilizará tiene como finalidad el beneficio de los estudiantes, ya que se pretende utilizar parámetros que ayuden al proceso cognoscitivo en el estudio de estas máquinas, para que los estudiantes se beneficien y logren un mayor nivel en el conocimiento de estas máquinas.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo de investigación propone un libro digital sobre máquinas de inducción trifásicas con fines didácticos. Busca mejorar la enseñanza y el aprendizaje en la asignatura de máquinas eléctricas en la escuela de tecnología eléctrica de la UTP, dado que en ella predomina un modelo de enseñanza tradicional. El programa fue concebido dentro del enfoque pedagógico constructivista y por ello propone una activa participación de los estudiantes. Elaborado a partir de la herramienta de diseño Macromedia flash, combina aplicaciones de, Dreamweaver, Microsoft PowerPoint, cuyos resultados son imágenes digitales, fotografías, esquemas, ecuaciones, conceptos, gráficos y ejercicios que posibilitan el aprendizaje significativo. El proyecto consta de un texto y un libro digital, en formato de CD. El libro digital se divide en cinco capítulos: modelos pedagógicos, motores de inducción trifásico, conceptos básicos, manejo del libro digital y un apartado de ejercicios planteados y resueltos además de una base de datos que contiene direcciones web, las cuales permiten profundizar en los temas mencionados. El presente informe compilado en un CD digital.

En el primer capítulo denominado modelos pedagógicos, se enuncian diferentes temas en cuanto a sistemas de enseñanza; entre los cuales se tiene el modelo tradicional, romántico, conductista, social-cognitivo y aplicaciones. En el segundo capítulo se enuncian el motor de inducción como: definición, el rotor jaula de ardilla, rotor bobinado y el estator. En el tercer capítulo se enuncian los conceptos básicos como: campo magnético giratorio, deslizamiento del rotor, frecuencia eléctrica del rotor, pérdidas y diagrama de flujo de potencia, el par, curvas características, circuito equivalente, clases de motores, pruebas de funcionamiento y máquina de inducción como generador. El cuarto capítulo se encuentra una serie de ejercicio planteados y resueltos acerca del tema. El quinto capítulo denominado manejo del libro digital, el cual enseña como instalar el CD digital, su manejo, sus funciones y aplicaciones.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Construir un libro digital sobre la máquina de inducción trifásica

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recolectar de fuentes confiables la teoría correspondiente a la máquina de inducción trifásica.
- A partir de la información recolectada dar explicaciones sobre las máquinas de inducción.
- Proponer talleres y ejercicios.
- Implementar el libro digital con los paquetes computacionales Dreamweaver y Flash.

1. MODELOS PEDAGÓGICOS

1.1 PERSPECTIVAS Y MODELOS PEDAGÓGICOS

Un modelo es una herramienta conceptual para entender mejor un evento; es la representación del conjunto de relaciones que describen un fenómeno. Un modelo pedagógico es la representación de las relaciones que predominan en el acto de enseñar; es también un paradigma que puede coexistir con otros y que sirve para organizar la búsqueda de nuevos conocimientos en el campo de la pedagogía.

Toda teoría pedagógica trata de responder de manera sistemática y coherente al menos estas preguntas: ¿Qué tipo de ser humano se quiere formar?, ¿Con qué experiencias crece y se desarrolla un ser humano?, ¿quién debe impulsar el proceso educativo?, ¿Con qué métodos y técnicas puede alcanzarse mayor eficacia? Diferentes especialistas podrían responder una sola de estas preguntas, pero la especialidad del pedagogo es abordarlas todas de forma transdisciplinaria.

Aunque en el fondo siempre se encuentra la formación como concepto clave y unificador de toda pedagogía, a continuación se proponen cinco criterios de elegibilidad que permiten distinguir una teoría pedagógica, de otra que no lo es:

- a. Definir el concepto de ser humano que se pretende formar, o la meta esencial de formación humana.
- b. Caracterizar el proceso de formación del ser humano, en el desarrollo de las dimensiones constitutivas de la formación, en su dinámica y secuencia.
- c. Describir el tipo de experiencias educativas que se privilegian para afianzar el impulsar el proceso de desarrollo, incluyendo los contenidos curriculares.
- d. Describir las regulaciones que permiten cualificar las interacciones entre el educando y el educador en la perspectiva del logro de las metas de formación.
- e. Describir y prescribir métodos y técnicas de enseñanza que pueden utilizarse en la práctica educativa como modelos de acción eficaces.

Toda teoría pedagógica desarrolla estos cinco parámetros o criterios de elegibilidad de manera coherente y sistemática, como respuesta a las cinco preguntas esenciales que se han formulado los pedagogos de todos los tiempos: ¿En qué sentido se humaniza un individuo?, ¿Cómo se desarrolla este proceso de humanización?, ¿Con qué experiencias?, ¿Con qué técnicas y métodos?, y ¿Cómo se regula la interacción maestro-alumno? Comprendido esto se está en capacidad de distinguir una teoría pedagógica de una psicología, sociología, lingüística, o de la comunicación; aunque estas últimas se ocupan en ocasiones de fenómenos educativos o de aprendizaje, ello no las hace pedagógicas, pues la

esencia del hecho educativo es la interacción simultánea de los cinco parámetros citados.

Los modelos que representan las perspectivas teóricas de mayor difusión e importancia contemporánea (FLOREZ, 1995) y las formas y técnicas de evaluación educativa que de ellas se derivan y se actualizan a continuación.

1.2 EL MODELO PEDAGÓGICO TRADICIONAL

En su forma más clásica, este modelo enfatiza en la formación del carácter de los estudiantes para moldear, a través de la voluntad, la virtud y el rigor de la disciplina, el ideal humanístico y ético. Recoge la tradición metafísico-religiosa medieval. En este modelo el método y el contenido de la enseñanza en cierta forma se confunden con el buen ejemplo del ideal propuesto como patrón, cuya encarnación más próxima se manifiesta en el maestro. Se preconiza el cultivo de las facultades del alma: entendimiento, memoria y voluntad y una visión indiferenciada e ingenua de la transferencia del dominio logrado en disciplinas clásicas como el latín o las matemáticas.

El método básico de aprendizaje es el academicista, verbalista, que dicta sus clases bajo un régimen de disciplina con unos estudiantes que son básicamente receptores. La ilustración ejemplar de este método es la forma como los niños aprenden la lengua materna: oyendo, observando y repitiendo muchas veces. Es así como el niño adquiere la herencia cultural de la sociedad, representada en el maestro como la autoridad.

En la primera mitad del siglo XX el enfoque transmisionista tradicional predominó en las escuelas luego de superar el ilusorio concepto de disciplina formal que prometía una facultad intelectual general, única y homogénea para pensar y resolver cualquier problema. Desde la segunda mitad del siglo XX se abrió a la enseñanza convencional de los conceptos y estructuras básicas de las diferentes disciplinas como una manera de integrar la nueva generación a la cultura de la sociedad moderna, y de asegurar la continuidad de la herencia de la civilización occidental. La materia de estudio en esta perspectiva abarca no sólo información y conceptos básicos de la ciencia y la cultura sino también valores básicos de convivencia para la socialización de los niños y su preparación para el trabajo. La escuela básica primaria obligatoria se centró en la transmisión de las habilidades o competencias básicas mínimas de comunicación y cálculo, para que los alumnos aprendieran a defenderse en la vida social.

El énfasis de la enseñanza transmisionista en contenidos de las ciencias, ya producidos, se ha visto fortalecido en las últimas décadas por la activa participación de profesores y especialistas universitarias en la definición y ejecución de planes de enseñanza y de currículos más científicos, centrados en la

exposición magistral de conocimientos específicos más actuales que permiten preparar a los jóvenes en los avances científico-técnicos, sobretodo en la enseñanza de ciencias naturales y matemáticas.

Max Beberían mostró en la década de los años 50 que ingenieros y matemáticos podían enseñar con éxito teoría de conjuntos en la escuela de secundaria de la universidad de Illions. Y J. Zacharias, en la misma época, con un grupo de físicos del Mit y de Harvard hizo ensayos parecidos en otros colegios de secundaria, en temas de física que permitieran a Estados Unidos recuperar la delantera de la educación científica de la juventud, que habían perdido con el lanzamiento del Sputnik al espacio por parte de la Unión Soviética (ATKIN y HOUSE, 1981). Naturalmente, la enseñanza de las ciencias por parte de ingenieros, físicos y matemáticos se centraba en contenidos ya elaborados, y su misión era transmitirlos de la manera más fiel y actualizada posible, para contrarrestar los, según ellos, deficientes maestros egresados de las facultades de educación que enseñaban ciencias sin dominarlas suficientemente. Por supuesto, los pedagogos más avanzados criticaron a los universitarios transmisionistas por no saber ni preocuparse por el cómo del aprendizaje y se inició la polémica acerca de quién debería enseñar, si los científicos o los pedagogos.

Hay que destacar que en la enseñanza transmisionista tradicional la evaluación de los alumnos es un procedimiento que se utiliza casi siempre al final de la unidad o del periodo lectivo para detectar si el aprendizaje se produjo y decidir si el alumno repite el curso o es promovido al siguiente. Se trata de una evaluación final o sumativa, externa a la enseñanza misma y que permite verificar el aprendizaje de los alumnos de manera cualitativa, simplemente comprobando si el alumno aprendió o no el conocimiento transmitido; o de manera cuantitativa asignándole algún numeral o porcentaje al aprendizaje que el alumno muestra en relación con el promedio del grupo al que pertenece (evaluación según norma) o en relación con la precisión del logro del objetivo de aprendizaje esperado o enseñado (evaluación según criterio).

En la enseñanza tradicional los profesores también hacen preguntas evaluativas espontáneas durante el desarrollo de la clase, para chequear no sólo la atención de los estudiantes a la lección correspondiente, sino el grado de comprensión a las explicaciones que el profesor está desarrollando en la clase. Éste tipo de evaluación diagnóstica permite además saber si el alumno está preparado para entender el tema siguiente, a fin de prevenir, corregir y ajustar la clase, y ofrecer actividades remediales.

Por otra parte en la enseñanza tradicional la evaluación es reproductora de conocimientos, clasificaciones, explicaciones y argumentos previamente estudiadas por el alumno en notas de clase o textos prefijados, sin que ello signifique repetición memorísticas, pues también se evalúan en esta perspectiva tradicional niveles y habilidades de comprensión, análisis, síntesis y valoración de

lo estudiado, ya sea en pruebas orales o en pruebas escritas de preguntas abiertas. Las preguntas escritas pueden ser también cerradas o de una respuesta precisa, tipo test, llamadas también preguntas objetivas y pueden redactarse de diferentes formas según requieran del estudiante información o comprensión y reflexión sobre el tema objeto del examen. Pueden ser de la forma de respuesta corta, de ordenación, de selección múltiple, de escogencia de la mejor respuesta, de interpretación de un texto o situación, o de solución de problemas siguiendo cierta pauta o algoritmo. Pero estas pruebas objetivas, aplicadas al final de una enseñanza tradicional, tiene la dificultad de que no encajen ni corresponden a una enseñanza verbalista, ambigua y espontánea que caracteriza a la pedagogía tradicional.

Hay que aclarar que en esta perspectiva pedagógica, la responsabilidad principal del aprendizaje se carga sobre el alumno, de su esfuerzo depende su aprendizaje, de ahí que es al alumno al que hay que evaluar y no al maestro. Con frecuencia, en este modelo tradicional de enseñanza, los alumnos aprenden no por mérito de su profesor, sino, a veces, a pesar del profesor.

El texto escolar, guía obligatoria de la materia, despliega los contenidos necesarios para el desarrollo de la materia, a la manera de una exposición magistral; es generalmente ordenado, sólido, con ilustraciones y ejemplos didácticos, e incluso aplicaciones y ejercicios recomendados a los alumnos.

Se trata de una exposición convencional completa y lineal de la temática de la materia, de los conocimientos básicos ya producidos y definidos, que sólo esperan ser asimilados por el alumno gracias a una presentación clara, diagramada y que sigue el orden y secuencia de la disciplina.

El currículo en este modelo pedagógico es un plan general de contenidos, no operacionalizados ni objetivados, que permite márgenes tan grandes de interpretación al profesor en su ejecución, que mientras no se salga del marco general ni de su papel de organizador tradicional dentro del aula, puede generar brechas considerables entre el currículo oficial y el real, sin que las instituciones sepan ni se preocupen, pues en ellas muchos de sus supuestos teóricos son implícitos, o permanecen inscritos como declaraciones formales, abstractas y generales.

1.3 EL MODELO PEDAGÓGICO ROMÁNTICO (experiencial o naturalista)

Este modelo pedagógico sostiene que el contenido más importante del desarrollo del niño es lo que procede de su interior y, por consiguiente, el centro, el eje de la educación es el interior del niño. El ambiente pedagógico debe ser muy flexible para que el niño despliegue su interioridad, sus cualidades y sus habilidades naturales en maduración y se proteja de lo inhibitorio y nada auténtico que proviene

del exterior cuando se le inculcan o transmiten conocimientos que pueden violar su espontaneidad. El desarrollo natural del niño se convierte en la meta y a la vez en el método de la educación.

El maestro debe liberarse, él mismo, de los fetiches del alfabeto, de las tablas de multiplicar y de la disciplina y ser sólo un auxiliar o un amigo de la expresión libre, original y espontánea de los niños.

El ideólogo de este modelo es Jean Jacques Rousseau, y en el siglo XX se destacaron Llich y A.S. Neil, el pedagogo de Summerhill.

A diferencia del modelo tradicional, en este enfoque no interesa el contenido del aprendizaje ni el tipo de saber enseñado, pues lo que cuenta es el desenvolvimiento espontáneo del niño en su experiencia natural con el mundo que lo rodea, bajo la metáfora biológica de la semilla que lleva adentro sus potencialidades para crecer y desarrollarse hasta convertirse en adulto. Sus experiencias vitales espontáneas, por oposición al cultivo de la razón y de la libertad racional ilustrada, tienen valor intrínseco, no son un medio ni un instrumento para lograr ningún objetivo, ni ninguna meta educativa o etapa de desarrollo; la experiencia del niño es por sí misma valiosa, no necesita ponerse a prueba, no remite a nada fuera de sí misma, no necesita confirmarse, ni refutarse, ni evaluarse, ni controlarse, pues no tiene pretensión de verdad. Su verdad es su autenticidad misma.

En ello consiste precisamente el puerocentrismo que caracteriza y da el nombre a esta perspectiva, en la no interferencia de los adultos que la dictan, enseñan, programan, disciplinan, imponen y evalúan, contaminando la experiencia pristina y original de la vida natural del niño en desarrollo, que no requiere en absoluto ser condicionado por los maestros, sino respetado en su sensibilidad, en su curiosidad exploratoria, en su creatividad y comunicabilidad natural, y cuando lo solicite, apoyado. En este modelo pedagógico el centro de la educación es sólo el niño.

1.4 EL MODELO PEDAGÓGICO CONDUCTISTA

Este modelo se desarrolló paralelamente con la creciente racionalización y planeación económica de los recursos en la fase superior del capitalismo, bajo la mira del moldeamiento meticuloso de la conducta productiva de los individuos. El método es en esencia, el de la fijación y control de los objetivos instruccionales formulados con precisión y reforzados en forma minuciosa. Adquirir conocimientos, códigos impersonales, destrezas y competencias bajo la forma de conductas observables, es equivalente al desarrollo intelectual de los niños. Se trata de una transmisión parcelada de saberes técnicos mediante un adiestramiento experimental que utiliza la tecnología educativa. El más destacado promotor y exponente de este modelo es Burrhus Frederic Skinner.

Aunque esta perspectiva pedagógica conserva la importancia de transmitir el contenido científico-técnico a los aprendices como objeto de la enseñanza, según lo pregona el modelo tradicional, no obstante, los conductistas enfatizan también en la necesidad de atender las formas de adquisición y las condiciones del aprendizaje de los estudiantes (GAGNE, 1971). Es decir, los educadores para ser eficientes deberán traducir los contenidos en términos de los que los estudiantes sean capaces de hacer, de las conductas que tengan que exhibir como evidencia de que afectivamente el aprendizaje se produjo. En el fondo se trata de un camino pedagógico para tecnificar y volver más eficiente y objetiva la enseñanza transmisionista tradicional; para ello, lo primero que tiene que lograr el educador es expresar con precisión lo que espera que el estudiante aprenda en términos de comportamiento observable, de modo que mientras no domine el aprendizaje previo, no pueda continuar en el curso. Fue Mager, R (1962) quien diseñó un procedimiento sencillo redactado con tres elementos básicos, para que los maestros aprendieran a formular objetivos específicos de instrucción:

- Descripción del comportamiento que el estudiante adquirirá o exhibirá.
- Definición de las condiciones de tiempo, de espacio, de elementos interventores, de restricciones, etc., bajo las cuales el comportamiento ocurrirá. Esto hace observable el objetivo.
- Evaluación y verificación del criterio de desempeño aceptable.

De hecho, todos los manuales que enseñan a planificar la instrucción recomiendan empezar por definir los objetivos específicos que aseguren con exactitud lo que los alumnos pueden lograr en el entrenamiento y la manera de verificarlos en forma práctica bajo ciertas condiciones y dentro de cierto y margen de error preestablecido. Tan importante es eliminar la vaguedad del objetivo de aprendizaje buscado que Mager llegó, incluso, a indicar los verbos que no expresan con precisión la intención del educador (saber, entender, comprender, apreciar, captar, creer) porque se prestan a diversas interpretaciones, mientras otros verbos describen mejor la conducta que se espera del aprendiz: escribir, identificar, resolver, construir, enumerar, comparar, etcétera.

Un curso y todo el currículo conductista no es más que un conjunto de objetivos terminales expresados en forma observable y medible, a los que el estudiante tendrá que llegar desde cierto punto de partida o conducta de entrada, mediante el impulso de ciertas actividades, medios, estímulos y refuerzos secuenciados y meticulosamente programados; se comprende entonces que la enseñanza conductista sea un proceso de evaluación y control permanente, arraigado en la esencia de lo que es un objetivo instruccional.

En la perspectiva conductista, definido el programa instruccional, evaluar no es diferente a enseñar, pues suprimida la subjetividad aleatoria y sesgada del maestro en los objetivos específicos, su función se reduce a verificar el programa,

a constituirse en un controlador que refuerza la conducta esperada y autoriza el paso siguiente a la nueva conducta o aprendizaje previsto, y así sucesivamente. Los objetivos instruccionales son los que guían la enseñanza, son ellos lo que indican lo que debe hacer el aprendiz, por esto a los profesores le corresponde sólo el papel de evaluadores, de controladores de calidad, de administradores de los refuerzos.

El refuerzo es precisamente el paso que afianza, asegura y garantiza el aprendizaje. Dado un estímulo (o un problema) y presentado un modelo de respuesta adecuado, el estudiante debe recibir del profesor la aceptación, el premio (o la nota), es decir, el refuerzo, cuando logre reproducir la solución correcta o la respuesta modelada para problemas similares, bajo las condiciones observables y medibles previstas en el objetivo instruccional. El refuerzo es el autorregulador, el retroalimentador del aprendizaje que permite saber a los estudiantes si acertaron o no, si lograron la competencia y el dominio del objetivo con la calidad que se esperaba. Mientras el refuerzo no ocurra, los estudiantes tendrán que ocuparse de observar, informarse y reparar en los elementos que contiene el objetivo instruccional, que es precisamente la respuesta moldeada que tienen que ensayar, practicar y ajustar hasta lograr producirla con la perfección prevista; y es el profesor quien la acepta y la refuerza.

En este sentido, la evaluación hace parte esencial de la enseñanza conductista, en cuanto el profesor refuerza y define el aprendizaje. Pero el mismo profesor no es tan imprescindible. Su papel puede ser objetivado en los materiales de instrucción, de forma que sean los mismos materiales escritos los que guíen la organización, dirección y la enseñanza del alumno, de manera que el desarrollo total del curso ocurra sin la intervención directa del profesor, pues el refuerzo podría programarse y otorgarse por escrito; desmenuzando las actividades del alumno en tareas más sencillas, graduando los niveles de dificultad, enseñando una sola destreza por tarea y asegurando pautas, correcciones y retroalimentaciones después de cada logro. Los materiales de autoinstrucción pueden programarse para que sustituyan al profesor, sobre todo ahora, con la disponibilidad del computador personal.

En la autoinstrucción, la evaluación y el refuerzo retroalimentador siguen siendo definitivos. Los exámenes de unidad y de curso tendrán que reflejar lo estudiado, sin discriminar que sean pruebas verbales o de ejecución práctica, pues todas han de ser objetivas y de respuesta precisa. Una buena instrucción conductista requiere prever y diseñar por anticipado los instrumentos de evaluación.

Si los maestros encuentran dificultades para lograr una acertada rigurosa aplicación de los principios de aprendizaje con enfoque conductista al aula de clase, en cursos técnicos o de entrenamientos en destrezas específicas (dominio de movimientos deportivos, manejo de máquinas y de herramientas, aprendizaje de idiomas extranjeros, etc.), donde pueden definirse tareas y competencias

operacionales en términos de conductas observables, mayor será la dificultad para aplicar con éxito tales principios del aprendizaje conductista a metas y objetivos educativos más complejos que no se prestan al análisis de tareas y menos a la observación, la medición y el control experimental.

El logro de aprendizajes complejos ocurre al interior del sujeto que aprende y se alcanza bajo la forma de un proceso de reestructuración conceptual, de una recontextualización interior, de un nuevo horizonte de sentido que arroja nuevas luces sobre la manera de abordar la vida y las decisiones libres que hay que asumir en ella, sin que el observador conductual pueda determinar cambios de hábitos de conducta observables, excepto indicios indirectos que pueden percibirse con fina sensibilidad en los futuros escenarios vitales donde el alumno se desempeñe.

Si las metas educativas no son suma asociativa de destrezas y conductas externas observables y definibles de manera operacional, escapan al control experimental de la conducta, no pueden evaluarse y en consecuencia tampoco enseñarse de manera conductista, habría entonces que dejarlas por fuera del currículo. Lo saben quienes asumen de manera estricta esta perspectiva conceptual como opción pedagógica.

Sin embargo, hay que reconocer que algunas críticas a esta perspectiva pedagógica son injustas o desfasadas, pues todavía se utiliza y algunos de sus principios son aplicables e imprescindibles:

- El alumno en este enfoque es un espectador pasivo, pues requiere emitir la respuesta o la solución a la situación problemática. Se trata de aprender haciendo.
- La repetición y la frecuencia de la práctica es un factor importante para la retención de aprendizajes técnicos y prácticos, que no puede menospreciarse.
- El reforzamiento, desde Thorndike, es una adquisición de la psicología educativa que puede alcanzar altos niveles de sutileza y de variedad temporal en su suministro, pero que cuando hay que afianzar el aprendizaje es un factor de motivación externa no descartable.
- La generalización y la transferencia del aprendizaje pueden incrementarse en la medida en que se varíen los conceptos de aplicación.
- La asociación e interrelación de los aprendizajes, afianza el cambio educativo deseado, tanto más si se realiza de forma jerárquica, como lo recomendó Gagné (1971), aprovechando los tipos más humanísticos que requieren de la cognición, como la discriminación múltiple, el aprendizaje de conceptos y principios y la solución de problemas.
- La enseñanza individualizada es una ganancia importante de esta perspectiva que permite a cada alumno ensayar y practicar su respuesta

hasta perfeccionarla, sin que tenga que adelantarse ni retrasarse a sus propias habilidades y competencias.

- La necesidad de planificar la enseñanza, de prever la estructura del contenido y de la secuencia de los medios para lograr el aprendizaje, así sea de manera aproximada y probable, es un llamado de atención que debería interesar a los maestros de cualquier enfoque.
- La crítica que no ha podido desvirtuarse es la que señala la poca participación del alumno y del maestro en el diseño de la enseñanza conductista, mantiene la impresión de que se trata de una imposición exterior en que los protagonistas son objeto de entrenamiento. Sobre todo el maestro, que queda con la responsabilidad del control del ambiente del aprendizaje cuando él solo puede seguir instrucciones, señalar el estímulo y mostrar el modelo de respuesta previsto, aplicar los instrumentos de evaluación, manejar las incorrecciones del alumno según las instrucciones de la programación, y elogiar, premiar y promover cuando se le autorice. Este maestro ejecutor de instrucciones puede ser relevado de su papel de instructor por los nuevos computadores.

1.5 EL MODELO PEDAGÓGICO SOCIAL-COGNITIVO

Este modelo propone el desarrollo máximo y multifacético de las capacidades e intereses del alumno. Tal desarrollo está influido por la sociedad, por la colectividad donde el trabajo productivo y la educación están íntimamente unidos para garantizar a los alumnos no solo el desarrollo del espíritu colectivo sino el conocimiento científico-técnico y el fundamento de la práctica para la formación científica de las nuevas generaciones. El desarrollo intelectual no se identifica con el aprendizaje (como creen los conductistas), ni se produce independientemente del aprendizaje de la ciencia como creen algunos constructivistas. Sus precursores más destacados son Makarenko, Freinet y en América Latina Paulo Freire. Y más recientemente los discípulos de Vigotsky llevaron al aula la aplicación de los principios de la psicología educativa de su maestro.

Los escenarios sociales pueden propiciar oportunidades para que los estudiantes trabajen en forma cooperativa y solucionen problemas que no podrían resolver solos. El trabajo en grupo estimula la crítica mutua, ayuda a los estudiantes a refinar su trabajo y darse coraje y apoyo mutuo para comprometerse en la solución de los problemas comunitarios:

A través de la participación en las comunidades, los estudiantes podrían considerarse a sí mismos capaces, incluso obligados, de comprometerse con el análisis crítico y la solución de sus problemas.

Al menos tres requisitos o exigencias deben cumplir la enseñanza según esta pedagogía social:

- a. Los retos y problemas a estudiar son tomados de la realidad, no son ficticios ni académicos y la búsqueda de su solución ofrece la motivación intrínseca que requieren los estudiantes.
- b. El tratamiento y búsqueda de la situación problemática se trabaja de manera integral, no se aísla para llevarla al laboratorio sino que se trabaja con la comunidad involucrada, en su contexto natural, mediante una práctica contextualizada.
- c. Aprovechamiento de la oportunidad de observar a los compañeros en acción, no para limitarlos ni criticarlos sino para revelar los procesos ideológicos implícitos, sus presupuestos, concepciones y marcos de referencia, generalmente ocultos, pero que les permite pensar de determinada manera. El profesor y los participantes, sean alumnos o no de la escuela, están invitados y comprometidos a explicar sus opiniones, acuerdos y desacuerdos sobre el tema de la situación estudiada, y su peso en la discusión no lo da autoridad alguna, sino la fuerza de los argumentos, la coherencia y utilidad de las propuestas y la capacidad de persuasión, aun en contra de las razones académicas del profesor o del libro de texto.
- d. La evaluación en la perspectiva tradicional y en la conductista está dirigida al producto, es una evaluación estática, mientras en el modelo de pedagogía social es dinámica, pues lo que se evalúa es el potencial de aprendizaje que se vuelve real gracias a la enseñanza, a la interacción del alumno con aquellos que son más expertos que él es Vigosky quien ha definido el concepto de zonas de desarrollo próximo, que el alumno logra realizar con la ayuda de un buen maestro. En esta perspectiva, la evaluación no se desliga de la enseñanza, sino que detecta el grado de ayuda que requiere el alumno de parte del maestro para resolver el problema por cuenta propia. Por ejemplo la solución de problemas sencillos de aritmética, donde se ha detectado que los estudiantes pueden fallar por varias razones:
 - Porque no entienden la redacción del problema
 - Porque no logran representar lingüísticamente lo que se pregunta.
 - Por falta de una representación gráfica
 - Por falta de una representación matemática
 - Por falta de razonamiento lógico.

