

**ESTUDIO DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE CARGA PARA UN PAR  
GENERADOR-MOTOR EN TURBINAS EÓLICAS.**

**CHRISTIAN DAVID MORENO VASQUEZ**



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C.**

**2005**

**ESTUDIO DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE CARGA PARA UN PAR  
GENERADOR-MOTOR EN TURBINAS EÓLICAS.**

**CHRISTIAN DAVID MORENO VASQUEZ**

**Tesis de Grado para optar por el título de  
Magíster en Ingeniería Mecánica**

**Asesor**

**ALVARO PINILLA S.**

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
BOGOTÁ D.C.**

**2005**

Bogotá D.C. Enero 20 de 2005

Doctor

**ALVARO PINILLA S.**

Universidad de Los Andes

Facultad de Ingeniería

Director de Departamento de Ingeniería Mecánica

Ciudad

Reciba un cordial saludo

Presento a usted el informe de tesis de grado "ESTUDIO DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE CARGA PARA UN PAR GENERADOR-MOTOR EN TURBINAS EÓLICAS" elaborado por mi, como requisito parcial para optar por el título de Magíster en Ingeniería Mecánica.

Este proyecto cumple con los objetivos planteados e involucra un gran avance en el desarrollo de alternativas viables para la obtención de energía eléctrica de bajo costo a partir de fuentes renovables, especialmente la eólica.

Cordialmente,

---

**CHRISTIAN DAVID MORENO VASQUEZ**

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco en especial a mi asesor **Alvaro Pinilla** por su apoyo, por su interés, y por haberme brindado la confianza y la oportunidad de participar en los proyectos y actividades en los cuales me involucró y que gracias a su apoyo culminaron de manera exitosa.

Agradezco al personal del laboratorio de Ingeniería Mecánica: Norman, Don Mateo, Jorge, Don Luis, Diana y Omar. Al personal del laboratorio de Ingeniería Eléctrica y Electrónica: William, Alejandro y Luisa por su paciencia y colaboración durante el desarrollo de este proyecto.

A mis amigos y mi novia por apoyarme emocionalmente y darme mucha confianza a lo largo de este tiempo.

A mis padres por ser la roca que sostiene mi espíritu.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	9
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
2 METODOLOGÍA	13
3 ANTECEDENTES	13
4 MARCO TEÓRICO	14
4.1 IMANES PERMANENTES	14
4.2 GENERADORES SINCRÓNICOS	16
4.2.1 Conceptos básicos	16
4.2.2 Circuito equivalente	19
4.2.3 Potencia generada con bobinados eléctricos y con electroimanes	20
4.2.4 Diseño de generadores síncronos	23
4.3 MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN	23
4.3.1 Características eléctricas del motor	24
4.3.2 Torque de salida en motores de inducción	25
4.3.3 Condiciones transientes en motores de inducción.	26
4.3.4 Motores estándares en la industria	26
4.3.5 Alimentación de un motor AC bajo condiciones de voltaje y frecuencia variable	27
4.4 VARIADORES DE FRECUENCIA	29
4.4.1 Motores diseñados para operar bajo el mando de un variador de frecuencia	30
5 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA: MOTORES ELÉCTRICOS	30
5.1 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS	31
5.1.1 Deslizamiento variable	32
5.1.2 Frecuencia Variable	32
5.1.3 Voltaje Variable	32
5.1.4 Medición del torque de salida	32
5.1.5 Medición de la velocidad de giro	33
5.1.6 Medición de los parámetros eléctricos del conjunto	33
5.1.7 Integración de la instrumentación	34
5.1.8 Montaje final	36
5.2 RESULTADOS OBTENIDOS	37
5.2.1 Pruebas a 15HZ	38
5.2.2 Pruebas a 20HZ	40
5.2.3 Pruebas a 30HZ	42
5.2.4 Pruebas a 35HZ	44
5.2.5 Pruebas a 40HZ	46
5.2.6 Pruebas a 45HZ	48
5.2.7 Pruebas a 50HZ	50
5.2.8 Pruebas a 55HZ	52
5.2.9 Pruebas a 60HZ	54
5.2.10 Pruebas a 70HZ	56
5.3 INTERPRETACIÓN CORRECTA DE LAS GRÁFICAS OBTENIDAS	58
5.4 CONCLUSIONES EXPERIMENTALES	58
6 MODELO MATEMÁTICO DE UN GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES.	59