Si el problema fuera: "Luis tiene 5 camisas; Pedro tiene 3 camisas más que Luis; ¿cuántas camisas tiene Pedro?"; quizás un alumno de quinto de primaria lo resolvería con facilidad.

Pero si el problema fuera:” en secundaria los alumnos son diez veces más que los profesores. En mi colegio hay 40 alumnos, entonces, ¿cuántos profesores tiene?”, quizás no lo resolvería tan fácilmente el mismo alumno de quinto grado, aunque domine las operaciones aritméticas.

Entonces, el profesor de matemáticas debe graduar la dificultad del problema después de ensayarlo con diferentes niños de quinto grado, para luego graduar las ayudas que el alumno requiera a medida que avanza en la comprensión del problema.

El profesor debe suministrar una ayuda cada vez más compleja, a medida que el estudiante lo requiera, en la siguiente secuencia:

- Asegurar la comprensión del enunciado del problema, por ejemplo, cambiándole la presentación o redacción.
- Ayudar a representar lingüísticamente el problema, por ejemplo, mediante dos columnas para que el alumno escriba a la izquierda los datos conocidos y a la derecha los desconocidos, es decir, lo que se pregunta.
- Facilitar que el alumno diseñe de forma gráfica el problema.
- Dar ideas para que formule la representación simbólica, mediante una ecuación (el planteamiento matemático del problema).
- Brindar el modelo del razonamiento requerido para su solución.

Si con la primera ayuda del profesor el alumno no logra resolver el problema, se le suministra la segunda. Si con la segunda tampoco lo logra, se le facilita la tercera y así sucesivamente.

La representación esquemática de este proceso que podría aplicarse a otros aprendizajes.

Desde una perspectiva social-constructivista, se parte de la hipótesis de que el conocimiento y el aprendizaje constituyen una construcción fundamentalmente social, que se realiza a través de un proceso donde los modelos (o ideas previas) interpretativos iniciales de los individuos pueden evolucionar gracias a actividades previas graduales que favorezcan la explicación de los propios puntos de vista y su contrastación con los de los otros (los compañeros, el profesor, las lecturas o los medios de comunicación) y con la propia experiencia.

Desde esta visión, la evaluación, y más aún, la autoevaluación y la coevaluación, constituyen el motor de todo el proceso de construcción del conocimiento.

Con frecuencia el profesor y los que aprenden deben obtener datos y valorar la coherencia de los modelos expuestos y de los procedimientos que se aplican y, en función de ellos, tomar decisiones acerca de introducir cambios en los mismos.

No es el profesor quien da la información que el alumno precisa, tampoco el estudiante es el que descubre cuál es la información que necesita. Más bien sucede que el estudiante identifica lo que conoce, lo que observa y lo que dicen los demás, valora si le interesa o no y toma decisiones sobre si le es útil incorporar los nuevos datos y las nuevas formas de razonar y el profesor evalúa que sucede en el aula, como razonan y actúan los estudiantes y toman decisiones sobre las situaciones didácticas, las actividades, las propuestas que va a plantear al grupo para facilitar la evolución del pensamiento, de las actuaciones y de las actitudes de su alumnado.

Se han caracterizado las perspectivas pedagógicas contemporáneas más destacadas, para mostrarles a los profesores y lector las posibilidades y alternativas de enseñanza y evaluación. Cada modelo pedagógico tiene sus ventajas aunque ninguno es perfecto ni aplicable por completo. Son alternativas que el profesor puede seleccionar según su convivencia, de acuerdo con el tema de la materia, el nivel del grupo de estudiantes, y la confianza que vaya ganando a medida que se arriesgue a ensayar nuevas formas de enseñanza.

Inclusive el profesor no necesita plegarse a ningún modelo y para ciertas asignaturas podría asumir una posición electiva. Toda enseñanza de calidad requiere de un profesor que tenga claridad acerca de lo que va a enseñar, que sienta gusto por su oficio y por abrirles horizontes culturales a los jóvenes, sin menospreciar sus conocimientos previos o su contexto. El profesor también es responsable del aprendizaje de sus alumnos y no puede desechar experiencias y conceptos pedagógicos que podrían mostrarle nuevos caminos de desempeño docente, pues la misión que cumple requiere de mucho estudio, apertura de pensamiento y esfuerzo.

1.6 LA PERSPECTIVA PEDAGÓGICA COGNITIVA (constructivista)

En esta perspectiva se pueden diferenciar al menos cuatro corrientes:

- a. El modelo constructivista, en su primera corriente, establece que la meta educativa es que cada individuo acceda, progresiva y secuencialmente, a la etapa superior de su desarrollo intelectual de acuerdo con las necesidades y condiciones particulares. El maestro debe crear un ambiente estimulante de experiencias que faciliten en el niño su acceso a las estructuras cognoscitivas de la etapa inmediatamente superior. En consecuencia, el contenido de dichas experiencias es secundario, lo importante no es que el niño no aprenda a leer y a escribir, siempre que esto contribuya al afianzamiento y desarrollo de su capacidad de pensar, de reflexionar. Dewey, Piaget y Kolhberg son inspiradores de este modelo.

- b. Una segunda corriente del enfoque cognitivo se ocupa del contenido de la enseñanza y del aprendizaje, y privilegia los conceptos y estructuras básicas de las ciencias, por encontrar en ellas un material de alta complejidad que brinda mejores oportunidades de desatar la capacidad intelectual del alumno y enseñarle como un aprendiz de científico. J. Bruner (1973) es el iniciador de este enfoque optimista que asegura que cualquier contenido científico puede ser comprendido por los niños si se les enseña bien y se les traduce a su lenguaje, facilitando que los niños entiendan por sí mismos los conceptos básicos estructurales y los modos de investigar de cada ciencia, como un aprendizaje por descubrimiento.

En esta corriente de enseñanza basada en el descubrimiento, los alumnos realizan su aprendizaje a medida que experimentan y consultan la bibliografía disponible, analizan la información nueva con la lógica del método científico de la disciplina y deducen sus propios conocimientos. La evaluación formativa que realiza el profesor durante el proceso capta sobre todo las posibles desviaciones del alumno del proceso de descubrimiento previsto por el profesor en el desarrollo del modelo científico que caracteriza la disciplina de estudio. El objetivo de la evaluación consiste en obtener información acerca de los descubrimientos del alumno y su grado de apropiación de la estructura básica de la ciencia al final del proceso.

El optimismo innovador e intuicionista de Bruner fue criticado por Ausbel (1978), quién también se ocupa de la enseñanza del contenido de las ciencias, pero no por descubrimiento propio del niño, sino como un aprendizaje que el alumno tomará significativo gracias al aporte de su experiencia previa y personal. La contribución de sentido del alumno lo saca de la pasividad y lo convierte en activo constructor de su propio aprendizaje, sin el radicalismo de Bruner, pero manteniéndose como un exponente moderado de la corriente cognitiva.

El profesor debe facilitar que este aprendizaje significativo ocurra en sus alumnos, suscitando dudas e interrogantes respecto a los conocimientos que ya poseen, relacionando el tema con su experiencia y saber anteriores, ofreciéndoles oportunidades de ensayar y aplicar el nuevo concepto, asegurándose de que los alumnos formulen de forma adecuada el problema y las soluciones propuestas, para que el aprendizaje sea significativo.

En esta misma corriente se escriben los pedagogos cognitivos dedicados al estudio de la enseñanza de las ciencias, bien enfatizando en la explicación de los prejuicios y las malas interpretaciones de los estudiantes de ciencias, como el estudio de Eylon and Linn (1988) o centrándose en el estudio del cambio conceptual de las ideas y teorías de los alumnos sobre el mundo mediante el proceso que implica el desplazamiento (¿o subordinación?) del

viejo concepto a la teoría aprendida; este proceso se resume a continuación:

Enfoque del cambio conceptual de la enseñanza:

- Introducción: el profesor proporciona organizadores avanzados, revisión y motivación de experiencias.
- Punto central: los estudiantes son testigos de un evento. Se plantea un problema. El profesor proporciona oportunidades a los estudiantes para hacer explícitas sus opiniones y explicaciones de los eventos.
- Desafío y desarrollo: el conflicto se introduce a través de la presentación de un evento discrepante y/o cuestionamiento socrático. Los estudiantes se reflejan en sus planteamientos. Se introducen nuevas ideas que resuelven las discrepancias, por ejemplo, nuevas analogías.
- Aplicación: los estudiantes resuelven los problemas mediante las nuevas ideas; analizan y debaten sus méritos.
- Resumen: el profesor y/o los estudiantes sintetizan los hallazgos y los vinculan a otras lecciones.

- c. Una tercera corriente cognitiva orienta la enseñanza y el currículo hacia la formación de ciertas habilidades cognitivas que se consideran más importantes que el contenido, científico o no donde se desarrollan. Por ejemplo, Hilda Taba (1967) propone que la enseñanza debe dirigirse a propiciar en los alumnos el pensamiento inductivo y para ello propone algunas estrategias y actividades secuenciadas y estimuladas por el profesor mediante preguntas desafiantes formuladas en el momento oportuno, en un proceso inductivo.

Otros trabajos cognitivos de la corriente de habilidades de pensamiento se han aplicado también en la enseñanza y están relacionados con el pensamiento lateral y creativo de De Bono (1970) e, incluso, con, habilidades propias del pensamiento artístico y su hermenéutica (EISNER, 1998). En la década de los 90 empiezan a aparecer estudios que aproximan esta corriente con la de enseñanza-aprendizaje significativo de contenidos científicos, con el argumento de que las habilidades no se desarrollan en abstracto, requieren del contenido conceptual, y a su vez “los conceptos se desarrollan siempre en contextos de razonamiento y de solución de problemas... No hay que escoger entre un énfasis en contenido y un énfasis en habilidades del pensamiento”. (RESNICK, 1989, p.6).

- d. Una cuarta corriente social-cognitiva que basa los éxitos de la enseñanza en la interacción y de la comunicación de los alumnos y en el debate y la

crítica argumentativa del grupo para lograr resultados cognitivos y éticos colectivos y soluciones a los problemas reales comunitarios mediante la interacción teórico-práctica, será tratada a profundidad a continuación como una perspectiva separada, denominada pedagogía social constructivista.

A diferencia de los pedagogos conductistas, los cognitivos empeñan su enseñanza en lograr que los alumnos aprendan a pensar, se autoenriquezcan en su interioridad con estructuras, esquemas y operaciones mentales internas que les permitan pensar, resolver, y decidir con éxito situaciones académicas y vivenciales. Los aprendizajes en la perspectiva cognitiva deben ser significativos y requieren de la reflexión, comprensión y construcción de sentido.

La mente no es una “estructura plana” sobre la cual se imprimen las representaciones en las cosas, la mente no es un espejo fiel; es una estructura multidimensional activa y transformadora que produce ideas y teorías a través de su anterior experiencia y de su acción sobre ellas. Los sujetos cognoscitivos, los aprendices, no son receptores pasivos de información; lo que reciben lo reinterpretan desde el mundo interior, lo leen con sus propios esquemas para producir sus propios sentidos, porque entender es pensar y pensar es construir sentido, por ello, a los pedagogos cognitivos también se les denomina constructivistas.

Algunas otras características que comparten todas las corrientes cognitivas son las siguientes:

- a. En cuanto a la percepción prefieren no solo recoger la tradición gestáltica de la percepción globalizada, sino dirigir la observación hacia el nicho natural del objeto, sin aislarlo ni desarraigarlo de sus relaciones orgánicas con el mundo que lo rodea.
- b. La organización del conocimiento no se presenta como marcha de lo simple a lo complejo, o de la parte al todo, sino que el todo siempre está presente desde el principio de la enseñanza, aunque deba avanzarse para la comprensión de otros niveles de profundidad. El sentido es necesario desde el principio para lograr aprendizajes significativos.
- c. La comprensión es el aprendizaje significativo es imprescindible. No se autorizan fases de enseñanzas memorísticas, o de ejercitación mecánica de movimientos o de fórmulas.
- d. El aprendizaje significativo requiere confirmación, retroalimentación, cognoscitiva que permita corregir errores y ajustar desviaciones mediante el debate y la discusión con los pares; pero sobre todo ensayando y probando en la experiencia cada conjetura, cada hipótesis, en el campo de las

ciencias naturales y en el de las sociales; eso si, con la certeza de que no se trata de un camino determinista que conduce con exactitud a una sola respuesta correcta, sino a una aproximación probable de alguna de las soluciones plausibles. No se trata tampoco de verificar la respuesta en el libro ni la teoría del profesor, sino de confrontar y hacer viable la conjetura del alumno, no desde afuera, sino desde la iniciativa racional que la sustenta, con el estímulo y la ayuda del profesor y del grupo.

- e. La evaluación del aprendizaje significativo, no se diferencia de la retroalimentación permanente del proceso de conocimiento del alumno desde el cual comienza a cuestionarse su saber previo. La generación del conflicto cognitivo, la formulación de nuevos sentidos o conjeturas que interpreten de manera coherente la situación problemática (incluyendo las diferentes formas de representación del problema) y las experiencias de confirmación de la hipótesis, son fases claramente diferenciadas que permiten la observación y el seguimiento del profesor, sin perder el sentido genético de los logros de aprendizaje al final del proceso y disponiendo de un marco de sentido global para interpretar los avances de cada alumno, cualquiera que sea el nivel de competencia avanzado en el tema, como una evaluación de referente personal.

Por supuesto que hay detalles observables que sirven de indicadores de los avances de cada alumno a medida que le ocurren reestructuraciones teóricas, cambios conceptuales, adquisición de destrezas argumentativas y experimentales, pruebas, refutaciones, nuevas interpretaciones, reorganización de datos, búsquedas de nuevos datos, inferencias y conclusiones, etcétera.

Cuando se trata de evaluar habilidades de pensamiento en general y en abstracto, deberían ser los psicólogos los llamados a realizar este tipo de pruebas. Pero dado que las habilidades no son generales, ni abstractas, sino que se desarrollan sobre contenidos específicos, los profesores de cada ciencia y disciplina disponen de herramientas y son los mejores testigos (y estimuladores) del desarrollo intelectual de sus alumnos, a medida que se despliegan su enseñanza en la perspectiva cognitiva.

Aunque la primera evaluación y la más importante retroalimentación no ocurre por cuenta del profesor sino del alumno mismo, cuando sumergido en sus pensamientos organiza y confronta sus propias ideas y experiencias, y las compara y sintetiza en un proceso de autorregulación no deliberado, que luego le permite pensar y reflexionar sobre la pregunta inicial, con la cual el profesor suscita un conflicto cognitivo, un cuestionamiento radical que le promueve la búsqueda de conjeturas más consistentes, coherentes, comprensivas y útiles.

1.7 APLICACIÓN DEL CONSTRUCTIVISMO EN LA ENSEÑANZA DE LA TECNOLOGÍA.

Dado que esta corriente pedagógica requiere la utilización de las capacidades creativas del alumno, es necesario recurrir, en el caso de la educación universitaria, al uso de la informática y de las nuevas tecnologías. En ese sentido, se han producido una serie de avances tecnológicos que han posibilitado el progreso en esta materia:

- El desarrollo de las computadoras capaces de almacenar gran cantidad de información, y la posibilidad de acceder a ella en un abrir y cerrar de ojos.
- El mejoramiento de las telecomunicaciones, que pone a disposición tecnologías avanzadas de audio y vídeo.
- El desarrollo de las tecnologías de multimedios, que revoluciona tanto la producción como la presentación de programas polivalentes por medio del uso del computador.
- La creación de grandes bancos de datos y su relación con redes globales de computadoras de varios países.

1.7.1 Características de la enseñanza a través de la tecnología

La forma de evaluar el ambiente de los estudiantes equipados con medios de información y comunicación electrónica puede ser encarada a priori por dos factores:

- a. La enseñanza activa de los estudiantes, pues ellos pueden, leyendo, escribiendo y diseñando, participar en forma digital del proceso de aprendizaje.
- b. El poder del lenguaje audiovisual, que fuera resaltado por Paul Heimann, pionero de la enseñanza, puede ahora ser utilizado plenamente en un nivel de diferenciación bien diverso.

Según los criterios tradicionales, solo por estas dos razones, el ambiente de enseñanza digitalizado ya sería un progreso, y tendría compensada su inversión.

Esta primera visión no abarca todo lo que un ambiente digitalizado puede realizar, ya que él está en condiciones no solo de reforzar determinados comportamientos de la educación, sino también de modificarla estructuralmente, facilitando la tarea del docente y del alumno fundamentalmente, a través de dos formas a saber:

- a. Enseñanza por archivos: Durante el estudio, el alumno puede en cualquier momento seleccionar, copiar, pegar o grabar cualquier parte de la información que está tratando, y luego accederla nuevamente con solo realizar una operación con el "mouse" . Esto permite que la re-memorización, revisión y

comparación generen una técnica activadora que se integra con el proceso de aprendizaje y permite manejar gran cantidad de datos fácilmente.

- b. Enseñanza con hipermedias: En un ambiente digital, los estudiantes pueden, a través de un hipertexto, bucear profundamente en los tópicos interesantes que hacen a un mejor entendimiento del tema que se está analizando, ya que un hipermedio no es apenas la página de un libro o de una revista científica, porque estaríamos despreciando el verdadero potencial didáctico que tiene, sino por el contrario es una herramienta que permite una inmediata disponibilidad de la información deseada, colocando al alumno en una condición excelente para investigar lo mejor que crea por medio de informaciones objetivas, derivaciones y fundamentaciones históricas, consideraciones teórico - científicas, posiciones y opiniones encontradas, etc. Este tipo de organización debe ser utilizada con cuidado por parte del usuario, ya que se genera un pequeño cosmos multidimensional de saber, en la cual el estudiante tiene que poder orientarse.

Debemos incluir en este contexto una modificación del comportamiento de los docentes y de los alumnos, que explicaremos detalladamente. Los docentes van a tener que aprender a trabajar simultáneamente en varios niveles, creando unidades que contengan textos, gráficos, videos, comentarios y ejercicios, y que estén relacionadas a través de “links”, generando una red que puede ser estructurada de tal manera que los alumnos puedan pasar de un nivel a otro sorteando diferentes escalas de complejidad, casi haciendo analogía a cualquier juego de computadoras. El desarrollo de estas versiones de hipermedios es una tarea difícil, pero no imposible, y seguramente implica una dedicación especial, persiguiendo mejores “herramientas” para la educación.

Los estudiantes, por su parte, deberán adaptarse al nuevo método de aprendizaje, primero porque se le da la libertad de tomar decisiones en lo que respecta a la marcha de sus estudios, y segundo porque ellos mismos deben encontrar el camino más conveniente para su entendimiento, dejando de lado aquellas informaciones secundarias que no contribuyen demasiado, según su criterio, y que en definitiva pueden crear conflictos. Eso los obliga a crear estrategias para realizar sus tareas. De alguna manera esto ocurre cuando un estudiante debe realizar la consulta en varios libros, tomando lo que precisa y descartando el resto, realizando los descubrimientos por cuenta propia e integrándolos a su saber existente. Este es un procedimiento exploratorio – asociativo en el cosmos de la ciencia de hipertextos en la que toda la información nueva debe ser verificada para ver si ella dice algo que esté relacionado con la meta propuesta por el usuario. Este método se denomina “Browsing”. El trayecto para llegar a la meta podría también ser establecido por los docentes, siempre que estos pretendan conducir a los estudiantes por una secuencia bien definida con el fin de lograr ciertos efectos didácticos, y en ese caso los “ links” se activan con una definida automaticidad. Se podrá exhibir en la pantalla con ventanas explicativas el camino

preestablecido, o bien mediante expresiones orales, o mezcla de ambas. Este método es llamado “guided tour”. Según Kuhlem (29), “El Browsing asociativo es el placer de investigar con hipertextos, y la navegación controlada... la disciplina. Ambas cosas en conjunto llevan al objetivo propuesto, más allá de la imposición y el caos”.

El estudio a través de medios digitales, con todas sus nuevas formas de trabajo, ha facilitado enormemente el estudio autónomo. En virtud del dominio del tradicional método de enseñanza expositivo, esta forma de aprendizaje siempre fue bastante difícil desde sus raíces y grandemente rechazada, porque no existía una manera segura en que el alumno fuera guiado sin la presencia del docente para apoyarlo constantemente, pero los recursos computacionales actualmente disponibles, tanto en hardware como en software, permiten generar, de manera relativamente simple y rápida, imágenes tridimensionales que reproducen de manera virtual fenómenos que anteriormente solo eran posibles de visualizar en experiencias de laboratorio, tal vez con equipos costosos, o con un gran tiempo de preparación para su ejecución. Con esto no se pretende eliminar estas experiencias, sino tratar de que el alumno se prepare mejor para realizarlas, mediante un análisis previo y autónomo extra clase, que surge de haberlo visto en forma virtual, lo que finalizaría en un mejor aprovechamiento de las mismas.

Por otra parte, estas imágenes tridimensionales pueden representar de manera virtual, a través de animaciones, algunos conceptos, ideas y abstracciones que no existen de forma visible en el mundo real, y que muchas veces son fundamentales para comprender los fenómenos físicos de las materias con que están relacionados, como por ejemplo el caso del análisis de tensiones en estructuras sometidas a solicitaciones de distintos tipos.

2. MOTOR DE INDUCCION TRIFÁSICO

2.1 INTRODUCCIÓN

La máquina de inducción es, sin lugar a dudas, la máquina más utilizada en los accionamientos industriales. Esta máquina fue inventada por Tesla a finales del siglo pasado, y demostró las ventajas de los sistemas de corriente alterna con respecto a los sistemas de corriente continua. Desde ese momento y hasta el presente, la sencillez, robustez y reducido costo han hecho insustituible el uso masivo de esta máquina en la industria.

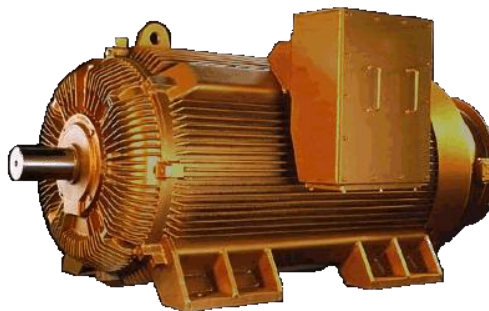
Los motores asincrónicos tienen devanados amortiguadores que les permiten desarrollar un momento de torsión de arranque sin necesidad de suministrarles una corriente de campo externa. Una máquina que sólo tiene devanados amortiguadores se denomina "*máquina de inducción*".

Tales máquinas se llaman así porque la tensión del rotor (que produce tanto la corriente como el campo magnético del rotor) es "inducida" en el devanado del rotor, en lugar de conectarse físicamente por medio de conductores (las tensiones y corrientes del rotor se producen por inducción magnética).

Los motores de Inducción son los equipos eléctricos de mayor aplicación en industrias de todo tipo, debido a que presentan grandes ventajas en relación a otras máquinas tales como su menor precio, robustez, buen rendimiento a plena carga, bajo costo en mantenimiento y sistemas de control de velocidad menos complejos.

Aunque es posible usar una máquina de inducción tanto como motor y como generador, tiene muchas desventajas en este último caso y por ello se usa en circunstancias excepcionales. Por esta razón, generalmente se hace referencia a las máquinas de inducción como "*motores de inducción*".

Figura 1 Dibujo de un motor de Inducción



Tomado de (1)

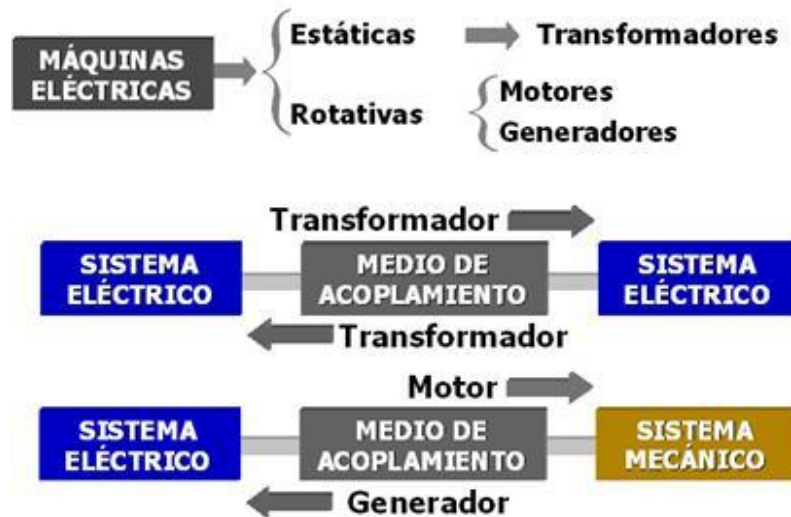
Un motor de inducción se comporta como un transformador:

- Devanado primario = estator
- Devanado secundario = rotor

La corriente del devanado primario (estator) crea un campo magnético giratorio, el cual induce una corriente en el devanado secundario (rotor). La corriente del rotor junto con el campo magnético inducido provoca una fuerza, que es la causa de la rotación del motor.

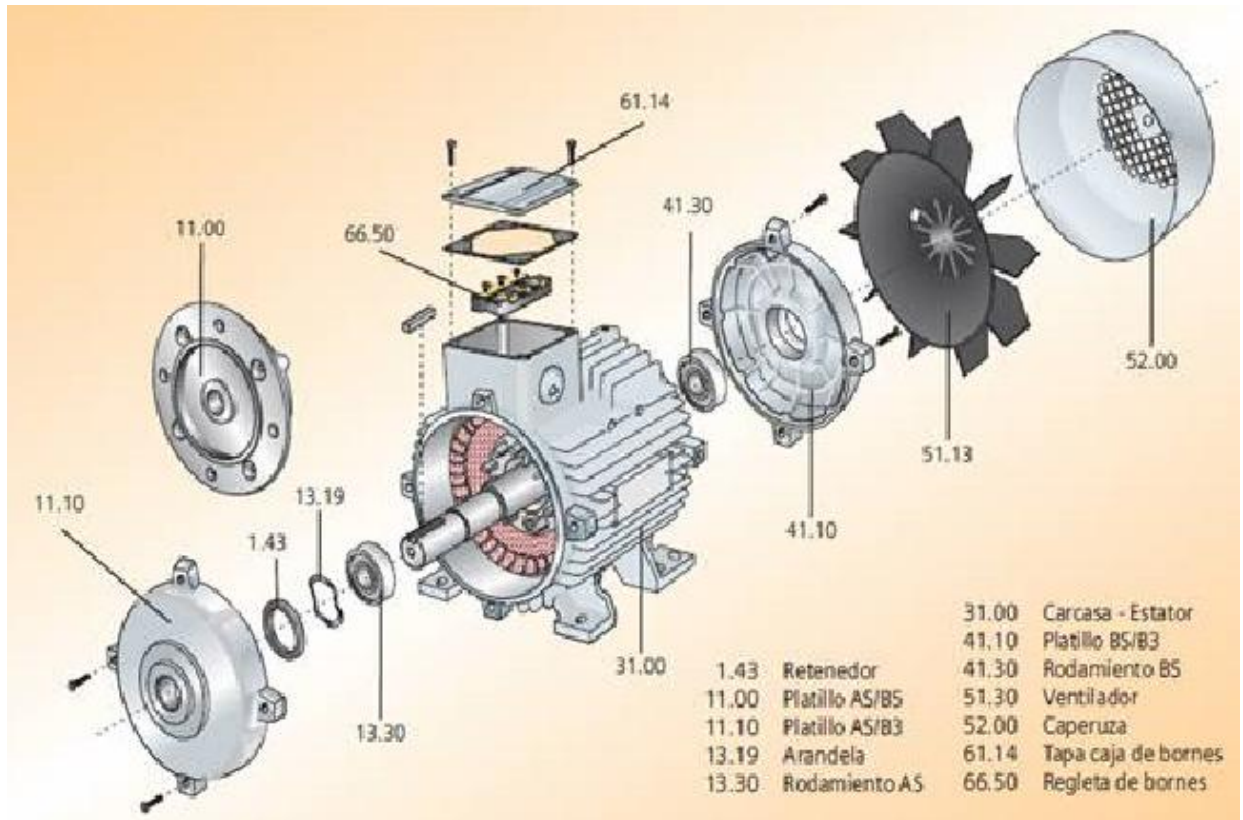
Debido a que la transformación de potencia entre rotor y estator depende de la variación del flujo, si la velocidad del rotor aumenta, menos cantidad de potencia se puede convertir y además se van solapando la velocidad del rotor con la del campo magnético giratorio el cual depende de la frecuencia ya sea 50 o 60 Hz. Esto significa que a la velocidad de sincronismo no existe conversión de potencia. La diferencia entre la velocidad de sincronismo y la velocidad del rotor se denomina deslizamiento. La velocidad del rotor viene determinada por la frecuencia, el número de polos y el deslizamiento.

Figura 2 Tipos de máquinas y la transformación de energía



Tomado de (2)

Figura 3 Componentes del motor de inducción



Tomado de (3)

2.2 EL ROTOR (2)

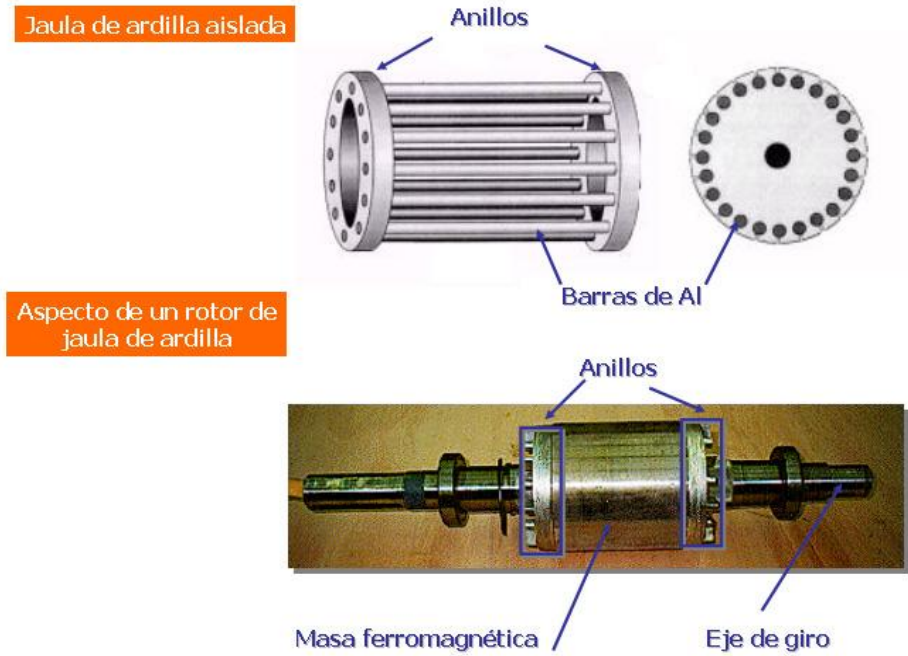
Es la parte giratoria y el inducido en los motores de inducción. Está formado por:

- Circuito magnético: constituido por chapas de hierro aleado al silicio, asiladas entre sí con Carlite, para reducir las pérdidas por corrientes parásitas.
- Circuito eléctrico: En función de la forma constructiva se tienen dos tipos, los de rotor de jaula de ardilla y los de rotor bobinado.

2.2.1 Rotor de jaula de ardilla

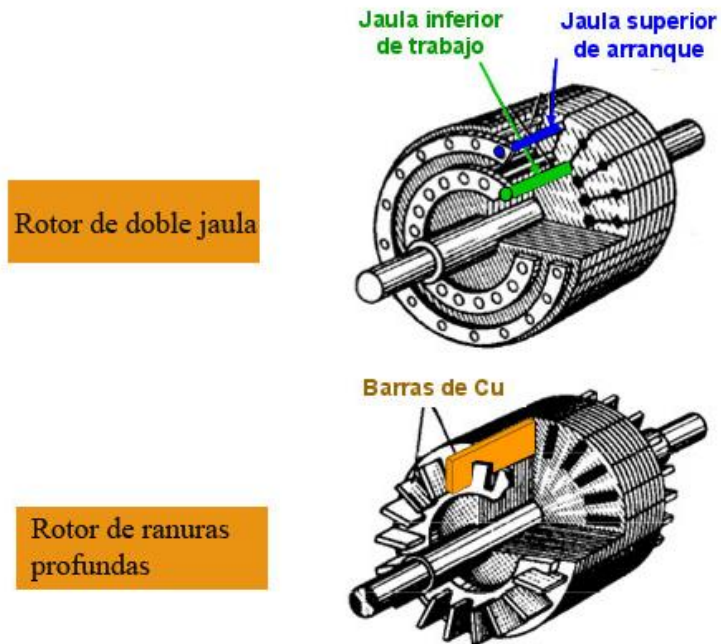
La forma del devanado es realmente peculiar. Los conductores del rotor son barras de cobre o aluminio, cortocircuitadas en sus extremos mediante anillos, que también son de cobre o aluminio. El conjunto forma una estructura que recuerda a una "jaula de ardilla", de ahí su nombre. La jaula a su vez se encuentra embebida en la masa ferromagnética del rotor, que dispone de ranuras para alojar las barras.

Figura 4 Rotor jaula de ardilla



Tomado de (2)

Figura 5 Rotor de doble jaula y ranuras profundas



Tomado de (2)

En la Figura 4 y Figura 5 se observa que el rotor de jaula de ardilla, no presenta conexiones eléctricas con el exterior dado que los extremos de estas barras están cortocircuitados, las barras pueden ser instaladas de forma paralela o no al eje del rotor lo cual puede mejorar las características de arranque y disminuir el ruido.

Entre las ventajas se tienen:

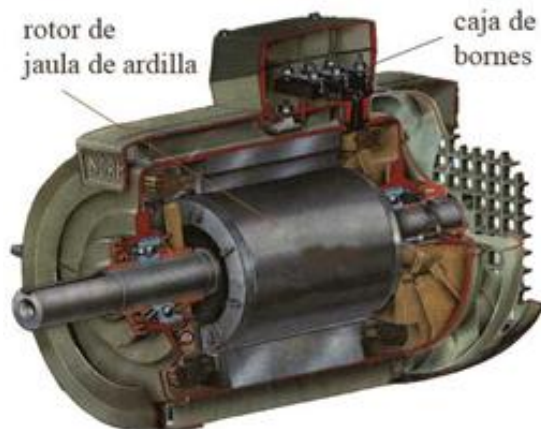
- Costo inicial bajo.
- Su rotor es de construcción simple.
- Es compacto y sus instalaciones ocupan poco espacio.
- No producen chispas que puedan provocar incendios.
- Lleva poco equipo de control, ya que no necesita control en el rotor.

Entre las desventajas se tienen:

- Su corriente de arranque es relativamente alta.
- El par de arranque es fijo.

Corte de un motor de inducción en el cual se aprecia el rotor de jaula de ardilla, el estator con sus ranuras y devanados

Figura 6 Corte del motor de inducción con rotor jaula de ardilla



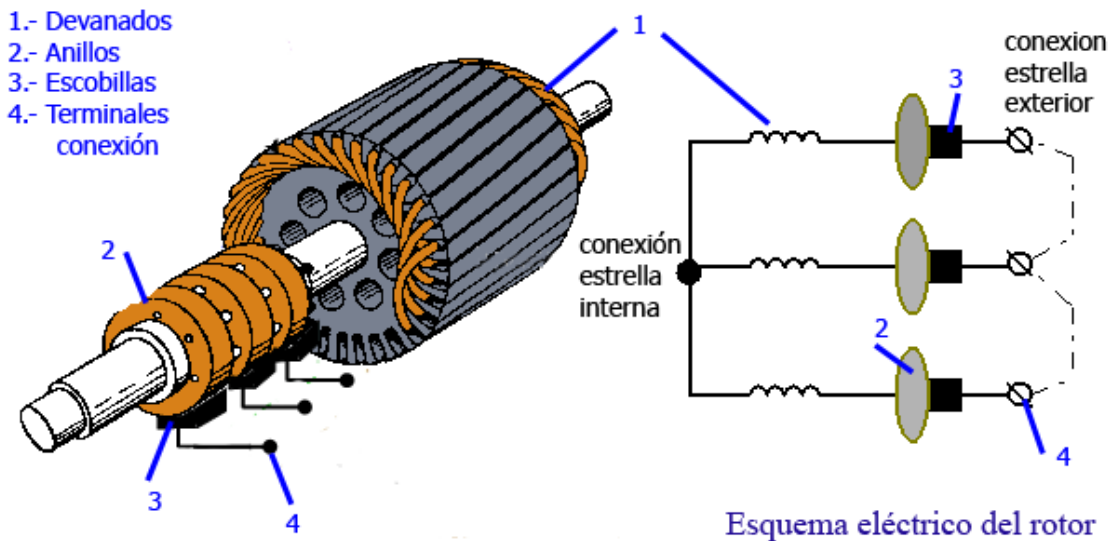
Tomado de (2)

2.2.2 Rotor bobinado o devanado

Ante todo se debe saber que este tipo de rotores está actualmente extinguiéndose y que el 95 % de los motores de inducción son actualmente de jaula de ardilla. Sin embargo no está de más que "suene", por si acaso se encuentra con alguno (improbable).

La principal diferencia con el motor jaula de ardilla es que los conductores ya no son barras de aluminio o cobre sino que provienen de un devanado trifásico, similar a los devanados del estator, es importante resaltar que el número de fases del rotor no tiene por qué ser el mismo que el del estator, lo que si tiene que ser igual es el número de polos. Un extremo de cada devanado se conecta en estrella y el otro se conecta con el exterior mediante tres anillos que rozan con tres escobillas. En motores de rotor bobinado de gran potencia, se conectan durante el arranque resistencias al rotor, para aumentar el par de arranque, que posteriormente se cortocircuitan. En vista de estas conexiones y del rozamiento anillos-escobillas, estos motores necesitan un mantenimiento del que carecen los de jaula.

Figura 7 Rotor bobinado y su esquema eléctrico



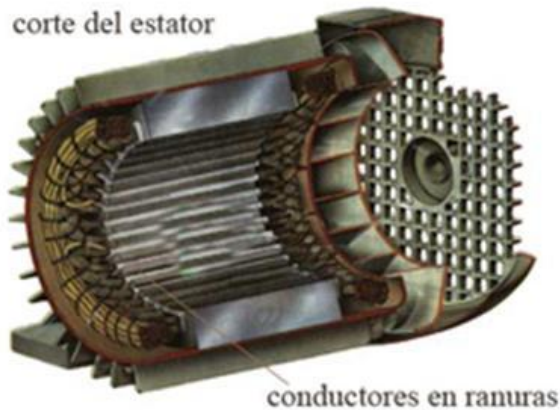
Tomado de (2)

Algunas características del rotor bobinado o devanado son:

- a. En ellas se puede desarrollar un alto par de arranque con corriente de arranque baja y además pueden operar a plena carga con pequeño deslizamiento y con eficiencia.
- b. Se puede cambiar el deslizamiento, cambiando la resistencia del rotor.

2.3 EL ESTATOR. (2)

Figura 8 Corte del motor de inducción de un estator



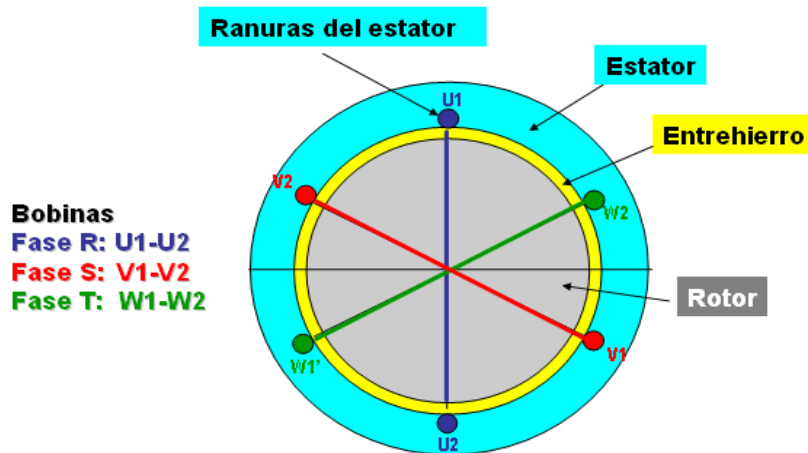
Tomado de (2)

El estator de un motor de inducción es el inductor, es decir el encargado de crear el campo magnético. Está formado por:

- **Circuito magnético:** tambor con forma cilíndrica y ranurado, formado de chapas de hierro aleado al silicio, asiladas entre sí con Carlite, para reducir las pérdidas por corrientes parásitas. La misión de las ranuras es alojar a los conductores de los devanados.
- **Circuito eléctrico:** formado por tres devanados monofásicos que al conectarlos en estrella o triángulo, forman un devanado trifásico. Por otra parte en los motores monofásico poseen dos devanados, uno de estos monofásico funciona como régimen permanente, y el otro solo para arranque, este último trabaja hasta llegar a su velocidad de funcionamiento.

En un devanado trifásico su concepción más elemental, son tres bobinas desfasadas 120° electricos. Cada bobina está formada por 2 conductores diametralmente opuestos (bobina de paso diametral) y el estator precisa entonces de 6 ranuras para alojarlos.

Figura 9 Bobinas de paso diametral



Tomado de (2)

De esta forma se desaprovecha la capacidad del estator puesto que solamente es necesario 6 ranuras para 3 bobinas. En los devanados reales la disposición es muy distinta:

- El número de ranuras es normalmente 24, 36, 48, etc.
- Las bobinas no son de paso diametral.
- Cada devanado monofásico está formado de varias de estas bobinas conectadas en serie.

Constructivamente las bobinas dependen del tipo de motor, diferenciando entre motores de Baja Tensión (<1000 V) y motores de Media Tensión (>1000 V):

- Motores de BT: las bobinas son de hilo esmaltado, de tal forma que este baño aislante garantiza el aislamiento entre ellas.
- Motores de MT: las bobinas son preformadas con pletinas de cobre aisladas con materiales orgánicos apropiados.

Figura 10 Devanados de un motor de inducción

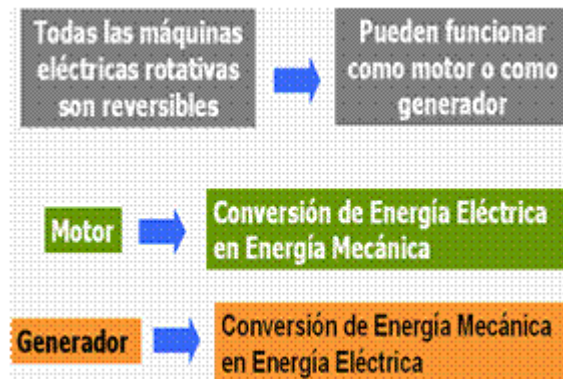


Tomado de (2)

2.4 MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS (2)

Las máquinas eléctricas rotativas son dispositivos reversibles, pueden funcionar como un motor o como generador.

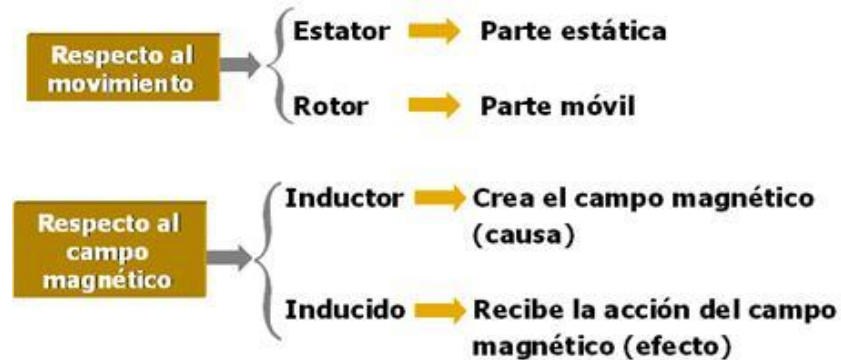
Figura 11 Máquinas eléctricas rotativas (Motor y Generador)



Tomado de (2)

Desde el punto de vista constructivo y funcional, las partes constituyentes de las máquinas eléctricas son las siguientes:

Figura 12 Partes constituyentes máquinas eléctricas



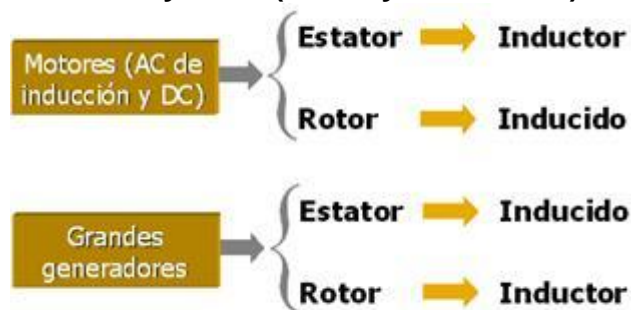
Tomado de (2)

En el inducido son dos los efectos que puede producir el campo magnético.

- Si por los conductores del inducido circula intensidad, se inducen en ellos fuerzas que producen el giro (motor).
- Si los conductores del inducido “ven” flujo variable, se induce en ellos fem (generador).

De acuerdo con lo anterior se puede plantear que el estator y el rotor con el inductor y el inducido, Esta correlación depende del tipo de máquina eléctrica. De todas formas la disposición más habitual es la siguiente:

Figura 13 Efectos estator y rotor (Motor y Generador)



Tomado de (2)

3. CONCEPTOS BÁSICOS

La operación de los motores de inducción es básicamente igual a la de los motores síncronos con devanados de amortiguamiento. A continuación de definirán ciertos términos importantes de los motores de inducción.

3.1 EL CAMPO MAGNÉTICO GIRATORIO

En los motores trifásicos de inducción el estator es la parte que crea el campo magnético y en el rotor es donde se origina el par de fuerzas causante del giro. El estator está constituido por un devanado trifásico, es decir por tres devanados monofásicos desfasados 120° eléctricos. Al conectarse el devanado a una red trifásica equilibrada, las intensidades absorbidas son también trifásicas equilibradas. Esto da lugar a un campo magnético giratorio, que presenta las siguientes características:

- Su inducción magnética (B) es constante respecto al tiempo y, depende de la tensión y de la frecuencia de la red trifásica.
- Su número de polos depende de la configuración de las bobinas del devanado y del número de ranuras del estator.
- La velocidad de giro depende del número de polos del devanado del estator y de la frecuencia de la red:

$$n_{sinc} = \frac{120f_e}{P} \quad 1.$$

Dónde:

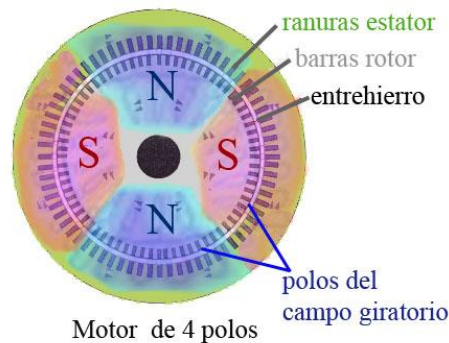
n_{sinc} : Velocidad del campo giratorio (velocidad. de sincronismo) en rpm.

f_e : Frecuencia en Hz.

P: Número de pares de polos del devanado del estator.

Nota: Un devanado trifásico crea un campo giratorio de inducción magnética constante, cuyo número de polos depende de su diseño y cuya velocidad se llama "velocidad de sincronismo (n_{sinc})"

Figura 14 Motor de 4 polos



Tomado de (2)

Se tiene en cuenta que el estator es la parte estática de la máquina y que por tanto no gira; lo que sí gira es el campo magnético creado por su devanado trifásico. En la Figura 14. Se Puede ver un campo magnético giratorio de un motor de 4 polos, donde los dos polos Norte están en color azul y en rojo los dos polos Sur. El conjunto se comporta como un imán giratorio. Se observa como los polos penetran en el rotor.

La frecuencia de las redes eléctricas es de 60 Hz, de tal forma que las velocidades de sincronismo más habituales de los motores de inducción son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 2 \text{ polos} \rightarrow P=2 &\rightarrow n_{sinc} = \frac{120 * 60}{2} = 3600 \text{ rpm} \\
 4 \text{ polos} \rightarrow P=4 &\rightarrow n_{sinc} = \frac{120 * 60}{4} = 1800 \text{ rpm} \\
 6 \text{ polos} \rightarrow P=6 &\rightarrow n_{sinc} = \frac{120 * 60}{6} = 1200 \text{ rpm} \\
 8 \text{ polos} \rightarrow P=8 &\rightarrow n_{sinc} = \frac{120 * 60}{8} = 900 \text{ rpm}
 \end{aligned}$$

Este campo magnético giratorio B pasa sobre las barras del rotor e induce una tensión en ellas. La tensión inducida en cierta barra del rotor esta dado por la ecuación:

$$E_{ind} = (V \cdot B)L \quad 2.$$

Donde:

V: velocidad de la barra en la relación con el campo magnético

B: vector de densidad de flujo magnético

L: longitud del conductor en el campo magnético

Lo que produce la tensión inducida en la barra del rotor es el movimiento relativo del rotor en comparación con el campo magnético del estator.

Por último, puesto que el par inducido en la máquina está dada por:

$$T_{ind} = K \cdot B_r B. \quad 3.$$

El par resultante va en sentido contrario de las manecillas del reloj, debido a que el par inducido del rotor va en ese sentido, el rotor acelera en esa dirección

Sin embargo hay un límite superior finito para la velocidad del motor. Si el rotor del motor de inducción gira a velocidad síncrona, entonces las barras del rotor estarán estacionarias en relación con el campo magnético y no habrá ninguna tensión inducida. Si E_{ind} fuera igual a cero, entonces no habría corriente en el rotor y no habría campo magnético en el. Sin campo magnético en el rotor, el par inducido sería cero y el rotor reduciría su velocidad como resultado de las pérdidas por fricción. Por lo tanto un motor de inducción puede acelerar hasta llegar cerca a la velocidad síncrona, pero nunca puede llegar a ella.

3.2 CONCEPTO DE DESLIZAMIENTO DEL ROTOR

Deslizamiento es la pérdida de velocidad angular del motor (necesaria para que sea producido un par electromagnético), expresada por unidad de velocidad síncrona, se llama deslizamiento.

La tensión inducida en la barra del motor inducción depende de la velocidad del rotor en relación con los campos magnéticos. Puesto que la conducta de un motor de inducción depende de la tensión y la corriente del rotor, es más lógico hablar de la velocidad relativa. Hay términos que se usan frecuentemente para definir el movimiento relativo del rotor y los campos magnéticos, uno es la velocidad de deslizamiento y se define como la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad del rotor.

$$n_{des} = n_{sinc} - n_m \quad 4.$$

Donde:

n_{des} : Velocidad de deslizamiento de la máquina
 n_m : Velocidad mecánica del eje del motor

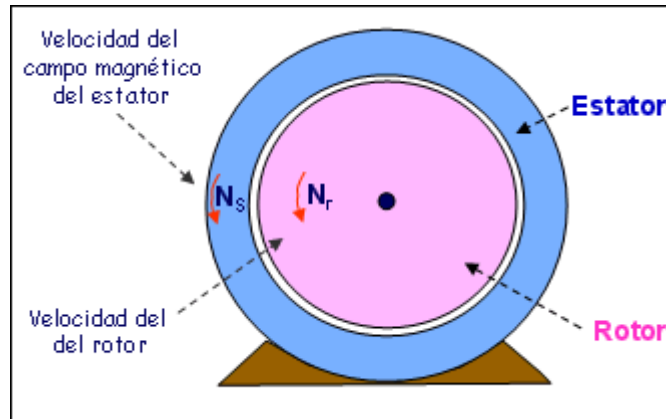
n_{sinc} : Velocidad de los campos magnéticos

El otro término para describir el movimiento relativo es el deslizamiento que se deduce con la siguiente ecuación.

$$s = \left(\frac{n_{des}}{n_{sinc}} \right) * 100\% \quad 5.$$

$$s = \left(\frac{n_{sinc} - n_r}{n_{sinc}} \right) * 100\% \quad 6.$$

Figura 15 Concepto deslizamiento



Tomado de (2)

Pero esta ecuación también se puede escribir en términos de velocidad angular ω (revoluciones por segundo) de la siguiente manera:

$$s = \left(\frac{\omega_{sinc} - \omega_r}{\omega_{sinc}} \right) * 100\% \quad 7.$$

Cabe resaltar que cuando el rotor gira a velocidad síncrona, $s = 0$, mientras que si el rotor está estacionado, $s = 1$. Todas las velocidades normales del motor caen dentro estos dos límites.