6.1	MODELO PROPUESTO POR ANDERS GRAUERS (Phd TESIS, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY)	59
6.2	MODELO PROPUESTO EN EL LIBRO "ELECTRIC MACHINERY AND TRANSFORMES", GURU [1]	61
6.3	MODELO PROPUESTO	61
6.3.1	Desarrollo del modelo	61
6.3.2	Cálculo de la Fuente magneto motriz	61
6.3.3	Cálculo del flujo magnético impuesto por los imanes permanentes.	62
6.3.4	Calculo de la resistencia equivalente	67
6.3.5	Calculo de la reactancia sincrónica	68
6.3.6	Pérdidas en el generador	69
6.3.7	Potencia eléctrica generada	69
6.3.8	Implementación del modelo	69
7	VALIDACIÓN DEL MODELO PROPUESTO	69
7.1	GENERADOR DE [10]	70
7.2	GENERADOR DE [8]	71
7.3	GENERADOR WHISPER	73
8	APLICACIÓN DEL ESTUDIO A LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	74
9	CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES	75
10	BIBLIOGRAFÍA	78

## TABLA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Esquema de un sistema de generación a gran escala, tomado de [5] .....	9
Gráfico 2. Esquema de un sistema de pequeña generación clásico. ....	10
Gráfico 3. Esquema del montaje propuesto.....	11
Gráfico 4. Curva de histéresis típica para materiales magnéticos. ....	15
Gráfico 5. Curvas de de-magnetización típicas para varios tipos de imanes tomado de [1] .....	15
Gráfico 6. Línea de carga y punto de operación para un imán permanente tomado de [1]. .....	16
Gráfico 7. Bobina individual y su representación eléctrica.....	17
Gráfico 8. Diferentes tipos de arreglos eléctricos por fase que se pueden tener con 6 bobinas individuales. (tomado de [1]) .....	18
Gráfico 9. Circuito equivalente para un generador síncrono, (tomado de [1]) .....	19
Gráfico 10. Características externa para un generador de imanes permanentes. (tomado de [1]).....	21
Gráfico 11. Característica externa para un generador síncrono de rotor bobinado. (tomado de [1]) .....	21
Gráfico 12. Diagrama vectorial para generador síncrono y carga resistiva. (tomado de [1]) .....	22
Gráfico 13. Diagramas vectoriales para generadores síncronos. (tomado de [1]) .....	22
Gráfico 14. Esquema de un motor de Inducción. ....	23
Gráfico 15: Circuito equivalente para un motor de inducción. (tomado de [1]).....	24
Gráfico 16. Modelo aproximado para un motor de inducción. (tomado de [1]).....	25
Gráfico 17. Características mecánicas de un motor de inducción. (tomado de [14]) .....	25
Gráfico 18. Característica torque velocidad para diferentes frecuencias de operación y voltaje ajustado. (tomado de [1]) .....	27
Gráfico 19. Características torque velocidad como función del voltaje de alimentación. (tomado de [1]) .....	28
Gráfico 20. Comportamiento mecánico y eléctrico de un motor de inducción al ser sometido a variaciones en las variables eléctricas de alimentación. ....	29
Gráfico 21. Curva de calibración del tacómetro. ....	33
Gráfico 22. Panel frontal del instrumento virtual. ....	35
Gráfico 23. Panel trasero del instrumento virtual.....	35
Gráfico 24. Esquema del banco de pruebas montado. ....	36
Gráfico 25. Banco de pruebas montado. ....	37
Gráfico 26. Conjunto de gráficas para la respuesta de un motor de inducción alimentado a una frecuencia de 15 Hz con voltaje y carga variables. ....	39
Gráfico 27. Conjunto de gráficas para la respuesta de un motor de inducción alimentado a una frecuencia de 20 Hz con voltaje y carga variables. ....	41
Gráfico 28. Conjunto de gráficas para la respuesta de un motor de inducción alimentado a una frecuencia de 30 Hz con voltaje y carga variables. ....	43
Gráfico 29. Conjunto de gráficas para la respuesta de un motor de inducción alimentado a una frecuencia de 35 Hz con voltaje y carga variables. ....	45
Gráfico 30. Conjunto de gráficas para la respuesta de un motor de inducción alimentado a una frecuencia de 40 Hz con voltaje y carga variables. ....	47
Gráfico 31. Conjunto de gráficas para la respuesta de un motor de inducción alimentado a una frecuencia de 45 Hz con voltaje y carga variables. ....	49
Gráfico 32. Conjunto de gráficas para la respuesta de un motor de inducción alimentado a una frecuencia de 50 Hz con voltaje y carga variables. ....	51