Se puede expresar la velocidad mecánica del eje del rotor en términos de la velocidad síncrona y del deslizamiento. Si se despeja la velocidad mecánica de la ecuación 6 y 7 se tiene:

$$n_r = (1 - s)n_{sinc} \quad 8.$$

$$\omega_r = (1 - s)\omega_{sinc} \quad 9.$$

Estas ecuaciones son muy útiles para deducir el par de motor y las relaciones de potencia.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede ver los deslizamientos nominales típicos en función del número de polos del motor y, para una frecuencia de 60 Hz.

Tabla 1 Valores correspondientes para el número de polos

Número de polos	n_{sinc} rpm	n_r rpm	s %
2	3600	3550	1,38
4	1800	1750	2,7
6	1200	1150	4,16
8	900	850	5,5

Por ejemplo el motor de 4 polos. Su deslizamiento nominal es del 2,7 %. ¿Cómo se interpreta? Significa que el rotor gira un 2,7 % más despacio que el campo magnético del estator.

La velocidad del rotor (n_r) y el deslizamiento (s) evolucionan al revés; a menos velocidad, más deslizamiento y viceversa.

Nota: Un deslizamiento elevado, implica que el rotor del motor gira a una velocidad lenta; sin embargo el campo magnético estático, siempre gira a la velocidad de sincronismo.

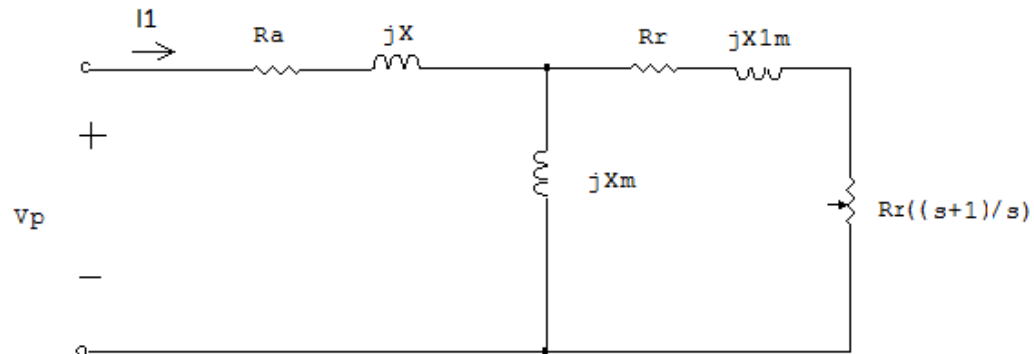
3.3 FRECUENCIA ELÉCTRICA EN EL ROTOR

Un motor de inducción funciona por medio de la inducción de tensión y corrientes en el rotor de la máquina por esta razón a veces se llama transformador rotatorio. Al igual que un transformador, el primario (estator) induce una tensión en el secundario (rotor), pero a diferencia de un transformador, la frecuencia secundaria no es necesariamente igual a la frecuencia primaria.

Si el rotor de un motor se bloquea y no se puede mover, entonces el rotor tendrá la misma frecuencia que el estator. Por otro lado, si el rotor gira a velocidad síncrona, la frecuencia en el rotor será cero.

Comentarios del Circuito equivalente de un transformador por fase que representa la operación del un motor:

Figura 16 Circuito Equivalente de un transformador por fase que representa la operación de un motor de inducción



V_p : Voltaje de entrada en el primario.

R_a : Resistencia en el primario. (Resistencia del estator)

jX : Reactancia en el bobinado primario (reactancia de dispersión del estator)

jX_m : Reactancia en el núcleo.

R_r : Resistencia en el secundario. (Resistencia en el rotor)

jX_{lm} : Reactancia en el secundario. (Reactancia de dispersión del rotor)

$R_r\left(\frac{s+1}{s}\right)$: Carga conectada al secundario.

En la Figura 16 se muestra un circuito equivalente de transformador por fase que representa la operación de un motor de inducción. Como cualquier otro transformador, hay cierta resistencia y auto inductancia en los devanados primarios (estator) que se debe representar en el circuito equivalente de la máquina. La resistencia del estator se llama R_a y la reactancia de dispersión del estator se llama jX estos dos componentes se pueden ver juntos en la entrada del modelo de la máquina. (4)

En un transformador ordinario se pueden referir las tensiones, corrientes e impedancias del lado secundario del aparato al lado primario por medio de la relación de vueltas del transformador:

$$V_P = V'_S = aV_S \quad 10.$$

$$I_P = \frac{I'_S}{a} \quad 11.$$

$$Z'_S = a^2 Z_S \quad 12.$$

Donde el superíndice prima se refiere a los valores referidos de tensión, corriente e impedancia.

Se puede realizar exactamente el mismo tipo de transformación para el circuito del rotor del motor de inducción. Si la relación efectiva de vueltas de un motor de inducción es a_{ef} .

Entonces la tensión transformada del rotor es:

$$E_1 = E'_R = a_{ef} E_{RO} \quad 13.$$

La corriente del rotor es:

$$I_2 = \frac{I_R}{a_{ef}} \quad 14.$$

Y la impedancia del rotor es:

$$Z_2 = a_{ef}^2 \left(\frac{R_R}{S} + jX_{RO} \right) \quad 15.$$

Si ahora se define.

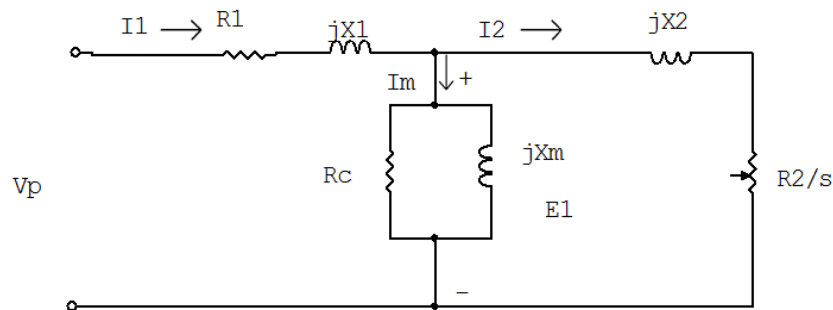
$$R_2 = a_{ef}^2 R_R \quad 16.$$

$$X_2 = a_{ef}^2 X_{RO} \quad 17.$$

Entonces el circuito equivalente por fase final es el que se muestra en Figura 17.

La resistencia del rotor (R_R) y la reactancia del rotor en estado bloqueado (X_{RO}) no son fáciles de determinar directamente en los motores de jaula de ardilla y la relación efectiva de vueltas a_{ef} también es difícil de obtener en los motores jaula de ardilla. Afortunadamente, es posible llevar a cabo mediciones que conducirán directamente a la resistencia y reactancia referidas R_2 y X_2 , aun cuando R_R , X_{RO} y a_{ef} no se conozca por separado.

Figura 17 Circuito equivalente final por fase de un motor de inducción



V_p : Voltaje de entrada en el estator.
 R_1 : Resistencia en el estator.
 I_m : Corriente de magnetización.
 jX_m : Reactancia en el núcleo.
 jX_2 : Reactancia en el rotor.

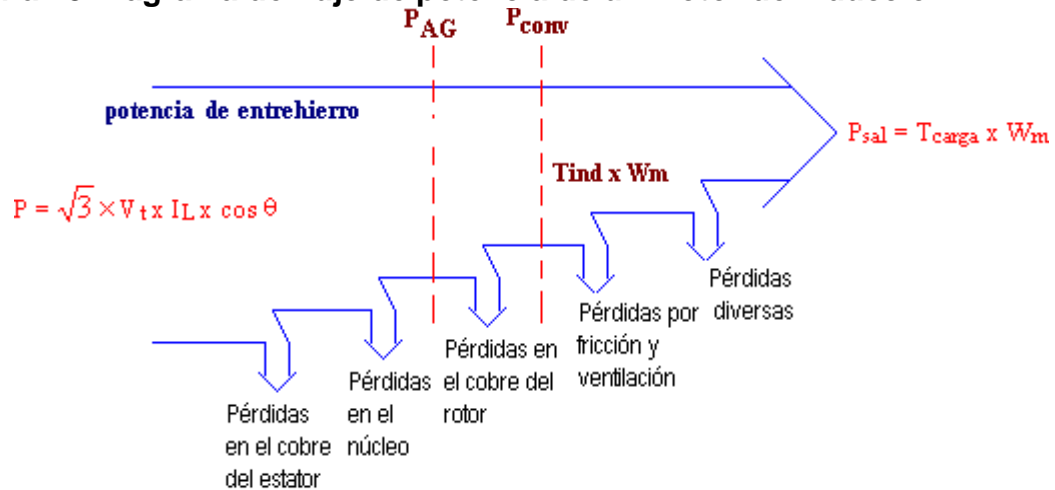
I_1 : Corriente en la bobina del estator.
 jX_1 : Reactancia en el bobinado del estator.
 R_c : Pérdidas resistivas en el núcleo.
 I_2 : Corriente en el bobinado del rotor.
 $\frac{R_2}{s}$: Carga o consumo de potencia de salida.

3.4 PÉRDIDAS Y DIAGRAMA DE FLUJO DE POTENCIA (4)

Un motor de inducción se puede describir como un transformador giratorio trifásico, en el cual sus bobinados secundarios están cortocircuitados por lo que la potencia de salida no es eléctrica como en un transformador común, sino que es mecánica.

En la siguiente figura se ilustra la relación de la potencia de entrada (eléctrica) con la potencia de salida (mecánica).

Figura 18 Diagrama de flujo de potencia de un motor de inducción



Tomado de (3)

Donde:

- P_{entr} : Es la potencia de entrada la cual se da en forma de corriente y tensión trifásica.
- P_{PCE} : Son las Pérdidas $I^2 R$ en los bobinados del estator.
- P_{nucleo} : Son las Pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas en el estator.
- P_{PCR} : Son las Pérdidas $I^2 R$ en los bobinados del rotor.
- P_{FyR} : Son las Pérdidas por rozamiento y fricción a causa del movimiento del rotor.
- P_{div} : Son las Pérdidas diversas.
- P_{sal} : Es la potencia de salida del motor, la cual es mecánica.
- P_{AG} : Es la potencia que se traslada del estator al rotor por medio del entrehierro.
- P_{conv} : Es el punto de transformación de la potencia eléctrica en mecánica.

La potencia de entrada de un motor de inducción (P_{entr}) se presenta en forma de tensiones y corrientes trifásicas. Las primeras pérdidas que se encuentran en la máquina, son las perdidas I^2R en los devanados del estator las perdidas en el cobre del estator (P_{PCE}). Luego se pierde cierta cantidad de potencia por la

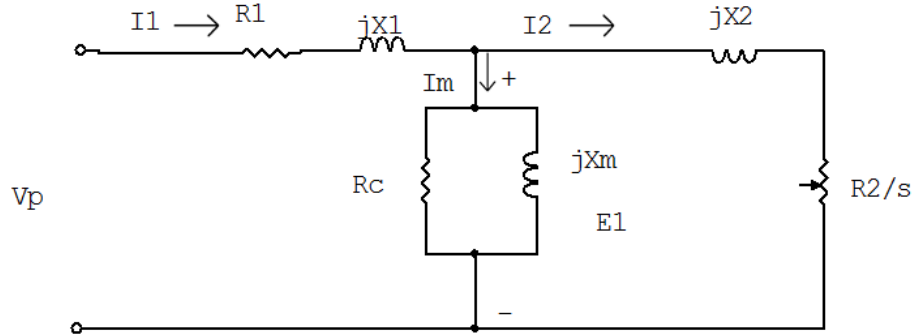
histéresis y las corrientes parasitas del estator (P_{nucleo}). La potencia restante en este punto se transfiere al rotor de la máquina a través del entrehierro entre el estator y el rotor. Esta potencia se llama potencia en el entrehierro P_{AG} de la máquina. Una vez que se transfiere la potencia al rotor, una parte de ella se corresponde a las pérdidas I^2R (las pérdidas en el cobre del rotor (P_{PCR}) y el resto se convierte de su forma eléctrica a mecánica (P_{conv}). Por último, se restan las pérdidas por fricción y rozamiento con el aire (P_{FyR}) y las pérdidas diversas o misceláneas (P_{div}) para que de esta manera la potencia restante corresponde a la potencia de salida del motor (P_{sal}).

Las pérdidas en el núcleo del circuito del rotor no siempre aparecen en el diagrama del flujo de potencia mostrado en la Figura 18. Debido a la naturaleza de las pérdidas del núcleo, es un tanto arbitrio donde se toman en cuenta en la máquina. Las pérdidas en el núcleo de un motor de inducción se deben al circuito del estator y al circuito del rotor. Puesto que un motor de inducción de manera usual opera a una velocidad cercana a la velocidad síncrona, el movimiento relativo de los campos magnéticos sobre la superficie del rotor es muy lento y las pérdidas del núcleo del rotor son muy pequeñas en comparación con las pérdidas en el núcleo del estator. Puesto que la mayor parte de estas pérdidas en el núcleo se presentan en el circuito del estator, todas las pérdidas en el núcleo se agrupan en ese punto en el diagrama. Y son representadas en el circuito equivalente por medio del resistor (R_c).

Mientras mayor sea la velocidad del motor de inducción, mayores serán las pérdidas por fricción, por rozamiento con el aire y diversas. Por otro lado, mientras mayor sea la velocidad del motor (hasta n_{sin}) menores serán las pérdidas en el núcleo. Por lo tanto a veces estas tres categorías de pérdidas se agrupan y se denominan pérdidas rotacionales. Las pérdidas rotacionales de un motor a menudo se consideran constantes frente a la velocidad variable, dado que las pérdidas que las componen cambian en dirección opuesta frente a un cambio en la velocidad.

3.5 POTENCIA Y PAR (4)

Figura 19 Circuito equivalente del motor de inducción



V_p : Voltaje de entrada en el estator.
 R_1 : Resistencia en el estator.
 I_m : Corriente de magnetización.
 jX_m : Reactancia en el núcleo.
 jX_2 : Reactancia en el rotor.

I_1 : Corriente en la bobina del estator.
 jX_1 : Reactancia en el bobinado del estator.
 R_c : Pérdidas resistivas en el núcleo.
 I_2 : Corriente en el bobinado del rotor.
 $\frac{R_2}{s}$: Carga o consumo de potencia de salida.

La Figura 19 muestra el circuito equivalente de un motor de inducción. Si se examina de cerca el circuito equivalente, se puede utilizar para deducir las ecuaciones para la potencia y el par que gobierna la operación del motor.

La corriente de entrada a una fase del motor se puede encontrar dividiendo la tensión de entrada entre la impedancia equivalente tota.

$$I_1 = \frac{V_\phi}{Z_{eq}} \quad 18.$$

$$Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{G_c - jR_m + \frac{1}{\frac{R_2}{s} + jX_2}} \quad 19.$$

Por lo tanto, se pueden encontrar las pérdidas en el cobre del estator, las pérdidas en el núcleo y las pérdidas en cobre del rotor.

Las pérdidas en el cobre del estator en las tres fases están dadas por:

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1 \quad 20.$$

Las pérdidas en el núcleo están dadas por:

$$P_{nucleo} = 3E_1^2 G_c \quad 21.$$

Por lo que la potencia en el entrehierro es de:

$$P_{AG} = P_{ind} - P_{SCL} - P_{nucleo} \quad 22.$$

Si se mira de cerca el circuito equivalente del rotor, el único elemento en el circuito equivalente donde se puede consumir potencia en el entrehierro es en el resistor R_2/s . Por lo tanto, la potencia en el entrehierro también se puede obtener así:

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad 23.$$

Las pérdidas resistivas reales en el circuito del rotor están dadas por la ecuación:

$$P_{RCL} = 3I_R^2 R_R \quad 24.$$

Puesto que la potencia no cambia cuando se refiere a través de un transformador ideal, las pérdidas en el cobre del rotor se pueden expresar como:

$$P_{RCL} = 3I_2^2 R_2 \quad 25.$$

Una vez que se restan de la potencia de entrada al motor las pérdidas en el cobre del estator, las pérdidas en el núcleo y las pérdidas en el cobre del rotor, la potencia restante se convierte de su forma eléctrica a mecánica. Esta potencia convertida, que a veces se llama potencia mecánica desarrollada, está dada por:

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} \quad 26.$$

$$P_{conv} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} - 3I_2^2 R_2 \quad 27.$$

$$P_{conv} = 3I_2^2 R_2 \frac{(1-s)}{s} \quad 28.$$

Entonces la ecuación nos queda así:

$$P_{conv} = 3I_2^2 R_2 \frac{(1-s)}{s} \quad 29.$$

En la ecuación 29 se puede apreciar que las pérdidas en el cobre del rotor son iguales a la potencia en el entrehierro multiplicada por el deslizamiento.

$$P_{RCL} = sP_{AG} \quad 30.$$

Por lo tanto, mientras menor sea el deslizamiento del motor, menores serán las pérdidas del rotor. Nótese también que si el rotor no gira, el deslizamiento es $S=1$

y el rotor consume toda la potencia en el entrehierro. Esto es lógico puesto que si el rotor no gira, la potencia de salida debe ser cero. Puesto que, esto también representa otra relación entre la potencia en el entrehierro y la potencia convertida de forma eléctrica a mecánica.

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} \quad 31.$$

$$P_{conv} = P_{AG} - sP_{AG} \quad 32.$$

$$P_{conv} = (1 - s)P_{AG} \quad 33.$$

Por último, si se conocen las pérdidas por fricción y por rozamiento con el aire y las pérdidas misceláneas, la potencia de salida se puede encontrar de la siguiente manera:

$$P_{sal} = P_{conv} - P_{F\&W} - P_{misc} \quad 34.$$

El par inducido en una máquina se definió como el par generado por la conversión de potencia interna de eléctrica a mecánica. Este par difiere del par realmente disponible en los terminales del motor por una cantidad igual a los pares de fricción y de rozamiento con el aire en la máquina. El par inducido esta dado por la ecuación:

$$T_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \quad 35.$$

A este par se le llama también par desarrollado de la máquina.

El par inducido de un motor de inducción se puede expresar también de otra forma. La ecuación $\omega_m = (1 - S)\omega_{sinc}$, expresa la velocidad real en términos de velocidad sincrónica y sustituyendo las anteriores ecuaciones da como resultado:

$$T_{ind} = \frac{(1 - s)P_{AG}}{(1 - s)\omega_{sinc}} \quad 36.$$

$$T_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sinc}} \quad 37.$$

Esta última ecuación es en particular útil porque expresa el par inducido de manera directa en términos de potencia en el entrehierro y velocidad sincrónica, lo cual no varía. El conocimiento de P_{AG} brinda automáticamente el valor de T_{ind} .

3.5.1 Separación de las pérdidas en el cobre del rotor y la potencia convertida en el circuito equivalente

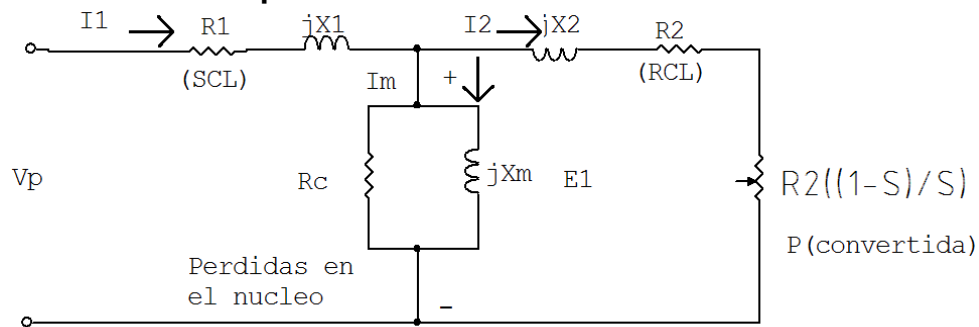
Parte de la potencia que pasa a través del entrehierro en un motor de inducción se consume en las pérdidas en cobre del rotor y parte se convierte a potencia mecánica para hacer girar el eje del motor. Es posible separar los dos usos de la potencia en el entrehierro y representarlos por separado en el circuito equivalente del motor.

La potencia en el entrehierro es la potencia que se consumirá en un resistor con valor de R_2/s , mientras que las pérdidas en el cobre del rotor es la potencia que se consumirá en un resistor con valor de R_2 . La diferencia entre ellos es P_{conv} que, por lo tanto, debe ser la potencia consumida en un resistor con valor de:

$$R_{conv} = \frac{R_2}{s} - R_2 = R_2 \left(\frac{1}{s} - s \right) \quad 38.$$

$$R_2 = R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad 39.$$

Figura 20 Circuito equivalente por fase con las pérdidas en el rotor y las pérdidas en el cobre separadas



SCL : Pérdidas en el estator.

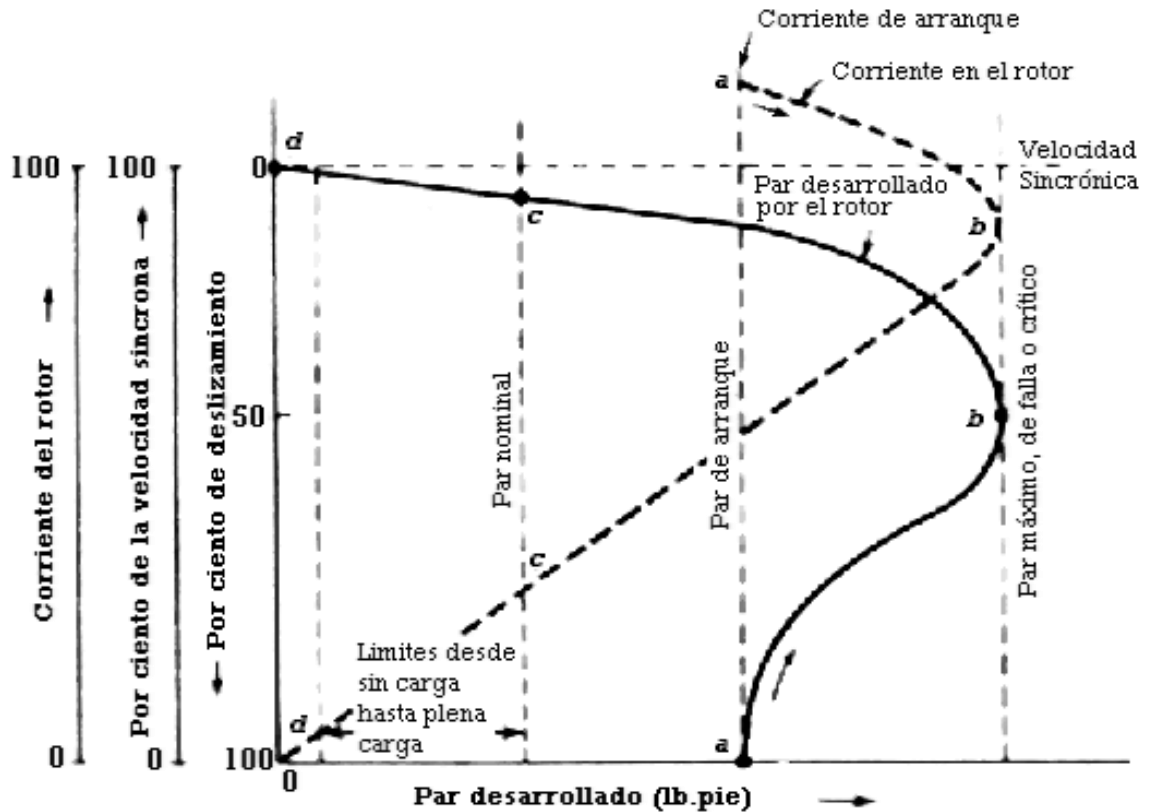
RCL : Pérdidas en el rotor.

3.6 CURVA CARACTERÍSTICA

La curva característica muestra la relación entre los pares de arranque, máximo y nominal que desarrolla un motor de inducción, como función la velocidad de éste y el deslizamiento. La

Figura 21 es la presentación gráfica de la corriente y el par desarrollados en el rotor del motor como funciones del deslizamiento desde el instante del arranque (punto a) hasta la condición de funcionamiento en estado estable (en general entre marcha en vacío y marcha a plena carga - puntos c y d) cuando los pares desarrollado y aplicado son iguales.

Figura 21 Curva característica Par vs. Velocidad, Deslizamiento y Corriente



Tomado de (2)

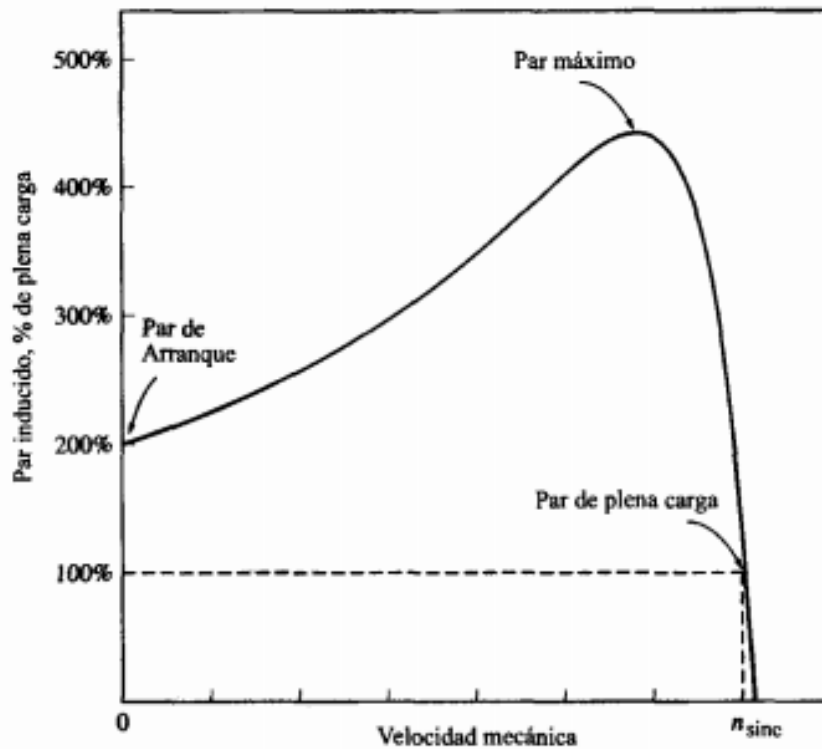
3.6.1 Comentarios sobre la curva par-velocidad de la Figura 22

La curva característica par-velocidad brinda información importante sobre la operación de los motores de inducción.

- El par inducido del motor es cero a velocidad síncrona. Este hecho se menciono anteriormente.
- En la curva par-velocidad entre vacío y plena carga, la resistencia del rotor es mucho más grande que la reactancia del rotor, por lo que la corriente del rotor, su campo magnético y el par inducido aumentan linealmente conforme aumenta el deslizamiento.
- Hay un par máximo posible que no se puede exceder. Este par, llamado par máximo o par de desviación, es dos o tres veces el par nominal a plena carga del motor.

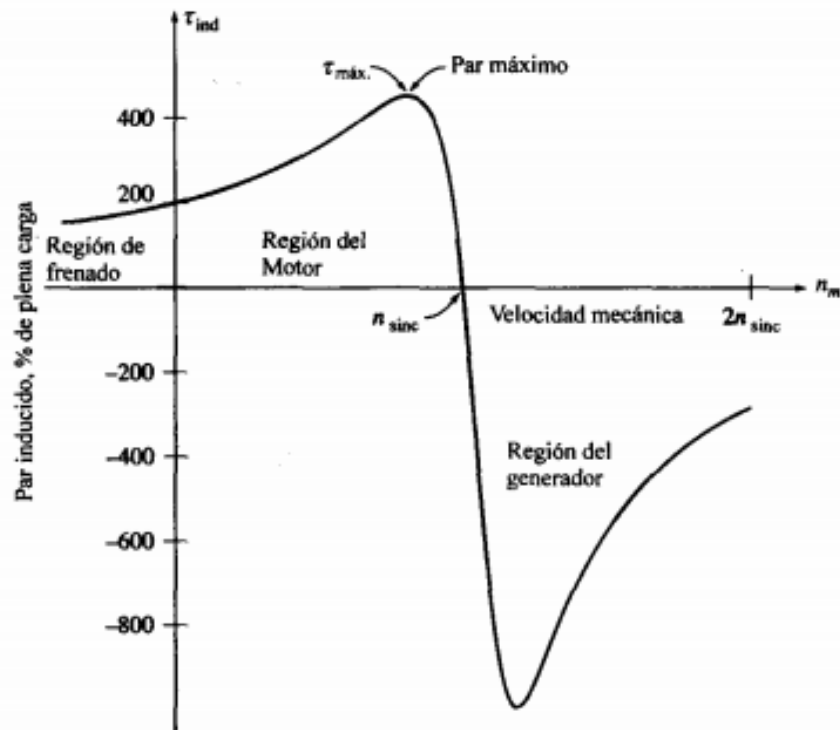
- El par de arranque del motor es un poco mayor al par a plena carga, por lo que este motor puede arrancar con cualquier carga que pueda alimentar a plena potencia.
- Nótese que el par en el motor, dado cierto deslizamiento, varía con el cuadro de la tensión aplicada. Este hecho es útil para una forma de control de velocidad de los motores de inducción.
- Si la velocidad del rotor del motor de inducción es mayor que la velocidad síncrona, se invierte la dirección del par inducido en la máquina y la máquina se convierte en generador, que transforma potencia mecánica en potencia eléctrica.

Figura 22 Curva característica Par vs. Velocidad típica



Tomado de (5)

Figura 23 Curva de característica Par vs. Velocidad (región de frenado y región de generador).



Tomado de (5)

Si el motor gira en sentido contrario en relación con la dirección de los campos magnéticos, el par inducido en la máquina detendrá rápidamente la máquina y tratará de hacerla girar en la otra dirección. Puesto que invertir la dirección de rotación de un campo magnético es cuestión de conmutar dos fases del estator, este hecho se puede utilizar para detener rápidamente el motor, se llama frenado por contracorriente.

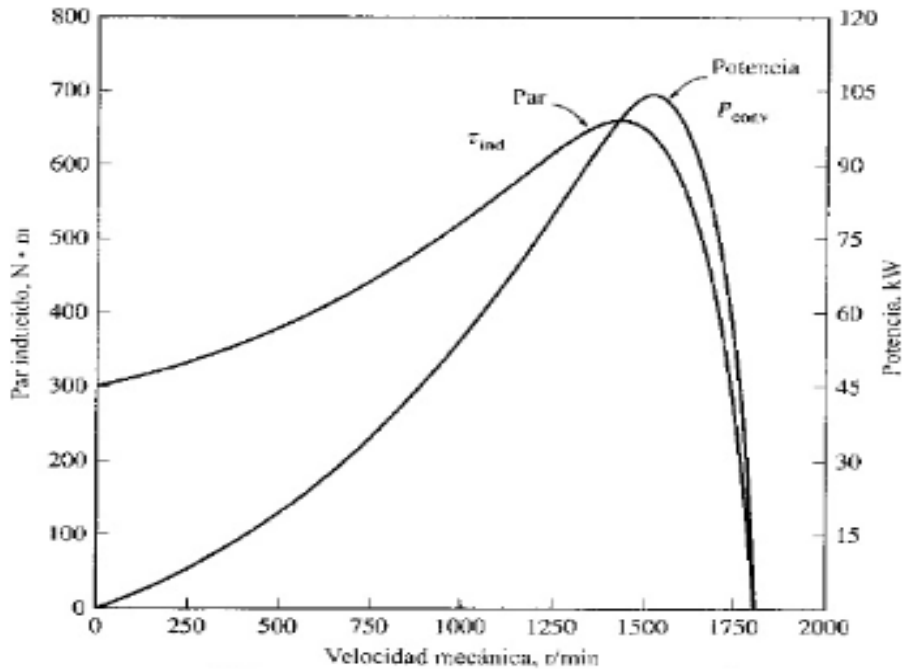
La potencia convertida a su forma mecánica en un motor de inducción es igual a

$$P_{\text{conv}} = T_{\text{ind}} \omega_m \quad 40.$$

3.7 PAR MÁXIMO (PAR DE DESVIACIÓN) (4)

En la Figura 24. Se nota que la potencia pico suministrada por el motor de inducción se presenta en una velocidad diferente a la del par máximo; y, por supuesto, cuando el rotor tiene una velocidad igual a cero no se convierte potencia a su forma mecánica.

Figura 24 Curva Par Inducido y Potencia vs. Velocidad Mecánica



Tomado de (5)

La Figura 24 muestra el par inducido y potencia convertida contra la velocidad del motor en revoluciones por minuto como ejemplo de un motor de inducción con cuatro polos.

Puesto que el par inducido es igual P_{EH}/P_{sinc} , el par máximo posible se presenta cuando la potencia en el entrehierro es máxima. Puesto que la potencia en el entrehierro es igual a la potencia consumida por el resistor $\left(\frac{R_2}{s}\right)$, el par máximo inducido se presentará cuando la potencia consumida por este resistor sea máxima.

Además en una situación donde el ángulo de la impedancia de la carga es fijo, el teorema de máxima transferencia de potencia establece que la máxima transferencia de potencia a la resistencia de carga R_2/s ocurrirá cuando la magnitud de esta impedancia sea igual a la magnitud de la impedancia de la fuente. La impedancia equivalente de la fuente en el circuito es:

$$Z_{source} = R_{TH} + jX_{TH} + jX_2 \quad 41.$$

Por tanto, la máxima transferencia de potencia ocurre cuando:

$$\frac{R_2}{s} = \sqrt{R_{TH}^2 + (jX_{TH} + jX_2)^2} \quad 42.$$

Resolviendo esta ecuación, el deslizamiento para el par máximo esta dado por:

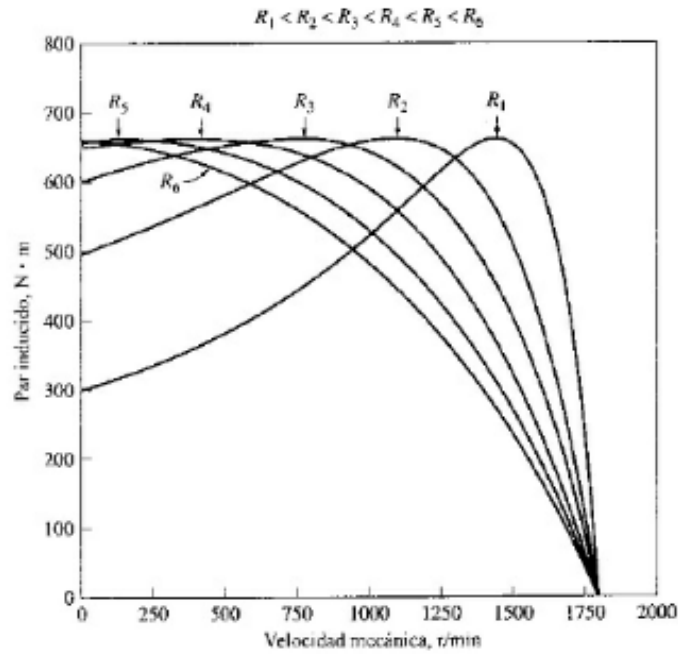
$$s_{m\acute{a}x} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad 43.$$

Se nota que la resistencia referida del rotor R_2 aparece únicamente en el numerador, de modo que el deslizamiento del rotor al par máximo es directamente proporcional a la resistencia del rotor. El valor del par máximo se puede encontrar insertado en la ecuación del par. Entonces la ecuación resultante para el par máximo es:

$$T_{m\acute{a}x} = \frac{3V_{TH}^2}{2\omega_{sinc} \left(R_2 + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \right)} \quad 44.$$

Este par es proporcional al cuadrado de la tensión de alimentación y está en relación inversa con el tamaño de la impedancia del estator y la reactancia del rotor. Cuanto menores sean las reactancias de una máquina, mayor es el par máximo que puede desarrollar. Se observa que el deslizamiento al cual ocurre el par máximo es directamente proporcional a la resistencia del rotor pero el valor del par máximo es independiente del valor de la resistencia del rotor.

Figura 25 Curva Par Inducido vs. Velocidad (variando resistencia del rotor)

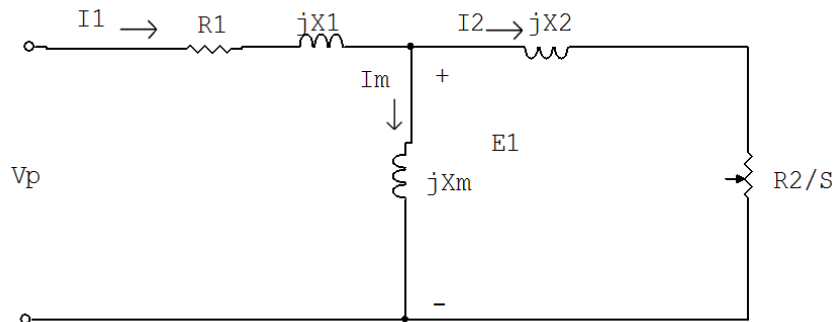


Tomado de (5)

En la Figura 25 se observa el efecto de la variación de la resistencia del rotor sobre la característica par-velocidad de un motor de inducción de rotor devanado.

3.8 MOLEDAION DEL CIRCUITO EQUIVALENTE UTILIZANDO TEOREMA DE THEVENIN (4)

Figura 26 Circuito equivalente por fase de un motor de inducción.



Aunque hay varias formas de resolver el circuito de la Figura 26, para la corriente I_2 , quizás la más fácil sea determinar el equivalente Thevenin de la porción del circuito de la izquierda de la figura. El teorema de Thevenin establece que

cualquier circuito lineal que pueda separarse del resto del sistema mediante dos terminales puede remplazarse por una sola fuente de tensión en serie con una impedancia equivalente. Si se aplicara esto al circuito equivalente del motor de inducción, el circuito resultante sería una simple combinación de elementos en series.

Para calcular el equivalente de Thevenin del lado de entrada del circuito equivalente del motor de inducción, primero se abre los terminales del circuito en las X y se halla la tensión del circuito abierto resultante allí. Luego, para encontrar la impedancia de Thevenin, se cortocircuita la fuente de tensión de fase y se encuentra la Z_m vista hacia dentro de los terminales.

$$V_{TH} = V_{\phi} \frac{Z_M}{Z_M + Z_1} \quad 45.$$

$$V_{TH} = V_{\phi} \frac{jX_M}{R_1 + jX_M + jX_1} \quad 46.$$

La magnitud de la tensión de Thevenin V_{th} es:

$$V_{TH} = V_{\phi} \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} \quad 47.$$

Puesto que la reactancia de magnetización $X_M \gg X_1$ y $X_M \gg R_1$, la magnitud de la tensión de Thevenin es aproximadamente.

$$V_{TH} = V_{\phi} \frac{X_M}{X_M + X_1} \quad 48.$$

Figura 27 Tensión equivalente de Thevenin en el circuito de entrada de un motor de inducción.

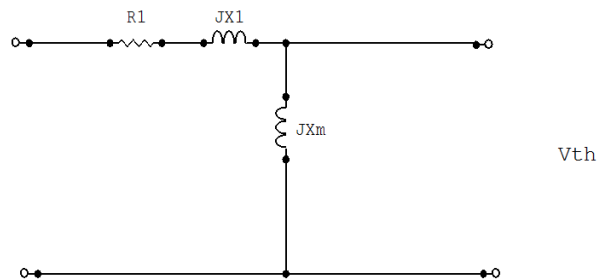


Figura 28 Impedancia equivalente de Thevenin en el circuito de entrada

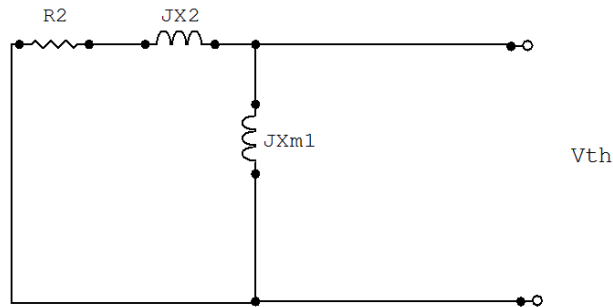
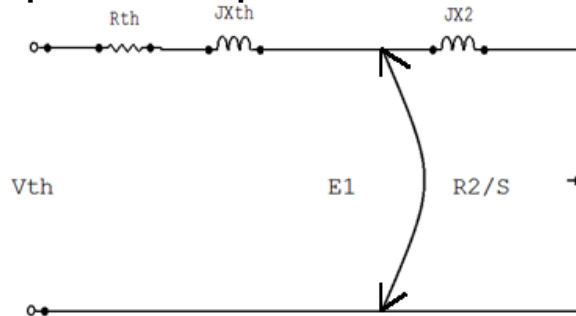


Figura 29 Circuito equivalente simplificado



En la Figura 26, muestra el circuito de entrada cuando la tensión de la fuente de entrada está cortocircuitada. Las dos impedancias están en paralelo y la impedancia de Thevenin está dado por:

$$Z_{TH} = \frac{Z_1 Z_M}{Z_1 + Z_M} \quad 49.$$

La impedancia se reduce a:

$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} = \frac{jX_M(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)} \quad 50.$$

Debido a que $X_m \gg X_i$ y $X_m + X_i \gg R_i$, la resistencia y la reactancia de Thevenin están dadas aproximadamente por

$$R_{TH} = R_1 \left(\frac{X_M}{X_1 + Z_M} \right)^2 \quad 51.$$

$$X_{TH} = X_1 \quad 52.$$

El circuito equivalente resultante se muestra en la Figura 29.

En el circuito de la Figura 29, la corriente I_2 esta dad por:

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{Z_{TH} + Z_2} \quad 53.$$

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{R_{TH} + \frac{R_2}{s} + jX_{TH} + jX_2} \quad 54.$$

La magnitud de esta corriente es:

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad 55.$$

La potencia en el entrehierro está dada por:

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad 56.$$

$$P_{AG} = \frac{3I_2^2 \frac{R_2}{s}}{\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad 57.$$

Y el par inducido al rotor esta dado por:

$$T_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sinc}} \quad 58.$$

$$T_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 \frac{R_2}{s}}{\omega_{sinc} \left(\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right)} \quad 59.$$

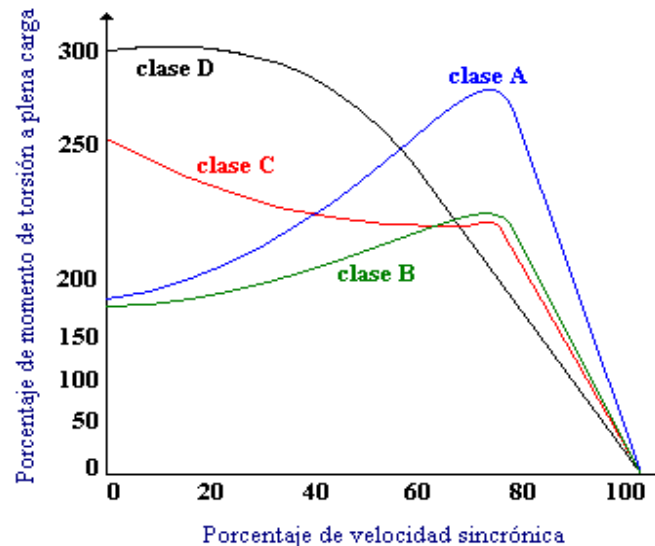
3.9 CLASES (6)

En las máquinas de inducción es posible producir una gran variedad de curvas de torsión – velocidad, variando las características del rotor, lo que resulta de gran ayuda a la industria a la hora de escoger los motores más apropiados para la gran variedad de aplicaciones. NEMA en Estados Unidos y la International Electrotechnical Commission (IEC) tienen definidos, en toda la gama de caballos de fuerza, una serie de diseños normalizados con diferentes curvas de momento de torsión – velocidad.

Estos diseños normalizados se conocen como clases de diseño y a un solo motor se le puede denominar como "motor de diseño de la clase X". En la siguiente figura pueden verse una serie de curvas de momento de torsión – velocidad típica para las cuatro clases de diseños normalizados de NEMA.

Los rasgos característicos de cada clase de diseño normalizado se esbozan a continuación:

Figura 29 Los rasgos característicos de cada clase de diseño normalizado



Tomado de (5)

3.9.1 Jaula de ardilla clase A

El motor clase A es un motor de jaula de ardilla normal o estándar fabricado para uso a velocidad constante. Tiene grandes áreas de ranuras para una muy buena disipación de calor, y barras con ranuras ondas en el motor. Durante el periodo de arranque, la densidad de corriente es alta cerca de la superficie del rotor; durante el periodo de la marcha, la densidad se distribuye con uniformidad. Esta diferencia origina algo de alta resistencia y baja reactancia de arranque, con lo cual se tiene un par de arranque entre 1.5 y 1.75 veces el nominal (a plena carga). El par de arranque es relativamente alto y la baja resistencia del rotor produce una aceleración bastante rápida hacia la velocidad nominal. Tiene la mejor regulación de velocidad pero su corriente de arranque varía entre 5 y 7 veces la corriente nominal normal, haciéndolo menos deseable para arranque con línea, en especial en los tamaños grandes de corriente que sean indeseables.

3.9.2 Jaula de ardilla clase B

A los motores de clase B a veces se les llama motores de propósito general; es muy parecido al de la clase A debido al comportamiento de su deslizamiento-par. Las ranuras de su motor están embebidas algo más profundamente que los motores de clase A y esta mayor profundidad tiende a aumentar la reactancia de arranque y la marcha del rotor. Este aumento reduce un poco el par y la corriente de arranque.

Las corrientes de arranque varían entre 4 y 5 veces la corriente nominal en los tamaños mayores de 5 HP se sigue usando arranque a tensión reducida. Los motores de clase B se prefieren sobre los de la clase A para tamaños mayores.

Las aplicaciones típicas comprenden las bombas centrífugas de impulsión, las máquinas herramientas y los sopladores.

3.9.3 Jaula de ardilla clase C

Estos motores tienen un rotor de doble jaula de ardilla, el cual desarrolla un alto par de arranque y una menor corriente de arranque.

Debido a su alto par de arranque, acelera rápidamente, sin embargo cuando se emplea en grandes cargas, se limita la disipación térmica del motor por que la mayor parte de la corriente se concentra en el devanado superior.

En condiciones de arranque frecuente, el rotor tiene tendencia a sobre calentarse se adecua mejor a grandes cargas repentinas pero de tipo de baja inercia.

Las aplicaciones de los motores de clase C se limitan a condiciones en las que es difícil el arranque como en bombas y compresores de pistón

3.9.4 Jaula de ardilla clase D

Los motores comerciales de inducción de jaula de ardilla clase D se conocen también como de alto par y alta resistencia.

Las barras del rotor se fabrican en aleación de alta resistencia y se colocan en ranuras cercanas a la superficie o están embebidas en ranuras de pequeño diámetro. La relación de resistencia a reactancia del rotor de arranque es mayor que en los motores de las clases anteriores.

Este motor está diseñado para servicio pesado de arranque, encuentra su mayor aplicación con cargas como cizallas o troqueles, que necesitan el alto par con aplicación a carga repentina la regulación de velocidad en esta clase de motores es la peor.

3.9.5 Jaula de ardilla de clase F

También conocidos como motores de doble jaula y bajo par. Están diseñados principalmente como motores de baja corriente, porque necesita la menor corriente de arranque de todas las clases. Tiene una alta resistencia del rotor tanto en su devanado de arranque como en el de marcha y tiende a aumentar la impedancia de arranque y de marcha, y a reducir la corriente de marcha y de arranque.

El rotor de clase F fue diseñado para remplazar al motor de clase B. El motor de clase F produce pares de arranque aproximadamente 1.25 veces el par nominal y bajas corrientes de arranque de 2 a 4 veces la nominal. Los motores de esta clase se fabrican de la capacidad de 25 hp para servicio directo de la línea. Debido a la resistencia del rotor relativamente alta de arranque y de marcha, estos motores tienen menos regulación de tensión que los de clase B, bajan capacidad de sobrecarga y en general de baja eficiencia de funcionamiento. Sin embargo, cuando se arrancan con grandes cargas, las bajas de corrientes de arranque eliminan la necesidad de equipo para tensión reducida, aún en los tamaños grandes.

Tabla 2 Características de los motores comerciales de inducción de jaula de ardilla de acuerdo con la clasificación en letras NEMA.

Clase	Par de Arranque (# veces el nominal)	Corriente de Arranque	Regulación de Velocidad	Nombre de Clase de Motor
A	1,5 - 1,75	5- 7	2 – 4	Nominal
B	1,4 – 1,6	4,5 – 5	3,5	De propósito General
C	2 – 2,25	3.5 – 5	4 – 5	De doble jaula alto par
D	2,25 – 3	3 – 8	5 – 8, 8 – 13	De alto par alta resistencia
F	1,25	2 – 4	Mayor de 5	De doble jaula, bajo par y baja corriente de arranque

3.10 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Estas pruebas se les hacen a los motores para una verificación de sus datos de placa y se realizan siguiendo las normas establecidas por NEMA (Association National Electrical Manufactures Association, norma que define un producto, proceso o procedimiento eléctrico; con referencia, a su construcción, dimensiones, características de operación, seguridad; entre otros) en el campo internacional de normas y así determinar los parámetros del circuito equivalente del motor de inducción.

Pruebas que se realizaran:

1. Prueba de funcionamiento
2. Prueba de corriente directa CD
3. Prueba de en vacio
4. Prueba de rotor bloqueado
5. Prueba sintéticas

3.10.1 Prueba de funcionamiento

El propósito es determinar la eficiencia, factor de potencia, distribución de pérdidas y deslizamiento del motor.

Para cada par leído se toman los siguientes datos:

- a. Volts
- b. Amperes
- c. Watts de entrada
- d. R.P.M

Cuando no se toman los watts de entrada se toman el FP y los watts se calculan por medio de la siguiente ecuación.

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \theta \quad 60.$$

Donde:

P_1 : Potencia de entrada

V_1 : Tensión de alimentación

I_1 : Corriente de entrada

θ : Angulo de FP de entrada

Entonces se pone en marcha y se carga hasta que el par que entrega sea de un 115% durante un tiempo aproximado de una hora para lograr una estabilidad en su temperatura. Posteriormente se sobrecarga hasta un 130% y se tomas lecturas escalonadas.

Luego, los cálculos para la tabulación de los demás datos se hacen mediante las siguientes ecuaciones.

- Deslizamiento

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} \cdot 100 \quad 61.$$

Donde:

S: Deslizamiento

N_s : Velocidad sincrona

N: Velocidad del rotor

- Potencia de salida

Potencia convertida:

$$P_{conv} = 3 \cdot I_2 \cdot R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad 62.$$

Potencia de fricción y rozamiento: se obtienen de la prueba de saturación en vacío

Por tanto:

$$P_{sal} = P_{conv} - P_{FyR} - P_{misc} \quad 63.$$

Donde:

P_{sal} : Potencia de salida

P_{conv} : Potencia convertida

P_{FyR} : Potencia de fricción y rozamiento

P_{misc} : Potencia misceláneas

3.10.2 Prueba CD

La resistencia del rotor R_2 juega un papel crítico en la operación de un motor de inducción. Entre otras cosas, R_2 determina la forma de la curva par-velocidad al establecer la velocidad a la cual ocurre el par máximo. Para determinar la resistencia total del circuito del motor, se puede aplicar al motor una prueba estándar llamada prueba de motor bloqueado (esta prueba se detalla más adelante) sin embargo, esta prueba determina solo la resistencia total. Para encontrar la resistencia aproximada del rotor R_2 es necesario conocer R_1 del modo que esta se pueda restar de la total.

El procedimiento de la prueba CD básicamente se aplica una tensión en los devanados del estator del motor de inducción. Puesto que la corriente es CD, no hay tensión inducida en el circuito del rotor y este no fluye corriente resultante. Así mismo, la reactancia a corriente directa del motor es cero. Entonces la única cantidad que limita el flujo de corriente en el motor es la resistencia del estator, y por tanto, esta puede ser determinada.

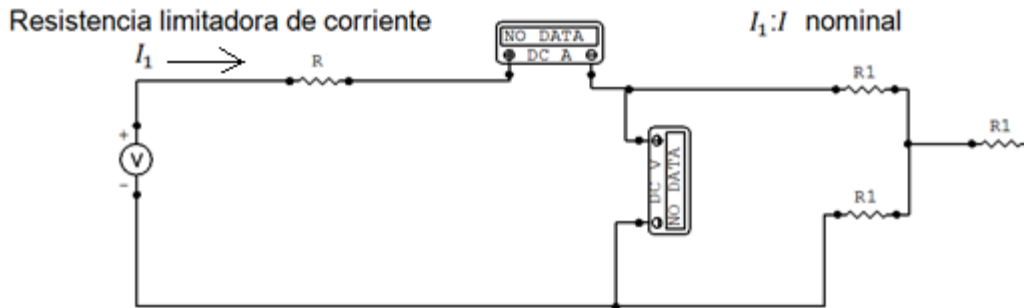
En la Figura 30 se muestra una fuente de potencia DC conectada a dos de los tres terminales de un motor de inducción conectado en Y. para realizar la prueba, se ajusta la corriente del estator a la tensión nominal y se mide la tensión en los terminales. La corriente en los devanados del estator se ajusta al calor nominal para que los devanados se calienten a la misma temperatura que tendrían durante la operación normal (recuerde que la resistencia del devanado es función de la temperatura).