Gráfico 33. Conjunto de gráficas para la respuesta de un motor de inducción alimentado a una frecuencia de 55 Hz con voltaje y carga variables. ....	53
Gráfico 34. Conjunto de gráficas para la respuesta de un motor de inducción alimentado a una frecuencia de 60 Hz con voltaje y carga variables. ....	55
Gráfico 35. Conjunto de gráficas para la respuesta de un motor de inducción alimentado a una frecuencia de 70 Hz con voltaje y carga variables. ....	57
Gráfico 36. Esquema de un generador de dos polos. ....	64
Gráfico 37. Posibles caminos del flujo magnético en el generador.....	64
Gráfico 38. Caminos magnéticos para un generador de imanes permanentes.....	65
Gráfico 39. Circuito magnético para el generador síncrono.....	65
Gráfico 40. Características geométricas del generador. ....	66
Gráfico 41. Generador de [10].....	70
Gráfico 42. Test de circuito abierto. ....	70
Gráfico 43. Test de corto circuito. ....	71
Gráfico 44. Impedancia síncrona para el generador de [10].....	71
Gráfico 45. Generador de [8].....	71
Gráfico 46. Test de circuito abierto para [8].....	72
Gráfico 47. Test de corto circuito para [8].....	72
Gráfico 48. Impedancia síncrona para [8].....	72
Gráfico 49. Generador Whisper.....	73
Gráfico 50. Test de circuito abierto para Whisper. ....	73
Gráfico 51. Test de corto circuito para Whisper.....	73
Gráfico 52. Impedancia síncrona para Whisper. ....	74



## INTRODUCCIÓN

La generación de energía por medios no convencionales ha tomado mucha fuerza en los últimos años, y seguramente, en un futuro cercano el interés por explotar las fuentes de energías renovables será de mayor interés.

La energía eólica es un caso particular de un recurso natural renovable que actualmente es explotada en muchas partes del mundo incluyendo a Colombia.

Los grandes equipos eólicos poseen una velocidad angular que oscila entre los 30 a 60 RPM dependiendo del tamaño del rotor. Por lo tanto la gran mayoría de estos equipos conectan el eje de salida de la turbina a una caja reductora, esto hace que la velocidad angular de salida en esta caja reductora sea mayor (1500-2000 RPM).

Seguidamente el eje de la caja se conecta con a un generador eléctrico que puede provenir de distintas familias. Cuando la generación eléctrica es a gran escala y se intenta conectar el aparato a la red de distribución eléctrica se usan generalmente generadores asíncronos o también llamados generadores de inducción. Estos generadores presentan ventajas competitivas respecto a otros generadores ya que la interconexión eléctrica del sistema con la red eléctrica local no presenta complicaciones.

Algunos diseños cuentan con generadores síncronos, bien sea de imanes permanentes, o bien sea generadores de rotor bobinado. Los primeros se usan cuando la generación eléctrica es de pequeña escala (<1.5 Kw) mientras que los segundos se usan en generación de mayor escala. Si se desea interconectar un generador de este tipo a la red eléctrica local o nacional es necesario tener un poco más de cuidado debido a que el proceso de sincronización es un poco más complejo que cuando se usan generadores de inducción o asíncronos.

Los grandes equipos eólicos se prestan para implementar sobre ellos sistemas de control (eléctricos y mecánicos) que permiten disponer en la salida del eje una velocidad de rotación aproximadamente constante. Esto es una ventaja que se traduce en una potencia eléctrica también aproximadamente constante.

Un esquema ilustrativo de un equipo de este estilo se presenta a continuación:

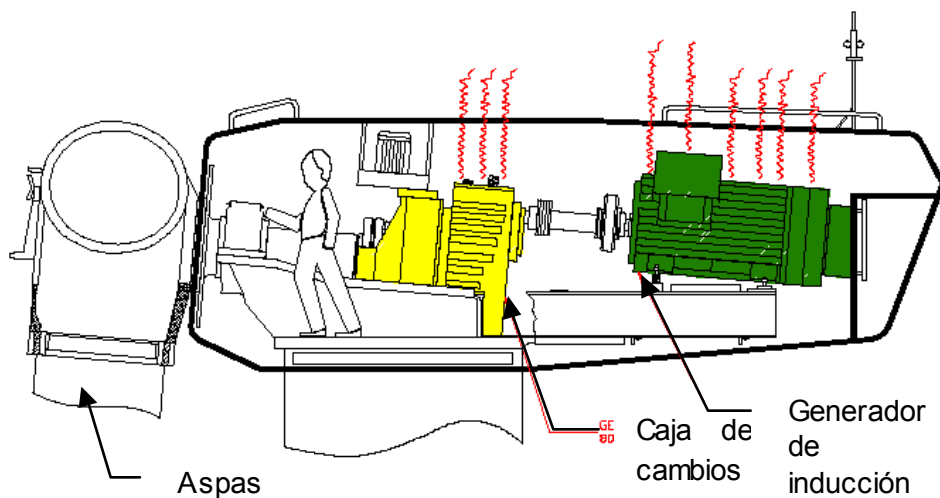


Gráfico 1. Esquema de un sistema de generación a gran escala, tomado de [5]