En la Figura 30 la corriente fluye a través de dos devanados, de modo que la que la resistencia total en camino de la corriente es $2R_2$, entonces:

$$2R_1 = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \quad 64.$$

$$R_1 = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}} \quad 65.$$

Figura 30 Circuito para el montaje de la prueba DC.



Conociendo este valor de R_1 se pueden determinar las pérdidas en el cobre del estator en vacío; las pérdidas rotacionales se pueden deducir de la diferencia entre la potencia de entrada en vacío y las pérdidas en el cobre del estator.

El valor de R_1 calculado de esta forma no es muy preciso puesto que se desprecia el efecto particular que ocurre cuando se aplica tensión CA los devanados.

3.10.3 Prueba de saturación en vacío

La prueba en vacío de un motor de inducción mide las pérdidas rotacionales del motor y brinda información sobre su corriente de magnetización.

En el procedimiento de la prueba de saturación en vacío, el motor se pone en marcha y se lleva hasta una tensión de 125% del nominal, posteriormente se va reduciendo este de 20 en 20 hasta llegar al mínimo posible. Se toman lecturas de tensiones, corrientes y potencia. Para ello se conecta los vatímetros, el voltímetro y tres amperímetros al motor de inducción, al que se le permite girar libremente. La única carga en motor son las pérdidas por fricción y por rozamiento del aire, por lo que toda la P_{conv} del motor se consume en pérdidas mecánicas y el deslizamiento del motor es muy pequeño (tal vez hasta 0.001 a menos). Con este deslizamiento tan pequeño, la resistencia que corresponde a la potencia convertida, $R_2(1-s)/s$ es mucho mayor que la resistencia que corresponde a las pérdidas en cobre del rotor R_2 y mucho mayor que la reactancia del rotor X_2 ; reduciéndose así el circuito equivalente:

Figura 31 Circuito para al montaje de la prueba en vacío.

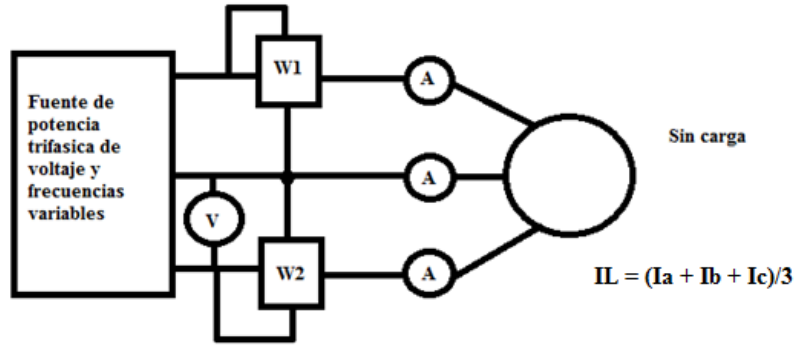
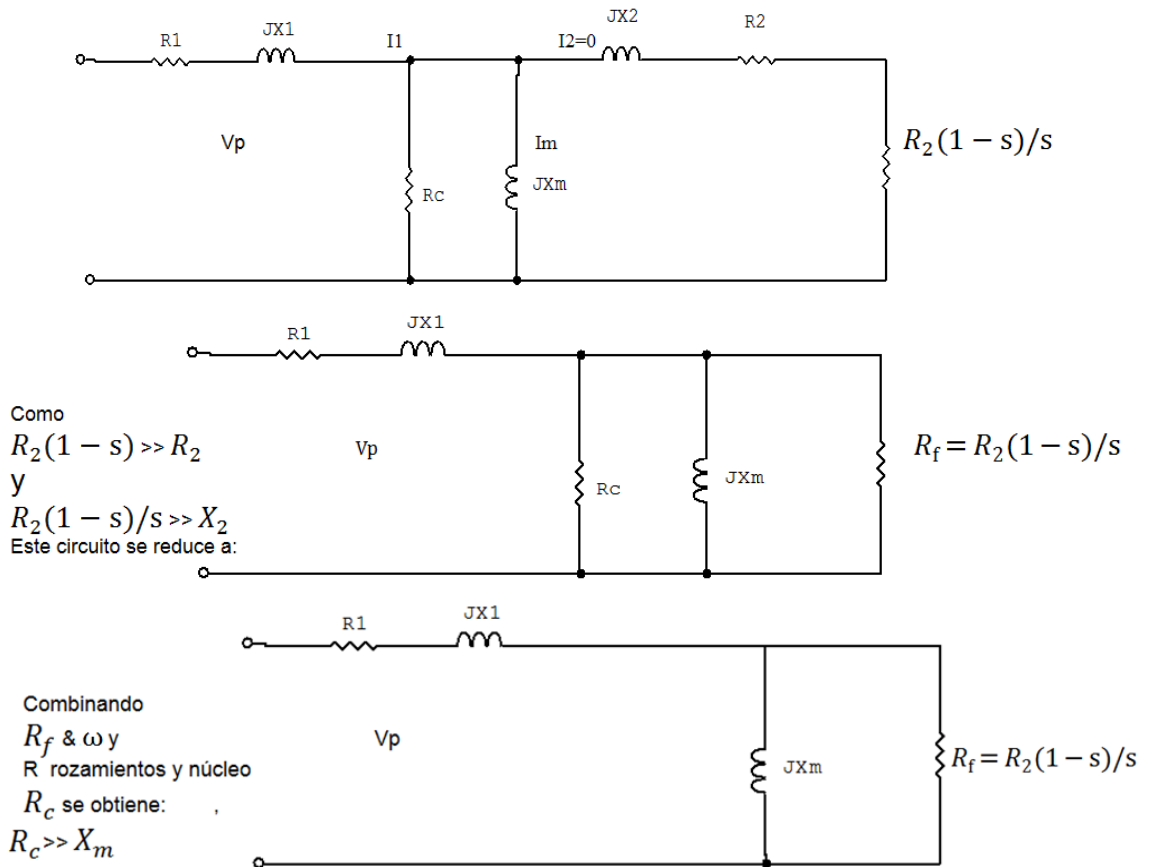


Figura 32 Circuito equivalente de la prueba en vacío



Distribución de pérdidas.

En este motor en condiciones de vacío, la potencia de entrada medida por los vatímetros debe ser igual a las pérdidas en el motor, las pérdidas en el cobre del rotor son despreciables porque la corriente I_2 es extremadamente pequeña

(debido a la gran resistencia de carga $R_2(1-s)/s$, por lo que se puede despreciar.

Las pérdidas en el cobre del estator están dadas por:

$$P_{PCE} = 3I^2R^2 \quad 66.$$

Por lo que la potencia de entrada debe ser igual a:

$$P_{entr} = P_{PCE} + P_{nucl} + P_{FyR} + P_{misc} \quad 67.$$

$$P_{entr} = 3I^2R^2 + P_{rot} \quad 68.$$

Donde P_{rot} son las perdidas rotacionales del motor.

$$P_{rot} = P_{nucl} + P_{FyR} + P_{misc} \quad 69.$$

$$\text{Si } R_2 \ll R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \rightarrow P_{ag} = P_{conv}$$

Aislando las pérdidas del núcleo a las perdidas mecánicas tenemos que:

$$P_{conv} = P_{mecanicas} + P_{nucleo}, \quad 70.$$

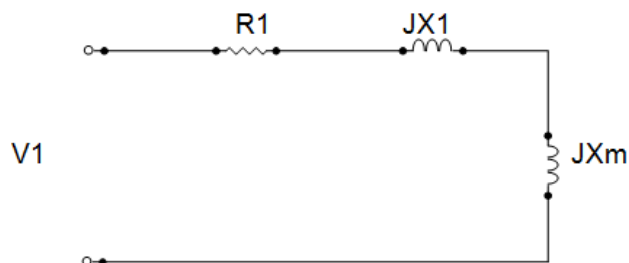
Entonces

$$P_{conv} = P_{ag} \quad 71.$$

$$\text{Si el motor es } Y \rightarrow I_1 = I_L \quad \text{Si el motor es } \Delta \rightarrow I_1 = I_L/\sqrt{3}$$

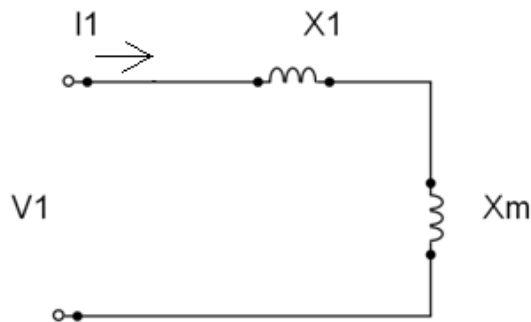
Si se dice que $R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \gg 0$, $I = 0$; el circuito queda

Figura 33 Si se dice que $R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \gg 0$, $I = 0$



$$\frac{V1}{I1} = X1 + X$$

Figura 34 Si $R_2 \left(\frac{1-s}{s}\right) \ll 0$, $\frac{V_1}{I_1} = X_1 + X_m$; el circuito queda:



3.10.4 Prueba a rotor bloqueado

Esta prueba corresponde a la prueba de cortocircuito de un transformador. En esta prueba se bloquea o enclava el rotor para que no se mueva, se aplica una tensión al motor y se mide la tensión, la corriente y la potencia resultante.

El procedimiento de la prueba a rotor bloqueado es básicamente aplicar una tensión de CA al estator y se ajusta el flujo de corriente para que sea aproximadamente su valor a plena carga y se mide la tensión, la corriente y la potencia que fluye en motor. Nótese que puesto que el rotor no se mueve, el deslizamiento $s = 1$ y por tanto la resistencia del rotor R_2/s es igual a R_2 (un valor bastante pequeño). Puesto que R_2 y X_2 son tan pequeños, luego toda la corriente de entrada fluye a través de ellos, en lugar de a través de la reactancia de magnetización X_M que es mucho más grande. Por lo tanto, el circuito en estas circunstancias se ve como una combinación en serie de X_1 , R_1 , X_2 y R_2 .

Y una vez que se fija la tensión y la frecuencia para la prueba, se ajusta rápidamente el flujo de corriente en el motor a un valor cerrado al valor nominal y se mide la potencia de entrada, la tensión y la corriente antes de que el rotor se caliente demasiado.

La potencia de entrada es dada por:

$$P_{ent} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta \quad 72.$$

Figura 35 Diagrama montaje prueba rotor bloqueado

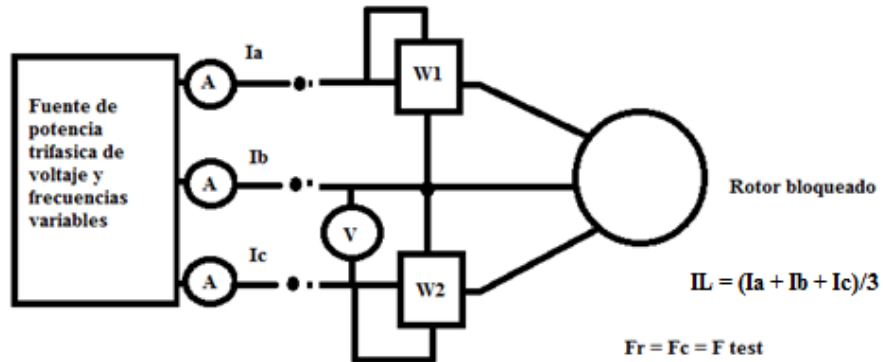
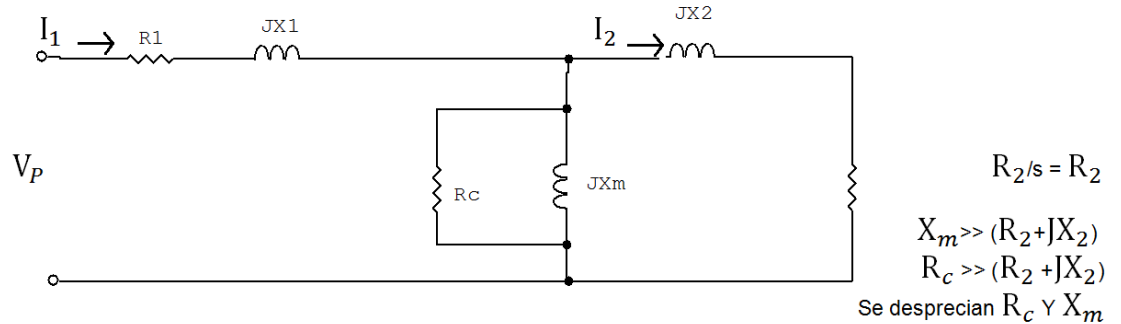


Figura 36 Circuito equivalente de la prueba de rotor bloqueado



Por lo que el factor de potencia del rotor bloqueado es:

$$FP = \cos \theta = (P_{ent}) / (\sqrt{3} V_L I_L) \quad 73.$$

Y el ángulo de impedancia θ es igual a $\cos^{-1} FP$.

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

$$|Z_{RB}| = \frac{V_{\theta}}{I_L} = \frac{P_{ent}}{\sqrt{3} V_L I_L} \quad 74.$$

Y el ángulo de impedancia total es θ . Por lo tanto:

$$Z_{RB} = R_{RB} + jX'_{RB} \quad 75.$$

$$Z_{RB} = |Z_{RB}| \cos \theta + j|Z_{RB}| \sen \theta \quad 76.$$

La resistencia del rotor bloqueado R_{RB} es:

$$R_{RB} = R_1 + R_2 \quad 77.$$

Y la reactancia del rotor bloqueado X'_{RB} es:

$$X'_{RB} = X'_1 + X'_2 \quad 78.$$

Donde:

X'_1 y X'_2 , son las reactancias del estator y del rotor con la frecuencia de la prueba Respectivamente.

Ahora se puede calcular la resistencia del rotor R_2 como:

$$R_2 = R_{RB} - R_1 \quad 79.$$

La reactancia total del rotor referida al estator también se puede calcular. Puesto que la reactancia es directamente proporcional a la frecuencia, la reactancia total equivalente con la frecuencia nominal de operación es:

$$X_{RB} = \left(\frac{f_{nom}}{f_{prueba}} \right) X'_{RB2} = X_1 + X_2 \quad 80.$$

Desafortunadamente no hay una forma sencilla de separar las construcciones de las reactancias del rotor y del estator. Con el paso de los años se ha demostrado que los motores con cierto tipo de diseño tienen ciertas proporciones entre la reactancia del estator y del rotor. En la figura se muestra. En la práctica normal no importa cómo se separe X_{RB} , puesto que la reactancia aparece como la suma de $X_{RB} + X_{RB}$ en todas las ecuaciones para el par.

3.10.5 Pruebas sintéticas a motores de inducción

Las pruebas a los motores de inducción bajo carga se pueden realizar usando el método de cargas sintéticas.

Este método tiene considerables méritos en lo que a equipo utilizado se refiere. Los problemas asociados con las pruebas de carga son los siguientes.

- a) El dispositivo de carga y el equipo de generación ó fuente serán equivalentes 6 más grandes que el motor que se está probando.
- b) Montar el motor, alinearlos, y acoplarlos a la carga son trabajos que se tienen que hacer antes de iniciar una prueba. Este es tiempo que se consume especialmente en grandes motores en los de alta velocidad y motores verticales.

- c) La energía consumida durante la prueba es desperdiciada en forma de calor. Esta energía es equivalente a la potencia de la máquina multiplicada por el tiempo requerido para estabilizar la temperatura.

Todos estos problemas aumentan con el tamaño del motor que se está probando.

Una prueba con cargas sintéticas en la que dos frecuencias se aplican simultáneamente al motor equivalen a tener cargado el motor en la flecha. En principio aunque no detalladamente es análogo a operar un motor sincrónico sin carga y sobre excitado. El método de las dos frecuencias fue primeramente propuesto por Ytterberg y ha sido usado en Europa y Japón. Esta prueba no ha sido aceptada en la IEEE aunque ha sido usada en ocasiones en los E.U. y ha sido recomendada como una posible adición al código de pruebas americanas. Aquí presentaremos una evaluación de este método.

Descripción de la prueba y teoría.

Esta prueba requiere de la aplicación simultáneamente de dos frecuencias al motor que se va a probar. Una frecuencia nominal y una tensión nominal deberán ser suministradas por una fuente y una fuente auxiliar deberá alimentar otra frecuencia y otra tensión, será puesta en serie con el de la fuente nominal. Una combinación de 60 y 50 ciclos da una combinación buena.

Una manera de entender el método de las dos frecuencias es verlo desde dos puntos de vista El primero es para considerar la máquina en estado estable. Aun que esto no es rigurosamente correcto.

Consideremos primero la máquina vista desde la fuente primaria y después desde la fuente auxiliar. Puesto que la velocidad promedio de la máquina durante la prueba es solo más baja ligeramente que su velocidad sincrónica la fuente primaria está suministrando una carga muy ligera mientras que el motor de prueba opera como un generador respecto a la fuente auxiliar la máquina trabaja a un deslizamiento negativo con respecto a la fuente auxiliar.

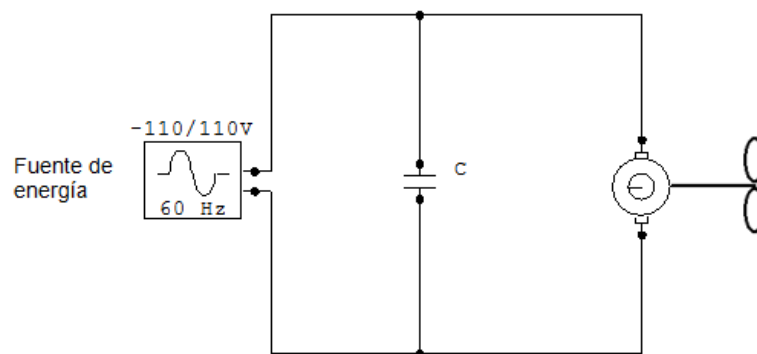
El problema se puede ver tratando cada corriente por separado. Esto pudiera hacerse si el rotor de la máquina tuviera una inercia grande. Tal que el deslizamiento fuera constante.

3.11 MÁQUINA DE INDUCCIÓN COMO GENERADOR (7)

La teoría establece que cualquier generador se puede utilizar como motor y viceversa. Es una alternativa viable entonces tomar un motor común de inducción para la generación de electricidad. De hecho la mayoría de turbinas eólicas del mundo utilizan un generador de inducción trifásico (de jaula bobinada), también llamado generador de inducción, para generar corriente alterna. Fuera de la

industria eólica y de las pequeñas unidades hidroeléctricas, este tipo de generadores no está muy extendido; aunque de todas formas, el mundo tiene una gran experiencia en tratar con ellos: Lo curioso de este tipo de generador es que fue inicialmente diseñado como motor eléctrico. Sin embargo para utilizar un motor de inducción como generador se debe tomar una consideración fundamental. Se debe llevar el motor a girar más rápidamente que su velocidad nominal o de placa (dada en rpm) para vencer el deslizamiento de la máquina. También se muestra el banco de capacitores, los cuales después del arranque le brindan la potencia reactiva al Motor de Inducción para poder funcionar.

Figura 37 Esquema de un motor de inducción utilizado como generador



“Los motores de inducción no tienen ninguna conexión física entre la bobina del estator y el rotor. La electricidad que fluye en el rotor se da debido a que el campo magnético en la bobina del estator está girando a una velocidad mayor que la del rotor.”

Por ejemplo para un MI de 4 polos la velocidad sincrónica son 1800 rpm, mientras que el rotor está girando a una velocidad menor, puede ser de 1725 rpm (considerando un deslizamiento del 5% que es lo usual en la zona de operación nominal). La diferencia de velocidades induce una corriente en el rotor de la máquina. Cuando se esté utilizado como generador, el motor debe girar entre un 4% y un 5% más rápido que su velocidad sincrónica. Para un motor de 4 polos esto viene a ser aproximadamente 1880 rpm, aunque puede variar dependiendo del nivel de carga del mismo. Cuando la velocidad de giro es exactamente correcta, el motor producirá energía a 60 Hz. En el caso de las MCH, según la experiencia de empresas visitadas y fuentes consultadas, la aplicación de MI como generadores se encuentra entre 2 kW y 15 kW aproximadamente. A pesar de todo el uso de motores como generadores proporciona ciertas ventajas entre las que se encuentran:

- Se consiguen fácilmente en el mercado local.
- Se puede adquirir en el mercado por menos costo que su equivalente síncrono.
- Los motores de inducción son robustos y tienen una construcción simple, no tiene escobillas que se desgasten ni anillos deslizantes en su rotor.
- Las máquinas de inducción son completamente cerradas, de modo que aseguran la protección contra el polvo y el agua.
- Los motores de inducción se pueden obtener en un amplio rango de potencias para el trabajo en sistemas aislados.

Y entre sus desventajas se pueden mencionar:

- No siempre están disponibles con los rangos de tensión adecuada para ser útiles como generadores, por lo que podría ser necesario hacer modificaciones en la conexión de los devanados o, en casos muy extremos, rebobinar.
- A diferencia del generador síncrono, que puede ser suministrado listo para su uso, la máquina de inducción no trabajará si no se le conecta un banco de condensadores de un valor adecuado a calcular. Esto permite que inicie la generación de energía.

3.12 FORMAS DE ARRANQUE (7)

Los motores de inducción no tienen los mismos problemas de arranque que los motores síncronos. En muchos casos los motores de inducción se pueden poner en marcha con simplemente conectarlos a la línea de potencia. Sin embargo. En algunos casos hay muy buenas razones para no hacerlo de esta manera. Por ejemplo, la corriente de arranque requerida puede causar una caída en la tensión de sistema de potencia.

3.12.1 Arranque a tensión reducida con resistor o reactor primarios

Si se introduce un resistor en serie con cada una de las conexiones del estator o primarias de la línea, la gran corriente de arranque produce una reducción inmediata de tensión aplicada a los terminales del estator, pero la corriente de línea se reduce solo en proporción a la reducción de la tensión de línea. Empleando una resistencia o reactancia en el primario la reducción en la tensión del estator aumenta debido a la reducción en la tensión del estator al momento de arrancar se produce la reducción en el par de arranque que se indica.

El arranque a tensión reducida mediante una resistencia en serie con el estator mejora el factor de potencia al arranque, pero se producen pérdidas algo mayores; y el par máximo no es tan grande para la misma impedancia en serie con un factor equivalente.

3.12.2 Arranque a tensión reducida con auto transformador

Se pueden poner en marcha los motores trifásicos comerciales de inducción de jaula de ardilla a tensión reducida empleando un auto transformador trifásico único o compensador, o bien con tres autotransformadores monofásicos.

Las salidas del transformador varían del 50 al 80% de la tensión nominal. Si el motor no puede acelerar la carga a tensión mínima, se puede probar con salidas de mayor tensión hasta que se obtenga el par adecuado y deseado de arranque; el interruptor de tres polos doble tiro se lleva a la posición de arranque y se deja ahí hasta que el motor ha acelerado la carga casi hasta la velocidad nominal. A continuación se pasa rápidamente a la posición de marcha, en la cual queda conectado el motor en la línea directamente.

El arrancador compensador solo se utiliza durante el periodo de arranque y su capacidad de corriente se basa en ese trabajo intermitente, y por lo tanto es algo menor que la de un transformador de capacidad equivalente que podría emplearse para suministrar un motor de inducción en forma continua desde una fuente de mayor tensión.

El auto transformador funciona de dos maneras:

- Para reducir la corriente de arranque del motor mediante una reducción de la tensión.
- Reduciendo la corriente de arranque mediante la relación de vuelta del transformador bajo la cual la corriente de línea es menor que la del secundario del motor. Dado que la relación de vueltas representa también la relación de tensión, por lo tanto se reduce la corriente de arranque de la línea, por consiguiente en proporción al cuadrado de la relación de vueltas.

Ya que el interruptor se usa solo en forma intermitente, se tiene un ahorro (eliminación de un transformador) si se usan dos transformadores en delta abierta. Este arreglo produce un ligero desbalance de corriente en la toma central de un 10 a 15% de la corriente de arranque, pero este desbalance no es excesivo y no afecta materialmente al funcionamiento del motor.

3.12.3 Arranque en estrella – delta

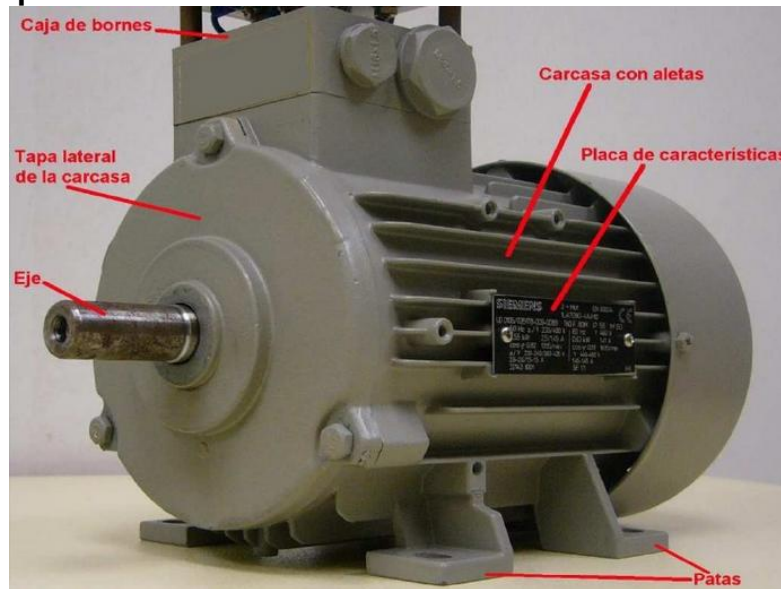
La mayor parte de los motores polifásicos se devanan con sus estatores conectados en delta. Existen fabricantes que ofrecen motores de inducción con el principio y el final de cada devanado de fase en forma saliente, con fines de conexión externa. En el caso de motores trifásicos se pueden conectar a la línea ya sea en estrella o en delta cuando se conectan en estrella, la tensión que se imprime al devanado es $1/\sqrt{3}$, (57.8%) de la tensión de línea.

Por tanto es posible arrancar un motor con poco más de la mitad de su tensión nominal y a continuación hacerlo trabajar en delta, con la tensión nominal de línea y fase aplicados. Como el par varía de acuerdo con el cuadrado de la tensión impresa al estator la reducción de la tensión cuando se conecta en estrella producirá aproximadamente la tercera parte del par de arranque a plena tensión.

La conmutación de estrella a delta se debe hacer tan rápidamente como sea posible para eliminar grandes corrientes transitorias debidas a la pérdida momentánea de potencia. Por este motivo, se emplean interruptores de tres polos doble tiro con tensión de resorte y acción instantánea, en lugar de interruptores de cuchillas.

3.13 CARACTERÍSTICAS NOMINALES Y CONEXIONES (2)

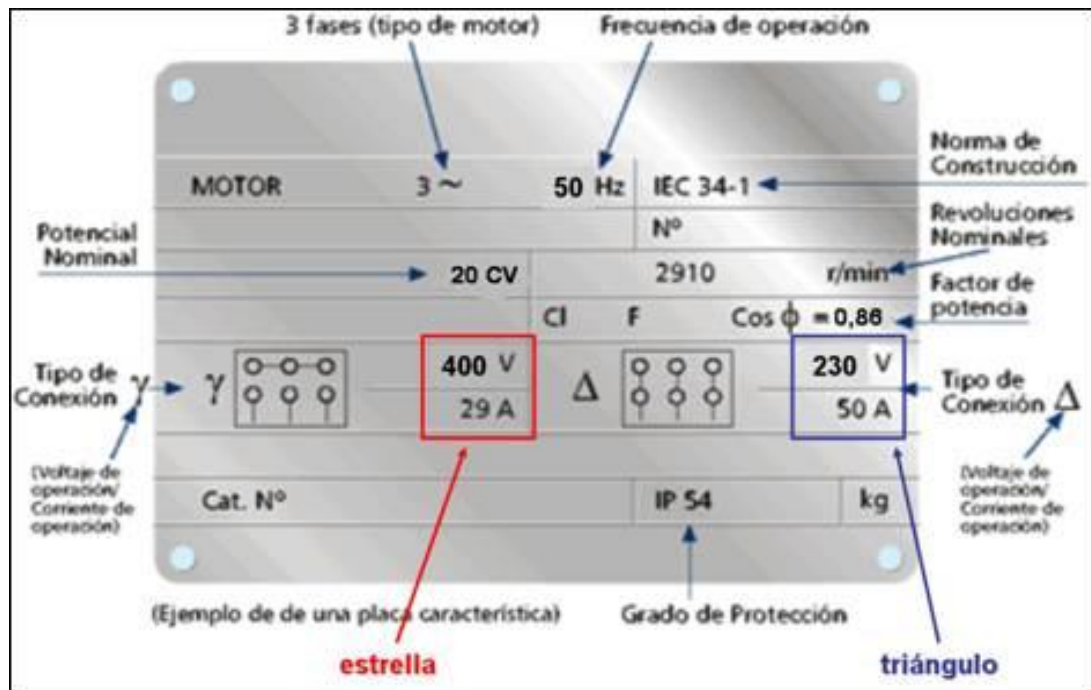
Figura 38 Máquina de inducción trifásica



Tomado de (8)

Son las características de funcionamiento de un motor de inducción, cuando trabaja en el punto nominal y sus óptimas condiciones. Las podemos ver en la placa de características que llevan todos los motores.

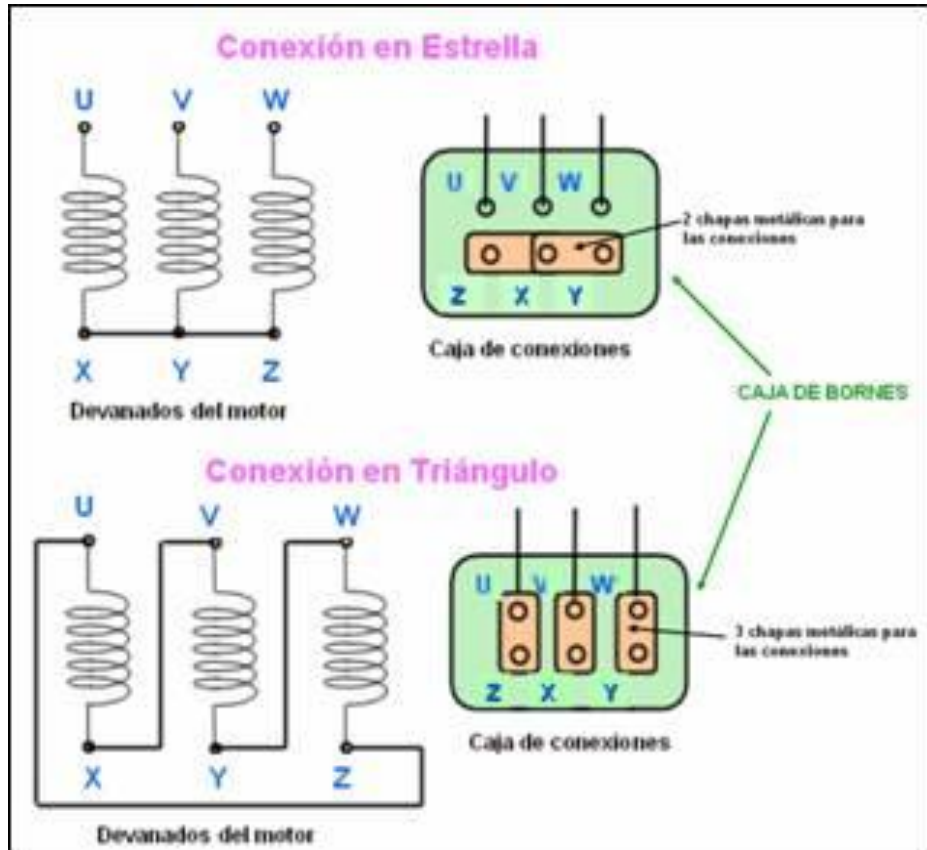
Figura 39 Placa de características de un motor de inducción estándar



Tomado de (8)

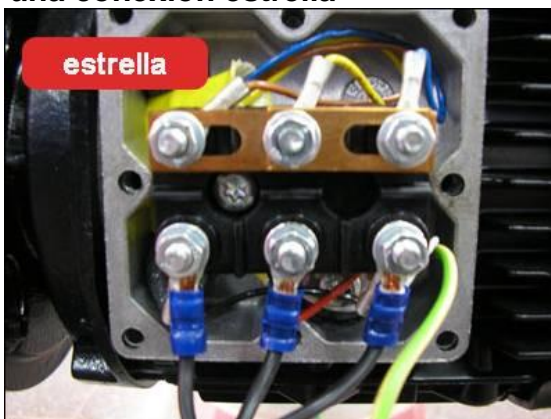
La doble posibilidad de conectar los receptores trifásicos, tanto en estrella como en triángulo, en función de la tensión nominal de la red. Recuerde que de las dos tensiones, la mayor corresponde a la estrella y la pequeña al triángulo. Además la disposición de bornes en la caja es la que se puede observar en la Figura 40.

Figura 40 Placa de conexiones de un motor de inducción



Tomado de (2)

Figura 41 Imagen de una conexión estrella



Tomado de (2)

Las características nominales de los motores que debes tener en cuenta son:

Tensiones nominales: son dos valores, el mayor para conectar en estrella y el menor para conectar en triángulo. Como se muestra en la Figura 39. Las tensiones son 400/230 (V).

Corrientes nominales: las absorbidas de la red cuando el motor trabaja en el punto nominal, de tal forma que el fabricante garantiza la correcta refrigeración. Como se muestra de igual forma en la Figura 39. Las corrientes son 29/50 (A).

Velocidad nominal: la velocidad de giro del rotor en el punto nominal. Es un valor alto próximo al de sincronismo. En Figura 39. La velocidad es 2910 (rpm), luego el motor es de 3000 (rpm) y dos polos, ya que el motor opera a 50 Hz.

Potencia mecánica nominal: es la potencia que el motor entrega a la carga mecánica en forma de movimiento, cuando trabaja en el punto nominal. En Figura 39 Y es 20 (CV). También se la llama potencia útil, y se determina en cualquier punto de funcionamiento con la siguiente expresión:

$$P_{mec} = \left(\frac{2\pi}{60}\right) M * n_r \quad 81.$$

Donde:

P_{mec} : Potencia mecánica entregada a la carga (W).

M : Par motor (N.m).

n_r : Velocidad del motor (rpm).

Normalmente se expresa en caballos de vapor (CV). Recuerda que:
1 CV = 736 W.

- Par nominal: normalmente no viene en la placa de características, pero lo podemos determinar, aplicando la fórmula anterior de la potencia mecánica, en el punto nominal.
- Rendimiento nominal: no suele verse en las placas de características y su valor típico es del 80 %.
- En la placa del motor podemos ver otros detalles prácticos interesantes como el grado de protección (en Figura 39. Y es IP54), el código de refrigeración y la clase de aislamiento.

4. EJERCICIOS RESUELTOS Y PROBLEMAS PLANTEADOS

4.1 EJERCICIOS RESUELTOS

- I. Un motor de inducción de 208 V, 10 hp, cuatro polos, 60 Hz, conectado en Y, tiene un deslizamiento a plena carga de 5%.
- ¿Cuál es la velocidad síncrona?
 - ¿Cuál es la velocidad del rotor del motor con carga nominal?
 - ¿Cuál es la frecuencia del rotor del motor con carga nominal?
 - ¿Cuál es el par en el eje del motor con carga nominal?

Solución:

- a. La velocidad síncrona del motor es:

$$n_{sinc} = \frac{120f_e}{P}$$
$$n_{sinc} = \frac{(120)(60 \text{ Hz})}{4 \text{ polos}} = 1800 \text{ rpm}$$

- b. La velocidad del rotor del motor está dada por:

$$n_m = (1 - s)n_{sinc}$$
$$n_m = (1 - 0,05)1800 \text{ r/min} = 1710 \text{ r/min}$$

- c. Es la frecuencia del rotor del motor está dada por:

$$f_r = sf_e$$
$$f_r = (0,05)(60 \text{ Hz}) = 3 \text{ Hz}$$

- d. El par de la carga aplicado al eje está dado por:

$$T_{carga} = \frac{P_{sal}}{W_m}$$
$$T_{carga} = \frac{(10 \text{ hp})(746 \text{ w/hp})}{(1710 \text{ r/min})(2\pi \text{ rad/r})(1 \text{ min}/60 \text{ s})} = 41,7 \text{ N.m}$$

El par de una carga aplicado al eje en sistema ingles está dado por:

$$T_{carga} = \frac{5252 * P}{n}$$

$$T_{carga} = \frac{5252 * 10 \text{ hp}}{1710 \text{ r/min}} = 30,7 \text{ lb. ft}$$

- II. Un motor de inducción de 480 V, 60 Hz 50 hp, trifásico se le suministra 60 A con un factor de potencia de 0,85 en retraso. Las pérdidas de cobre del estator son de 2 kW y las perdidas en el cobre del rotor son de 700 W. las pérdidas por fricción y rozamiento con el aire son de 600 W, las perdidas en el núcleo son de 1800 W y las perdidas misceláneas son despreciables.

Encuentre las siguientes cantidades:

- a. Potencia en el entrehierro.
- b. Potencia convertida.
- c. Potencia de salida.
- d. Eficiencia del rotor.

Solución:

- a. La potencia de entrada está dada por:

$$P_{ent} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta$$

$$P_{ent} = \sqrt{3}(480V)(60A)(0,85) = 42,4 \text{ kW}$$

Por el diagrama de flujo de potencia.

La potencia en el entrehierro está dada por:

$$P_{EH} = P_{ent} - P_{PCE} - P_{nucl}$$

$$P_{ent} = 42,4 \text{ kW} - 2 \text{ kW} - 1,8 \text{ kW} = 38,6 \text{ kW}$$

- b. La potencia convertida esta da por:

$$P_{conv} = P_{EH} - P_{PCR}$$

$$P_{conv} = 38,6 \text{ kW} - 700 \text{ W} = 37,9 \text{ kW}$$

c. La potencia de salida está dada por:

$$P_{sal} = P_{conv} - P_{FyP} - P_{misc}$$

$$P_{sal} = 37,9\text{kW} - 600\text{W} - 0\text{W} = 37,3\text{kW}$$

O, en caballos de fuerza es:

$$P_{sal} = 37,3\text{kW} \cdot \frac{1\text{hp}}{0,746\text{kW}} = 50\text{ hp}$$

d. Por lo tanto la eficiencia del motor de inducción es:

$$n_1 = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} \cdot 100\%$$

$$n_1 = \frac{37,3\text{kW}}{42,4\text{kW}} \cdot 100\% = 88\%$$

III. Un motor de inducción de 460 V, 25 hp. 60 Hz, con cuatro polos conectado en Y, las pérdidas del por rotación total son de 1100 W y se supone que son constantes. Las pérdidas del núcleo se agrupan con las de rotación. Para un deslizamiento de 2,2 % a voltaje y frecuencia nominal; tiene las siguientes impedancias en ohmios por fase referidas al circuito del estator.

$$\begin{aligned} R_1 &= 0,641\ \Omega & R_2 &= 0,332\ \Omega \\ X_1 &= 1,106\ \Omega & X_2 &= 0,464\ \Omega & X_M &= 26,3\ \Omega \end{aligned}$$

Halle las siguientes cantidades del motor:

- Velocidad.
- Corriente del estator.
- Factor de potencia.
- P_{conv} y P_{sal}
- T_{ind} y T_{carga}
- Eficiencia.

Solución:

a. La velocidad síncrona es:

$$n_{sinc} = \frac{120f_e}{P}$$

$$n_{sinc} = \frac{(120)(60\text{ Hz})}{4\text{ polos}} = 1800\text{ r/min}$$

○

$$W_{sinc} = 1800 \frac{r}{min} \cdot \frac{2\pi rad}{1 rev} \cdot \frac{1min}{60s} = 188,5 rad/s$$

La velocidad mecánica del eje del motor es:

$$n_m = (1 - s)n_{sinc}$$

$$n_m = (1 - 0,022)1800 r/min = 1760 r/min$$

○

$$W_m = (1 - s)W_{sinc}$$

$$W_m = (1 - 0,022)(188,5 rad/s) = 184,4 rar/s$$

Para la corriente del estator, se obtiene primero la impedancia equivalente del circuito. El primer paso es combinar la impedancia del rotor en paralelo con la rama de magnetización y luego añadir la impedancia del estator a esa combinación en serie. La impedancia referida del motor es:

$$Z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2$$

$$Z_2 = \frac{0,332}{0,022} + j0,464$$

$$Z_2 = 15,09 + j0,464 = 15,10 < 1,76^\circ \Omega$$

La impedancia combinada de magnetización mas la del rotor está dada por:

$$Z_f = \frac{1}{1/jX_M + 1/Z_2}$$

$$Z_f = \frac{1}{j0,038 + 0,0662} < -1,76^\circ$$

$$Z_f = \frac{1}{0,0773} < -31,1^\circ = 12,94 < 31,1^\circ \Omega$$

Por lo tanto la impedancia total es:

$$Z_{total} = Z_{estat} + Z_f$$

$$Z_{total} = 0,641 + j0,1294 < 31,1^\circ \Omega$$

$$Z_{total} = 11,72 + j7,79 = 14,07 < 33,6^\circ \Omega$$

La corriente resultante del estator es:

$$I_1 = \frac{V_\theta}{Z_{total}}$$

$$I_1 = \frac{2660 \angle 0^\circ V}{14,07 \angle 33,6^\circ \Omega} = 18,88 \angle -33,6^\circ A$$

b. El factor de potencia está dado por:

$$FP = \cos 33,6^\circ = 0,833 \text{ en atrazo}$$

c. La potencia de entrada esta dad por:

$$P_{ent} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta$$

$$P_{ent} = \sqrt{3}(460 V). (18,88 A). (0,833) = 12,530 W$$

Las pérdidas en el cobre del estator de esta máquina son:

$$P_{PCE} = 3I^2 R$$

$$P_{PCE} = 3(18,88 A). (0,641 \Omega) = 685 W$$

Las pérdidas en entrehierro está dada por:

$$P_{EH} = P_{ent} - P_{PCE}$$

$$P_{EH} = P_{AG} = 12,530 W - 685 W = 11845 W$$

Entonces la potencia convertida es:

$$P_{conv} = (1 - s)P_{EH}$$

$$P_{conv} = (1 - 0,022)(11845 W) = 11585 W$$

La potencia de salida está dada por:

$$P_{sal} = P_{conv} - P_{rot}$$

$$P_{sal} = 11585 W - 1100 W = 10485 W$$

d. El par inducido está dado por:

$$T_{ind} = \frac{P_{AG}}{W_m}$$

$$T_{ind} = \frac{11845W}{184,4 \text{ rad/s}} = 62,8 \text{ N.m}$$

Y el par de salida está dado por:

$$T_{carga} = \frac{P_{sal}}{W_m}$$

$$T_{carga} = \frac{10485W}{184,4 \frac{\text{rad}}{\text{s}}} = 56,9 \text{ N.m}$$

e. La eficiencia del motor en estas condiciones de operación es:

$$n = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} \cdot 100\%$$

$$n = \frac{10485 \text{ W}}{12,530 \text{ W}} \cdot 100\% = 83,7 \%$$

IV. Un motor de inducción de dos polos y 50 Hz suministra 15 kW a una carga a una velocidad de 2,950 r/min.

- ¿Cuál es el deslizamiento del motor?
- ¿Cuál es el par inducido en el motor en N.m en estas condiciones?
- ¿Cuál es la velocidad de operación del motor si se duplica el par?

Solución:

a. La velocidad síncrona del motor es:

$$n_{sinc} = \frac{120f_e}{P}$$

$$n_{sinc} = \frac{(120)(50 \text{ Hz})}{2 \text{ polos}} = 3000 \text{ r/min}$$

Por lo tanto el deslizamiento del motor es:

$$n = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} \cdot 100\%$$

$$s = \frac{3000 \text{ r/min} - 2950 \text{ r/min}}{3000 \text{ r/min}} \cdot 100\% = 0,0167\%$$

- b. Se debe suponer que el par inducido en el motor es igual al par de carga y también P_{conv} es igual a P_{carga} . Puesto que no se asigno valor alguno para las pérdidas mecánicas. Entonces el par es:

$$T_{ind} = \frac{P_{conv}}{W_m}$$

$$T_{ind} = \frac{15 \text{ kW}}{(2950 \text{ r/min})(2\pi \text{ rad})(1 \text{ min}/60 \text{ s})} = 48,6 \text{ N.m}$$

- c. En la región de bajo deslizamiento, la curva par- velocidad es lineal y el par inducido es directamente proporcional al deslizamiento. Por lo tanto, si se duplica el par, entonces el nuevo deslizamiento será de 3,33%. Entonces, la velocidad de operación del motor es:

$$n_m = (1 - s)n_{sinc}$$

$$n_m = (1 - 0,0333)(3000 \text{ r/min}) = 2900 \text{ r/min}$$

- d. La potencia suministrada por el motor está dada por:

$$P_{conv} = T_{ind} \cdot W_m$$

$$P_{conv} = (48,6 \text{ N.m})(2) \cdot \left(2900 \frac{\text{r}}{\text{min}}\right) (2\pi \text{ rad}) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right) = 29,5 \text{ kW}$$

- V. Un motor de inducción con un rotor devanado de 460 V, 25 hp, 60 Hz, con dos polos, conectado en Y, tiene las siguientes impedancias en Ohmios por fase referidas al circuito del estator:

$$R_1 = 0,641 \Omega \quad R_2 = 0,332 \Omega$$

$$X_1 = 1,106 \Omega \quad X_2 = 0,464 \Omega \quad X_M = 26,3 \Omega$$

- a. ¿Cuál es el par máximo en este motor? ¿A qué velocidad y deslizamiento se presenta?
- b. ¿Cuál es el par de arranque del motor?
- c. ¿Cuándo se duplica la resistencia del rotor? ¿Cuál es la velocidad en que se presenta ahora el par máximo? ¿Cuál es el nuevo par de arranque del motor?

Solución:

- a. El voltaje de Thevenin del motor es:

$$V_{TH} = V_{\phi} \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}}$$

$$V_{TH} = \frac{(266V)(26,3 \Omega)}{\sqrt{(0,64 \Omega)^2 + (1,106 \Omega + 26,3 \Omega)^2}}$$

La resistencia de Thevenin es:

$$R_{TH} = R_1 \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)$$

$$R_{TH} = (0,641 \Omega) \left(\frac{26,3 \Omega}{1,106 \Omega + 26,3 \Omega} \right)^2 = 0,590 \Omega$$

La reactancia Thevenin es:

$$X_{TH} = X_1 = 1,106 \Omega$$

El deslizamiento al cual ocurre el par máximo está dado por la ecuación:

$$s_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}}$$

$$s_{max} = \frac{0,332 \Omega}{\sqrt{(0,590 \Omega)^2 + (1,106 \Omega + 0,464 \Omega)^2}} = 0,198$$

Esto corresponde a una velocidad mecánica de.

$$n_m = (1 - s) n_{sinc}$$

$$n_m = (1 - 0,198) \left(1800 \frac{r}{min} \right) = 1,444 r/min$$

El par esta velocidad es:

$$T_{max} = \frac{3V_{TH}^2}{(2W_{sinc}) \left(R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \right)}$$

$$= \frac{3(255,2 \text{ V})^2}{\left(2 \left(188,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right) \right) \left(0,590 \Omega + \sqrt{1,106 \Omega^2 + (1,106 \Omega + 0,464 \Omega)^2} \right)}$$

$$T_{max} = 229 \text{ N.m}$$

b. El par de arranque del motor se encuentra establecido $s=1$ en la ecuación:

$$T_{max} = \frac{3V_{TH}^2 R_2}{(W_{sinc}) \left((R_{TH} + R_2)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right)}$$

$$= \frac{3(255,2 \text{ V})^2 (0,332 \Omega)}{\left(188,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right) \left(0,590 \Omega + 0,332 \Omega \right)^2 + (1,106 \Omega + 0,464 \Omega)^2}$$

$$T_{arranque} = 104 \text{ N.m}$$

c. Si se duplica la resistencia del rotor, entonces se duplica también el desplazamiento al cual se presenta el par máximo. Por tanto

$$s_{maximo} = 0,396$$

Y la velocidad con el par máximo es:

$$n_m = (1 - s) n_{sinc}$$

$$n_m = (1 - 0,396) \left(1800 \frac{r}{min} \right) = 1087 \text{ r/min}$$

El par máximo sigue siendo:

$$T_{max} = 299 \text{ N.m}$$

El par de arranque ahora es:

$$T_{arranque} = \frac{3(255,2 \text{ V})^2(0,664 \Omega)}{\left(188,5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}\right) (0,590 \Omega + 0,664 \Omega)^2 + (1,106 \Omega + 0,464 \Omega)^2}$$

$$T_{arranque} = 170 \text{ N.m}$$

- VI. Se tiene un motor trifásico de inducción de 4 polos, 60 Hz, 220 Volts, que se tiene el rotor devanado en conexión estrella, la mitad del número de espiras del devanado del estator y que también está conectado en estrella. La relación de espiras se da por fase, si se sabe que el rotor opera a 17590 r/min y los valores de la resistencia del rotor y su reactancia a rotor bloqueado son de 0,07 ohmios y 0,36 ohmios respectivamente. Donde la corriente es de 24,87 A, con un factor de potencia de 0,833 en atraso. Calcular:
- La potencia de entrada del rotor.
 - Las pérdidas en el cobre en el rotor.
 - La potencia desarrollada por el rotor.
 - La potencia desarrollada por el rotor en hp.

Solución:

- La potencia de entrada al rotor está dada por:

$$P_{ent} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta$$

$$P_{ent} = \sqrt{3}(24,87 \text{ A})(220)(0,833) = 7894,13 \text{ W}$$

- Las pérdidas en el cobre del rotor estas dadas por:

$$P_{nucleo} = 3R_r I_r^2$$

$$P_{nucleo} = (3)(0,07)(24,87)^2 = 129,9 \text{ W}$$

- La potencia desarrollada en el rotor esta dad por:

$$P_{rotor} = P_{ent} - P_{nucleo}$$

$$P_{rotor} = 4689,12 \text{ W} - 129,9 \text{ W} = 4,559 \text{ kW}$$

d. La potencia desarrollada en el rotor en hp:

$$P_{rotor} = \frac{4,559kW}{746} = 6,11 hp$$

VII. Los siguientes datos de prueba se tomaron en un motor de inducción de 7,5 hp, cuatro polos, 208 V, 60 Hz, diseño A, conectado en Y, cuya corriente nominal es 28 A.

Prueba DC

$$V_{DC} = 13,6 V \quad I_{PC} = 28 A$$

Prueba en vacío

$$\begin{aligned} V_T &= 208 V & f &= 60 \text{ Hz} \\ I_A &= 8,12 A & P_{ind} &= 420 W \\ I_B &= 8,20 A \\ I_C &= 8,18 A \end{aligned}$$

Prueba de rotor bloqueado

$$\begin{aligned} V_T &= 25 V & f &= 15 \text{ Hz} \\ I_A &= 28,10 A & P_{ind} &= 920 W \\ I_B &= 28,00 A \\ I_C &= 27,60 A \end{aligned}$$

- Dibuje el circuito equivalente por fase de este motor.
- Encuentre el deslizamiento al par de plena carga y el valor de este par.