Los sistemas de generación a pequeña escala no se interconectan con la red eléctrica. Estos se usan generalmente para alimentar bancos de baterías que posteriormente se usan para alimentar electrodomésticos, sistemas de calefacción, sistemas de extracción de agua entre otros.

El esquema que sigue aproximadamente un sistema de este estilo es más sencillo que el de generación a gran escala. Debido a que la velocidad del rotor es alta (700-800 RPM) el eje de la turbina se conecta directamente al generador eléctrico sin necesidad de tener una caja reductora. La energía obtenida de allí es AC, seguidamente se pasa esta energía por un rectificador y por un regulador que mediante un sencillo sistema de control, se usa para cargar las baterías.

Se puede también conectar a las baterías un inversor que recibe energía eléctrica DC no regulada y la transforma en corriente eléctrica AC regulada a 120 Voltios 60Hz. De acuerdo con el tipo de regulador la onda puede ser cuadrada (poco eficiente), o una onda seno modificada (más eficiente). Después del inversor se puede conectare equipos eléctricos “estandar” como lo son televisores, neveras, motores AC (monofasicos o trifasicos) entre otros o directamente a la red eléctrica local.

Un esquema ilustrativo de un equipo de este estilo se presenta a continuación:

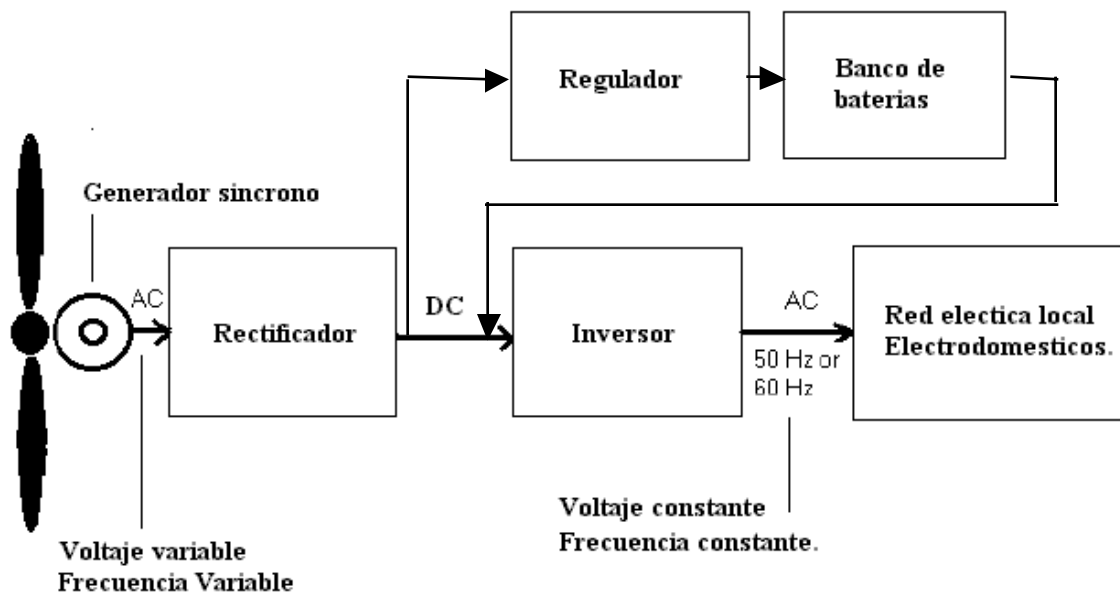


Gráfico 2. Esquema de un sistema de pequeña generación clásico.

Montar un sistema como el anterior es algo costoso (tanto en la implementación como en el mantenimiento) debido a elementos tales como la batería, que generalmente es una idéntica a la de los automóviles, y por lo tanto posee una vida útil limitada y en algunos casos necesita de continuo mantenimiento, y por los costos iniciales del inversor requerido.

Existen aplicaciones un poco más especializadas en generación a pequeña escala en las cuales es deseable alimentar un motor eléctrico a partir de la energía generada por la turbina. Esto con el fin de hacer mover bombas y compresores para refrigeración, bombeo, riego, plantas de desalinización de agua etc.

A partir de esto se desea entonces proponer un diseño para un sistema de generación eléctrica a pequeña escala basado en una turbina eólica, capaz de impulsar un motor AC que se usará en aplicaciones de refrigeración, bombeo, riego, plantas de desalinización de agua entre otras; y que no posea un banco de baterías ni un inversor para lograrlo. Esto con el objetivo de hacer más económico el conjunto, libre de mantenimiento y más eficiente.

El montaje propuesto se vería de la siguiente manera:

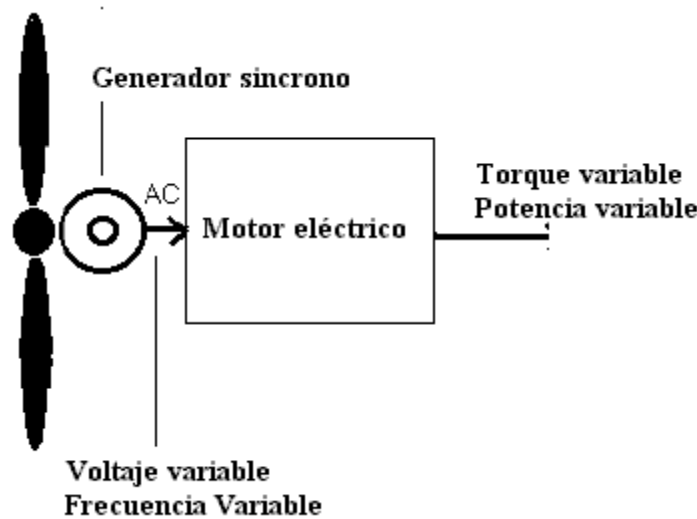


Gráfico 3. Esquema del montaje propuesto.

Al analizar el montaje propuesto, se presentan varias características propias del sistema y que hacen algo compleja la solución del problema.

Uno de ellas es la variabilidad de la energía eléctrica en la salida del generador, ya que se presentan condiciones de voltaje, potencia y frecuencia variable. Esto es debido a las condiciones también variables del viento que impulsa la turbina que a su vez impulsa el generador.

Por lo tanto, y a partir de estas condiciones eléctricas variables alimentar un motor en este tipo de montaje presenta un problema

- ¿De que manera se comportará todo el sistema bajo condiciones de viento variables (torque, potencia, velocidad de rotación)?
- ¿Que tipo de generador y que condiciones debe tener este para hace posible que el motor eléctrico pueda a su vez impulsar un compresor o una bomba?
- ¿Cómo diseñar o de que manera disponer los elementos que se usan en esta cadena de conversión de energía, de tal manera que al final se tenga la mayor eficiencia de conversión posible?

El problema presenta varias complicaciones al tratar de ser abordado.

- Modelamiento de la energía entregada por el generador bajo distintas topologías de construcción y carga de este.
- Modelamiento del comportamiento eléctrico y mecánico del motor a impulsar de tal manera que se pueda predecir su comportamiento previo a su uso en campo.

El siguiente documento muestra una metodología que intenta encontrar una respuesta a esta difícil pregunta.

## 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se intenta mediante esta tesis encontrar una solución al problema expuesto anteriormente y por lo tanto encontrar la manera de aumentar la eficiencia del conjunto generador-carga.

El primer paso en el desarrollo de la investigación es decidir qué tipo de motor, y que tipo de generador son los que se estudiarán. A partir de esta escogencia se desarrollará la investigación.

Dentro de la familia de generadores de donde se puede escoger tenemos básicamente tres tipos:

- Generadores DC (de imanes permanentes o de campo bobinado)
- Generadores asíncronos o de inducción
- Generadores síncronos (de imanes permanentes o de campo bobinado).

Los generadores DC no son de interés debido a que poseen partes que deben ser reemplazadas periódicamente como lo son las escobillas lo cual genera costos de mantenimiento que se desean evitar.

Los generadores de inducción son generalmente utilizados en proyectos de gran generación debido a la facilidad inherente que se poseen para poder ser conectados a la red eléctrica local (facilidad de sincronización), su protección natural a corto circuitos y el hecho que no necesitan mantenimiento debido a que no poseen partes que se desgasten con el tiempo. Sin embargo, el uso de este tipo de generadores en proyectos de generación a pequeña escala es inconveniente ya que su funcionamiento sin necesidad de estar conectado a la red eléctrica, que es la que impone la sincronía del sistema, exige componentes externos como condensadores, componentes que no son deseados.