Solución:

a. De la prueba DC:

$$R_1 = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}} = \frac{13,6 V}{2(28,00 A)} = 0,243 \Omega$$

De la prueba de vacío

$$I_{L.av} = \frac{8,12 A + 8,20 A + 8,28 A}{3} = 8,17 A$$

$$V_{\phi.nl} = \frac{208 V}{\sqrt{3}} = 120 V$$

Por lo tanto

$$|Z_{nl}| = \frac{120 \text{ V}}{8,17 \text{ A}} = 14,7 \Omega = X_1 + X_M$$

Cuando se conoce X_1 , se puede encontrar X_M . Las pérdidas en el cobre del estator son:

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1 = 3(8,17 \text{ A})^2 (0,243) = 48,7 \text{ W}$$

Por consiguiente, las pérdidas rotacionales en vacío son:

$$P_{rot} = P_{in.nl} - P_{SCL.al}$$

$$P_{rot} = 420 \text{ W} - 48,7 \text{ W} = 37,3 \text{ W}$$

De la prueba de rotor bloqueado.

$$I_{L-av} = \frac{28,1 \text{ A} + 28,0 \text{ A} + 27,6 \text{ A}}{3} = 27,9$$

La impedancia de rotor bloqueado es:

$$|Z_{nl}| = \frac{V_\phi}{I_A} = \frac{V_T}{\sqrt{3} I_A} = \frac{25 \text{ V}}{\sqrt{3}(27,9 \text{ A})} = 0,517 \Omega$$

Y el ángulo θ de la impedancia es

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{P_{ind}}{\sqrt{3} V_T I_L}\right)$$

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{920 \text{ W}}{\sqrt{3} (25 \text{ V}) \cdot (27,9 \text{ A})}\right)$$

$$\theta = \cos^{-1}(0,762) = 40,4^\circ$$

Entonces

$R_{LR} = 0,517 \cos(40,4^\circ) = 0,394 \Omega = R_1 + R_2$ puesto que $R_1 = 0,243 \Omega$, R_2 debe ser $0,151 \Omega$. La reactancia a 15 Hz es:

$$X'_{LR} = 0,517 \sin(40,4^\circ) = 0,335 \Omega$$

La reactancia equivalente a 60 Hz es:

$$X_{LR} = \frac{f_{nominal}}{f_{test}} X'_{LR} = \left(\frac{60 \text{ Hz}}{15 \text{ Hz}}\right) \cdot 0,335 \Omega = 1,34 \Omega$$

En los motores de inducción de diseño clase A, se supone que esta reactancia está dividida con igualdad entre el roto y el estator; en consecuencia.

$$X_1 = X_2 = 0,667 \Omega$$

$$X_M = |Z_{nl}| - X_1 = 14,7 \Omega - 0,67 \Omega = 14,03 \Omega$$

En la se muestra el circuito equivalente final por fase:

b. En este circuito equivalente, los valores de Thevenin correspondientes se encuentran a partir de las ecuaciones de THEVENIN ya mencionadas y son

$$V_{TH} = 114,6 \text{ V} \quad R_{TH} = 0,221 \Omega \quad X_{TH} = 0,67 \Omega$$

Por tanto, el deslizamiento al par máximo está dado por

$$s_{\max} = \frac{R_2}{\sqrt{(R_{TH}^2 + X_{TH} + X_2)^2}}$$

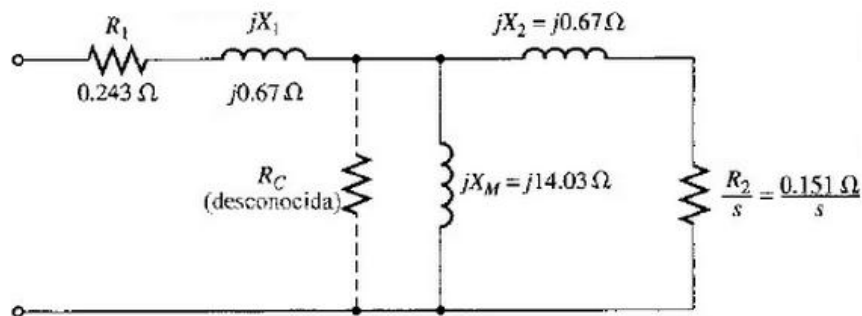
$$s_{\max} = \frac{0,151 \Omega}{\sqrt{0,243 \Omega^2 + (0,67 \Omega + 0,67 \Omega)^2}} = 0,111 = 11,1 \%$$

El par máximo de este motor está dado por

$$T_{\max} = \frac{3 V_{TH}^2}{2 W_{\text{sinc}} \left(R_{TH}^2 + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \right)}$$

$$T_{\max} = \frac{3 * (114,6 \text{ V})^2}{2 * (2188,5 \text{ rad/s}) * (0,221 + \sqrt{0,221^2 + (0,67 + 0,67)^2})} = 66,2 \text{ N.m}$$

Figura 42 Circuito equivalente por fase del motor de inducción.



4.2 PROBLEMAS PLANTEADOS,

- i. Un motor de inducción de 220 V, trifásico, con dos polos, 50 Hz, opera con un deslizamiento de 5% calcule:
- Velocidad de los campos magnéticos
 - Velocidad del rotor
 - Velocidad de deslizamiento del rotor
 - La frecuencia del motor
- ii. Un motor de inducción de 50 kW, 440 V, 50 Hz, con seis polos, tiene un deslizamiento de 6% cuando opera en condiciones de plena carga. En condiciones de plena carga, las pérdidas por fricción y rozamiento con el aire son de 300 W y las pérdidas en el núcleo son de 600 W. Encuentre los siguientes valores en condiciones de plena carga.
- La velocidad del eje n_m
 - La potencia de salida en watts
 - El par de carga T_{carga}
 - La frecuencia del rotor
- iii. Un motor de inducción de 208 V, con dos polos, 60 Hz, conectado en Y, con rotor devanado, tiene una capacidad nominal de 15 hp. Los componentes de su circuito equivalente son:

$$\begin{array}{ll} R_1 = 0,200 \Omega & R_2 = 0,120 \Omega \\ X_1 = 0,410 \Omega & X_2 = 0,410 \Omega \\ X_M = 15 \Omega & P_{nucl} = 180 W \\ P_{mec} = 250 W & P_{misc} = 0 W \end{array}$$

Dado un deslizamiento de 0,05, encuentre

- La corriente de línea I_L
- Las pérdidas en el cobre del estator P_{PCE}
- La potencia en el entrehierro P_{EH}
- La potencia convertida de forma eléctrica a mecánica P_{conv}
- El par inducido T_{ind}
- El par de carga T_{carga}
- La eficiencia general de la maquina
- La velocidad del motor en revoluciones por minuto y radianes por segundo

- iv. Para el motor del problema número 3. Calcular
- ¿Cuál es par máximo del motor?
 - ¿Cuál es el deslizamiento con el par máximo?
 - La grafica característica par- velocidad del motor
 - La grafica de la potencia de salida y la curva de velocidad del motor

- v. A un motor de inducción de 208 V, 60 Hz con seis polos, conectado en Y, 25 hp, clase de diseño B, se le realizan pruebas en el laboratorio y se obtuvieron los siguientes resultados

En vacío → **208 V, 22 A, 1200 W, 60 Hz**

Rotor bloqueado → **24,6 V, 64,5 A, 2200 W, 15 Hz**

Prueba DC → **13,5 V, 64 A**

Encuentre el circuito equivalente del motor y haga una gráfica de la curva características par- velocidad

- vi. Un motor de inducción de 460 V, con cuatro polos, 50 hp, 60 Hz, conectado en Y, trifásico, desarrolla su par inducido máximo con un deslizamiento de 3,8 % cuando opera a 60 Hz y 460 V. las impedancias del circuito por fase del motor son

$$\begin{aligned} R_1 &= 0,33 \Omega & X_M &= 30 \Omega \\ X_1 &= 0,42 \Omega & X_2 &= 0,42 \Omega \end{aligned}$$

En este problema se desprecian las perdidas mecánicas en el núcleo y dispersas. Encuentre:

- El valor de la resistencia del rotor R_2
 - El par inducido T_{ind} , el par de carga T_{carga} y la velocidad del rotor cuando se presenta el par máximo del motor
 - El par de arranque del motor $T_{arranque}$
- vii. La potencia de entrada de un motor de inducción de rotor devanado con 6 polos a 60 Hz es de 40 KW Y EL ROTR OPERA A 1100 r/min. La resistencia del rotor es de 0,20 ohmios por fase. Calcular:
- La velocidad síncrona.
 - Deslizamiento.
 - Pérdidas totales del rotor y perdidas en el cobre por fase.
 - el valor de corriente del rotor por fase.

- viii. Los siguientes datos de prueba se tomaron en un motor de inducción de 10 hp, cuatro polos, 200 V, 60 Hz, diseño A, conectado en Y, cuya corriente nominal es 28 A.

Prueba DC

$$V_{DC} = 12 \text{ V} \quad I_{PC} = 27 \text{ A}$$

Prueba en vacío

$$\begin{aligned} V_T &= 200 \text{ V} & f &= 60 \text{ Hz} \\ I_A &= 7,12 \text{ A} & P_{ind} &= 400 \text{ W} \\ I_B &= 7,20 \text{ A} \\ I_C &= 7,18 \text{ A} \end{aligned}$$

Prueba de rotor bloqueado

$$\begin{aligned} V_T &= 24 \text{ V} & f &= 17 \text{ Hz} \\ I_A &= 27,10 \text{ A} & P_{ind} &= 900 \text{ W} \\ I_B &= 27,60 \text{ A} \\ I_C &= 27,90 \text{ A} \end{aligned}$$

- a) Dibuje el circuito equivalente por fase de este motor.
b) Encuentre el deslizamiento al par de plena carga y el valor de este par.
- ix. En la figura 2 puedes ver la placa de un motor Siemens. Si se conecta sobre una red de 400 (V) y 50 (Hz), determina:
- El tipo de conexión dibujando la caja de bornes.
 - La corriente nominal.
 - La velocidad y el deslizamiento nominal.
 - La potencia activa nominal, absorbida de la red.
 - El rendimiento nominal.

Figura 43 Placa con caracterizas nominales de un motor de inducción.



5. MANEJO LIBRO DIGITAL

5.1 DESCRIPCIÓN DEL LIBRO DIGITAL

5.1.1 Según los contenidos

Se centra en la teoría de máquinas de inducción trifásicas, el cual es un tema dictado en la asignatura Máquinas Eléctricas en la Universidad Tecnológica de Pereira.

5.1.2 Según los destinatarios

Está diseñado específicamente para estudiantes de la asignatura máquinas eléctricas del programa de Tecnología Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira, quienes requieren un conocimiento básico en la materia.

5.1.3 Según su estructura

Es una aplicación de tipo multimedia ya que integra recursos gráficos y teóricos que conllevan a un aprendizaje coherente, secuencial, y estructurado según la temática perteneciente a máquinas síncronas. Opera bajo un escenario web, en donde se accede a diferentes tipos de aplicaciones, en dónde se encuentra la plataforma principal del libro DIGITAL, en conjunto de bases de datos que son reflejados en archivos pdf, direcciones web, y una ayuda de manejo de complemento.

5.1.4 Según su base de datos

Es de tipo cerrado, se recomienda no modificar la base de datos, ya que cualquier modificación puede causar daños que impiden la operación normal de la aplicación.

5.1.5 Según los medios que integra

Es una aplicación gráfica multimedia.

5.1.6 Según los objetivos educativos que pretende facilitar

Esta plataforma maneja elementos conceptuales, dónde se proporciona la información teórica necesaria para un óptimo aprendizaje; es procedimental_ya que el estudiante está interactuando según la información por medio de animaciones y gráficos; es actitudinal, ya que renueva la visión de una clase magistral convencional integrándole un nuevo elemento como lo es el libro DIGITAL.

5.1.7 Según las actividades cognitivas que activa

Observación ya que contiene gran cantidad de imágenes que le proveen de información, de allí parten también los procesos de memorización en tanto a lo visual. Evocación ya que algunos conceptos esenciales son retomados en diversas ocasiones a medida que se va avanzando en los temas; la comprensión es otro de los procesos facilitados por el libro DIGITAL.

5.1.8 Según su comportamiento

El libro DIGITAL es de tipo herramienta; tanto para el maestro en su proceso de enseñanza como para el estudiante en su proceso de aprendizaje.

5.1.9 Según su diseño

Está centrado en mejorar los procesos de enseñanza y aprendizaje, proporcionando nuevas alternativas de búsqueda y consulta de información.

5.2 REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DEL EQUIPO

5.2.1 Hardware

Procesador de 512 MHz o superior.

Memoria RAM 256 MB o superior

Monitor con resolución mínima de 1024 x 768 píxeles o superior.

Espacio en disco duro necesario para ejecutar es de 150 MB.

Unidad de lectora CD room.

5.2.2 Software

Para algunas alternativas de consulta es necesaria conexión directa a Internet, sin embargo la aplicación básica se puede ejecutar sin conexión a la red, pero es necesario tener instalado en su PC un navegador (recomendado GOOGLE CHROME); así mismo es necesaria la previa instalación del programa de visualización denominado ADOBE FLASH PLAYER, los cuales se pueden descargar gratuitamente a través de sus respectivas páginas en internet.

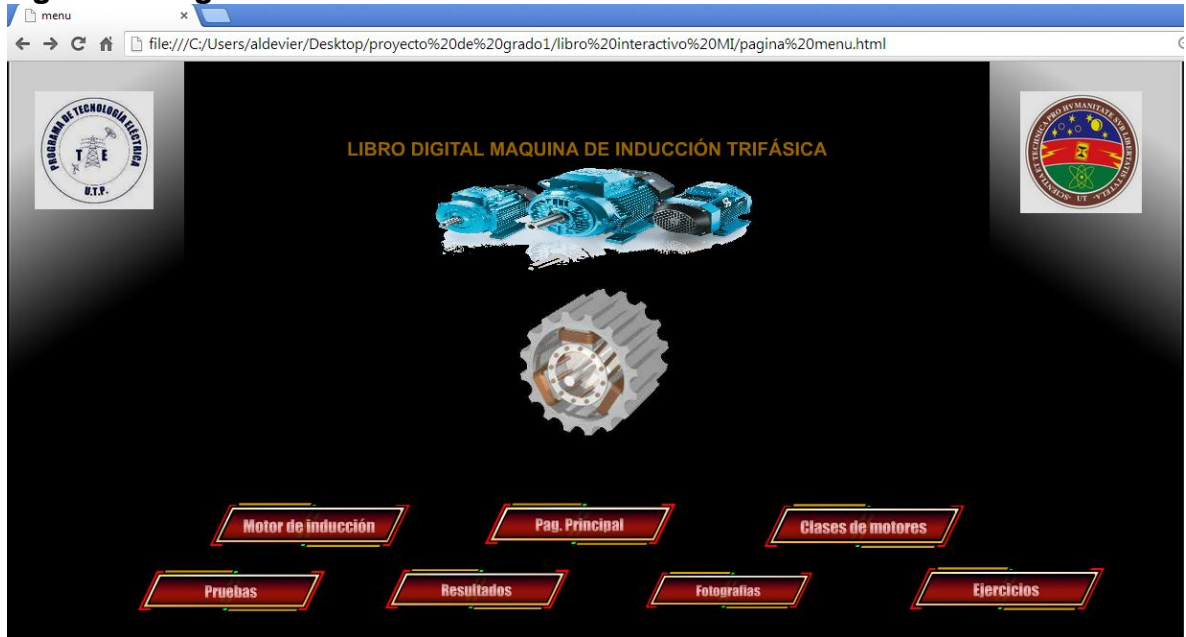
5.3 MODO DE EMPLEO

INICIO:

Inserte el disco, en este se reproducirá automáticamente; en caso de no ser así vaya al icono: *Mi PC* o en otros sistemas operativos *EQUIPO*. A continuación abra la carpeta denominada *LIBRO DIGITAL*. Esta aplicación requiere para su visualización, tener instalado un navegador de Internet (GOOGLE GHROME) además de un proyector de imágenes ADOBE FLASH PLAYER. Una vez

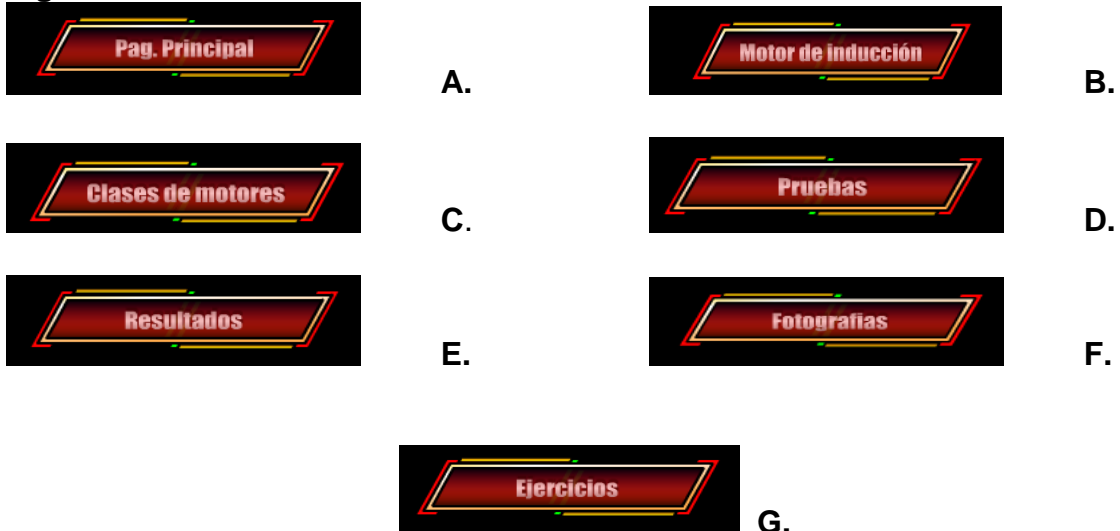
instalados los programas necesarios, se puede abrir el contenido del libro DIGITAL, en la carpeta denominado *LIBRO DIGITAL* posteriormente abrir el archivo llamado *página menú* en versión HTML.
Una vez ubicados en la página de menú. Se visualizará la siguiente pantalla:

Figura 44 Página de menú



Como se puede observar en la Figura 44 esta primera página contiene 7 enlaces, que tienen las siguientes aplicaciones:

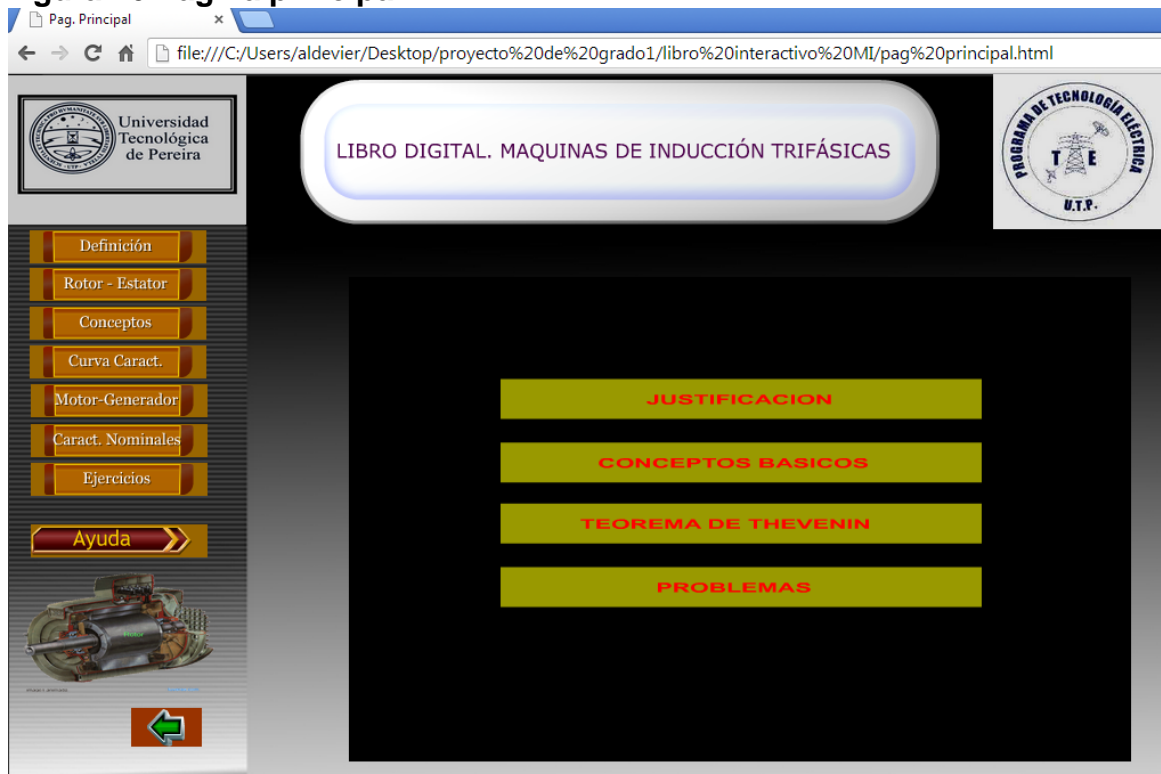
Figura 45 Primeros enlaces



- A. Página principal: botón de enlace a la página principal en donde se encuentra el LIBRO DIGITAL.
- B. Motores de Inducción: botón de enlace a un documento en .pdf con todo el contenido escrito del LIBRO DIGITAL, para consulta.
- C. Clase de Motores: botón de enlace a un documento en .pdf en donde encuentra las clases de motores.
- D. Pruebas: botón de enlace a un documento en .pdf en donde se encuentra las deferentes pruebas a realizar a un motor de inducción.
- E. Resultados: botón de enlace a un documento en .pdf en donde se encuentra los resultados de todo las pruebas realizadas en el laboratorio de máquinas de la Universidad Tecnológica Pereira.
- F. Fotografías: botón de enlace a todo un álbum de fotografías de los Motores de Inducción.
- G. Ejercicios: botón de enlace a un documento en .pdf en donde se encuentra un serie de ejercicios solucionados y propuestos.

Al escoger la opción *página principal* se visualizará la siguiente pantalla:

Figura 46 Página principal



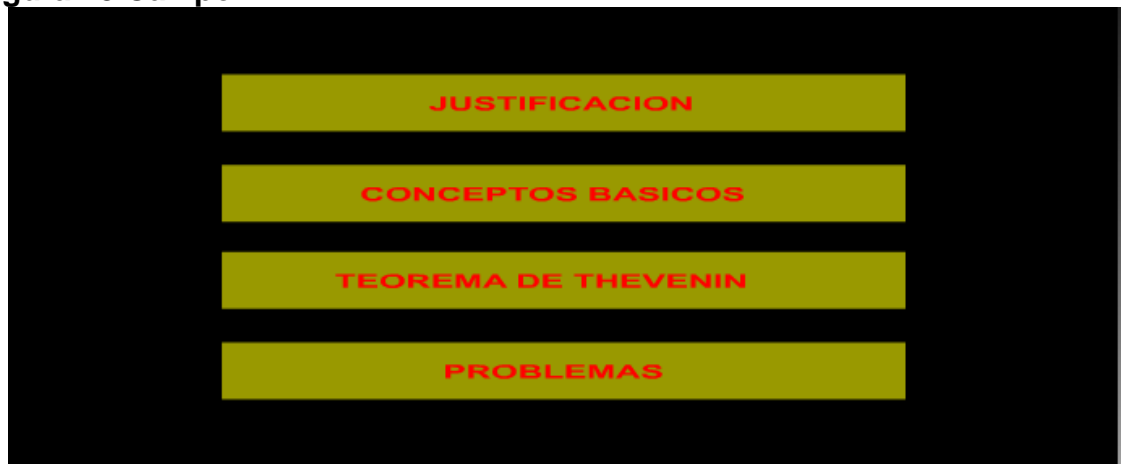
En la Figura 44 se encuentra una nueva pantalla llamada Página Principal donde se puede observar 2 campos, que contienen enlaces y aplicaciones las cuales poseen las siguientes características:

Figura 47 Campo #1



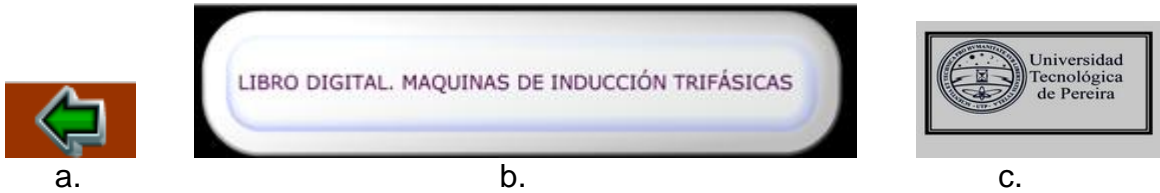
En la Figura 47 se observa el campo # 1 donde se encuentran una serie de enlaces que contienen información en formato .pdf; cuyo contenido son los capítulos mostrados en la aplicación libro DIGITAL, además, de poder acceder a un buen número de ejercicios propuestos y resueltos, adicional a ello una opción de ayuda donde encontrará el manejo del libro DIGITAL.

Figura 48 Campo #2



En este campo se encuentra la pantalla principal del libro DIGITAL.

Figura 49 Otros botones



- a. **Atrás:** Permite regresar a la página principal.
- b. **Libro DIGITAL Maquinas de Inducción Trifásicas:** Regresa al inicio de la aplicación del LIBRO DIGITAL (refresca el pantallazo).
- c. **Universidad Tecnológica de Pereira:** Permite ingresar a la página oficial del programa de Tecnología Eléctrica de la universidad Tecnológica de Pereira

6. CONCLUSIONES

El uso de un libro digital como una herramienta pedagógica puede facilitar y agilizar el proceso de aprendizaje y enseñanza en el área de máquinas de inducción trifásicas ya que los estudiantes pueden encontrar información que les ayude a comprender e indagar explícitamente todo fenómeno electromagnético que compone el funcionamiento del rotor jaula de ardilla o rotor bobinado.

Al utilizar el Software Dreamweaver se facilitó el proceso del desarrollo del libro digital máquinas de inducción trifásicas ya que su plataforma permitió diseñar elementos de enlace entre planchas informativas (PDF) utilizando botones y códigos. Las dificultades de diseño son causadas por la falta de práctica e información acerca del programa Dreamweaver que a pesar de ser un software relativamente fácil de manipular se dificulta en primera instancia al ajustar la pantalla al navegador utilizado, de allí en adelante la dificultad fue creciendo por la necesidad de entrelazar información desarrollada de otro software a este software; por ello se debió solicitar ayuda y tocar diferentes puertas para culminar con un buen trabajo.

La implementación del software Flash es necesaria ya que permite crear animaciones por medio de fotogramas. Este software también tuvo serias dificultades, se podrían decir que mayores dado que es un software de alta gama, aun así se logro en primera instancia manipular las funciones básicas y a partir de ello lograr implementar importantes animaciones que le dieron vida al libro digital.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Maqmotores. *Maqmotores*. [En línea] [Citado el: 15 de Noviembre de 2012.] <http://tallerdemotores.blogspot.com/2009/06/motores-de-induccion-arranque-por.html>.
2. Centro Integrado de Formación Profesional . *Centro Integrado de Formación Profesional* . [En línea] [Citado el: 12 de Noviembre de 2012.] http://www.cifp-mantenimiento.es/e-learning/index.php?id=9&id_sec=6 .
3. Monografía Motor Electrico Trifasico. *Monografía Motor Electrico Trifasico*. [En línea] [Citado el: 20 de diciembre de 2013.] <http://www.monografias.com/trabajos91/motor-electrico-trifasico/motor-electrico-trifasico.shtml>.
4. **Chapman, Stephen**. *Maquinas Eléctricas: introducción a kis principios de las maquinas generadores sincronos, motores sincronos*. Mexico : cuarta, 2005.
5. Maquinas de Inducción . *Maquinas de Inducción*. [En línea] [Citado el: 20 de Noviembre de 2013.] <http://patricioconcha.ubb.cl/maquinas/paginas/potencia.materia.html>.
6. capitulo 1 Motores de Inducción (monografía). *capitulo 1 Motores de Inducción (monografía)*. [En línea] [Citado el: 18 de Noviembre de 2012.] http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/salvatori_a_m/capitulo1.pdf.
7. Funcionamiento de las maquinas de inducción. *Funcionamiento de las maquinas de inducción*. [En línea] [Citado el: 15 de Noviembre de 2012.] <http://patricioconcha.ubb.cl/maquinas/paginas/potencia.materia.html>.
8. **RODAS RENDON, Dario**. *Máquinas DC y síncronas*. Pereira : Universidad tecnológica de Pereira.
9. Motores asincronos o de inducción. *Motores asincronos o de inducción*. [En línea] [Citado el: 14 de enero de 2013.] <http://es.scribd.com/doc/54953539/MOTORES-DE-INDUCCION>.