Los generadores síncronos de imanes permanentes son ideales para la solución del problema de generación eléctrica a pequeña escala. Esto es debido a su alta eficiencia en comparación con los mismos generadores de campo bobinado y debido a que no son necesarios componentes externos como escobilla en el caso de generadores DC o condensadores en el caso de generadores de inducción para lograr generar energía eléctrica de manera confiable.

El motor que se escoge puede pertenecer a alguna de las siguientes familias:

- Motores DC
- Motores síncronos.
- Motores de inducción monofásicos.

- Motores de inducción trifásicos.

Como los motores de inducción trifásicos son los más comúnmente encontrados en la industria, son los más eficientes, no necesitan de mantenimiento y presentan características mecánicas deseables en el eje de salida entonces es el tipo de motor que se escogió para adelantar el estudio.

Entonces el par propuesto generador – motor como título de esta tesis ya estaría completo y se establece entonces que el estudio se realizará sobre el par generador síncrono de imanes permanentes con un motor de inducción trifásico.

Las preguntas expuestas en la introducción al problema entonces quedan ahora mejor formuladas y permiten ahora plantear la metodología de solución del problema.

## **2 METODOLOGÍA**

El primer paso es el estudio de las características más relevantes del conjunto y poder predecir con precisión el comportamiento del conjunto en varias condiciones de excitación.

Para caracterizar de manera correcta el conjunto, se realizaron pruebas en motores de inducción NEMA tipo B para de allí se extrajeron curvas de comportamiento típicas para este tipo de motores, de esta manera se pudo observar su comportamiento bajo condiciones de voltaje y frecuencia variable.

Seguidamente se diseñaron una serie de algoritmos de diseño para generadores síncronos de imanes permanentes. Mediante el uso de estos se puede extraer la topología de diseño básica para el diseño de un generador que se adapte de manera óptima a un motor de inducción tipo B.

## **3 ANTECEDENTES**

Se han realizado en la Universidad varias tesis, tanto de pregrado como de maestría, en donde se implementan modelos teóricos o donde se hacen caracterizaciones experimentales de generadores eléctricos de imanes permanentes. En las tesis donde se plantea un modelo teórico se ha hecho uso del modelo propuesto por Anders Grauers [2] en una tesis Doctoral de la Universidad politécnica de Chalmers en Suecia. El modelo siempre se ha usado “tal cual”, sin haberle nunca introducido alguna modificación.

Entre estas tesis podemos encontrar las de [8][9][11]

Las tesis experimentales se basan en conectar generadores previamente disponibles en el laboratorio a bancos de resistencias variables. A partir de allí se obtienen curvas de comportamiento para distintas condiciones de carga.

Ejemplos de tesis de este estilo son las de [8][9][10].

Los resultados obtenidos previamente sin embargo son algo limitados debido a que el modelo teórico de Grauers supone varias cosas poco convenientes para la solución del problema acá planteado además posee ecuaciones de optimización que son adecuadas para sistemas de gran generación.

Los resultados experimentales obtenidos previamente son limitados ya que la metodología propuesta, conexión de distintas resistencias como carga a un generador eléctrico y medir los parámetros resultantes, no es la mejor ni la más completa manera de caracterizar un generador.

No se han realizado tesis previas ni experimentales ni teóricas donde se estudien las características de motores eléctricos AC.

## **4 MARCO TEÓRICO**

Debido al enfoque que se le dio a la tesis, el marco teórico se centrará básicamente en exponer la teoría y el modelo que posee un generador eléctrico síncrono de imanes permanentes pasando antes por una breve explicación acerca del correcto uso de los imanes permanentes.

Se hace además un repaso somero y apenas superficial a la teoría de motores de inducción (o asíncronos).

Se termina por hacer una corta introducción a una tecnología conocida como la de variadores de frecuencia (Variable Speed Drive). Este tipo de aparatos fueron de gran utilidad durante el transcurso de la tesis.

### **4.1 IMANES PERMANENTES**

Los imanes permanentes son materiales capaces de retener residualmente una densidad de flujo magnético..

Las características que debe poseer un imán permanente deben ser alta retentividad, y una larga coercitividad. Estos dos parámetros básicamente indican la capacidad de un imán de retener por si mismo campo magnético después de haber sido sometido al proceso de imantado.

La curva que relaciona la intensidad de campo eléctrico ( $H$  A/m) con la densidad de campo magnético ( $T$  o  $Wb/mt^2$ ) en un material se llama la curva de histeresis. La coercitividad se ve como el valor donde  $B=0$  y la retentividad se ve cuando  $H=0$ .

Una curva típica para un material magnético es la siguiente:

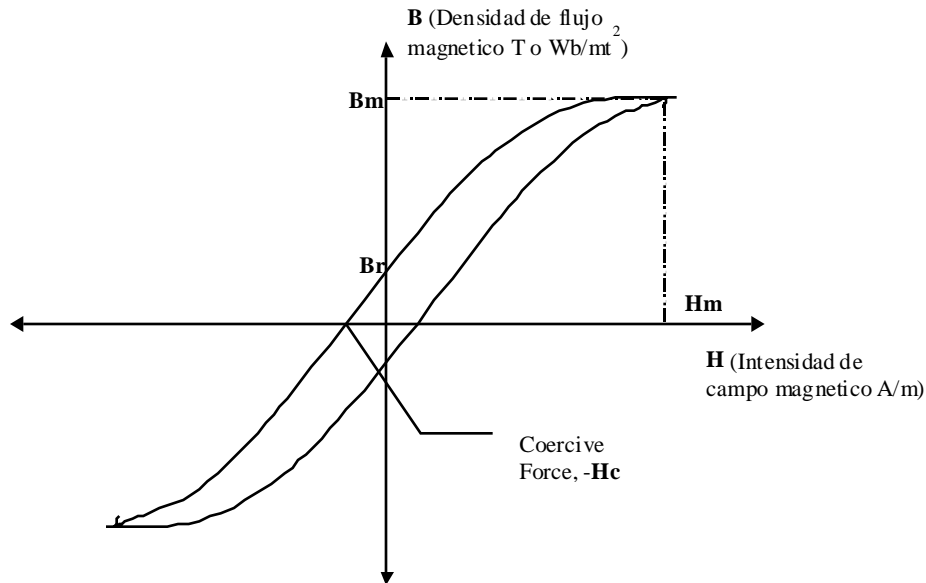


Gráfico 4. Curva de histéresis típica para materiales magnéticos.

Cuando un imán permanente se usa como fuente de campo magnético en generadores sincrónicos, estos se “desmagnetizan” debido a la reacción interna del bobinado del estator. Esta desmagnetización hace que el imán se mueva en el 4<sup>to</sup> cuadrante llamado “cuadrante de de-magnetización”.

Existe un punto de operación óptimo en ese 4<sup>to</sup> cuadrante del generador en el cual es posible extraer la mayor cantidad de energía disponible en los pares de imanes. Este punto de operación de máxima eficiencia se presenta cuando en la curva de histéresis presenta el valor máximo de  $B \cdot H$  ( $B$ =Densidad de flujo magnético (Tesla),  $H$ =Intensidad del campo magnético en amperios (A/m)).

Curvas de demagnetización típicas se presentan a continuación en el Gráfico 5

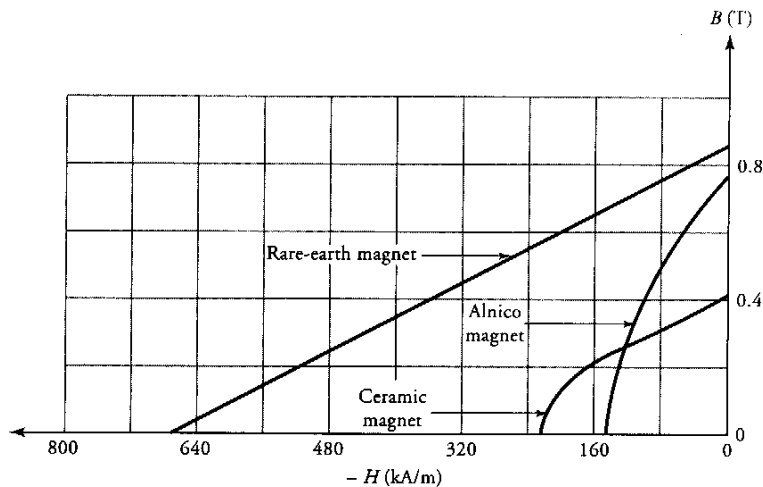


Gráfico 5. Curvas de de-magnetización típicas para varios tipos de imanes tomado de [1]

Para calcular este punto de operación es necesario construir la ecuación del circuito magnético del generador, de allí se extrae una línea de carga para el imán.

Al intersecar esta línea de carga con la curva de de-magnetización se obtiene el punto de operación del imán y la energía que el tiene disponible.

La ecuación del circuito magnético y por lo tanto el punto de operación del imán depende de las características de construcción físicas del generador como los diámetros de rotor, estator, carcaza, longitud de bobinado y velocidad de operación.

Una curva de carga de donde se obtiene un punto de operación para obtener el punto de mayor energía disponibles presenta a continuación:

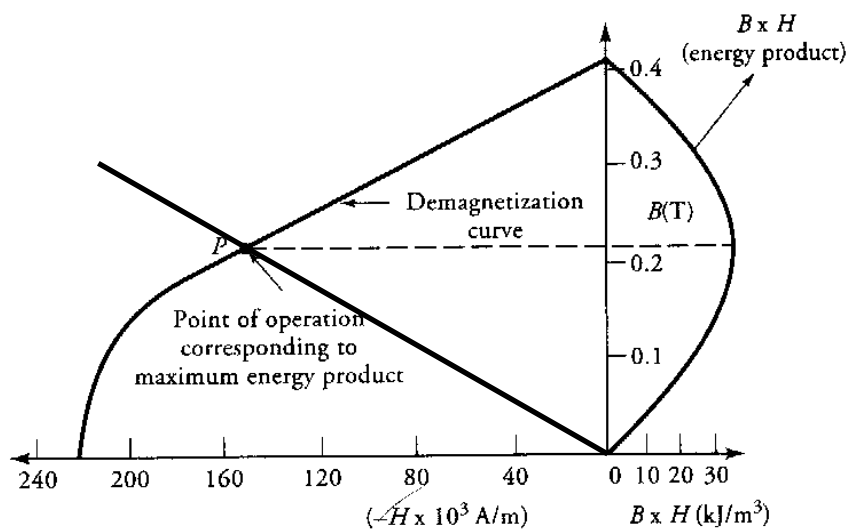


Gráfico 6. Línea de carga y punto de operación para un imán permanente tomado de [1].

En [13] se pueden encontrar catálogos donde se presenta los puntos más importantes sobre esta curva para varias familias de imanes permanentes.

## 4.2 GENERADORES SINCRÓNICOS

### 4.2.1 Conceptos básicos

Un generador sincrónico es una máquina que genera energía eléctrica AC a una frecuencia llamada la "frecuencia sincrónica", de allí su nombre. Esta frecuencia viene dada por la siguiente ecuación:

$$N_s = 120 f / P$$

$N_s$ : Velocidad angular del eje de entrada en RPM.

$f$ : Frecuencia de salida en Hz

$P$ : No de polos del generador

El proceso por el cual se convierte energía mecánica en eléctrica se explica mediante el uso de las leyes de Maxwell, en especial la ley de inducción de Faraday.



El principio general para generadores de este tipo es el siguiente: Al ser girada de manera constante una espira o bobina construida de un alambre conductor dentro de un campo magnético de intensidad constante, el flujo que atraviesa esta bobina cambiará.

Al ser el flujo magnético variable para esta bobina tendremos, y de acuerdo con la ley de inducción de Faraday, en los extremos de la bobina una diferencia de potencial eléctrico.

Esta diferencia de potencial eléctrico es conocida con el nombre de fuerza electromotriz y es lo mismo que un voltaje.

Si existe una carga conectada a un extremo de la bobina tendremos un circuito cerrado lo cual hará que una corriente que fluye a través de él circuito.

Para generar el campo magnético requerido se puede hacer uso bien sea de un electroimán o de un imán permanente. La ventaja de usar imanes permanentes es que estos no necesitan de una fuente de alimentación externa para producir el campo. Sin embargo la ventaja de los electroimanes es la posibilidad de poder controlar la magnitud del campo magnético por medio de la fuente externa que lo produce.

Por razones de eficiencia es mejor un generador de imanes permanentes en vez de uno de electroimanes.

La construcción de un generador de imanes permanentes comienza con imanes deseablemente muy fuertes fabricados a partir generalmente tierras raras o de materiales cerámicos. Estos imanes se colocan en el rotor de la máquina con el fin de eliminar la necesidad de escobillas en el bobinado de armadura lo cual generaría mayores pérdidas eléctricas.

Una de las variables de diseño más importantes es el la manera de bobinar el estator.

Bobinar bien sea un motor o un generador (se bobinan de la misma manera) no es una tarea sencilla. Es un proceso que requiere de mucha experiencia práctica y de un conocimiento previo teórico bastante especializado. Libros como [1] presentan los conceptos básicos necesarios para entender este complicado proceso. Libros como [7], [12] hacen una presentación más detallada del proceso.

El bobinado básicamente consiste en una serie de bobinas individuales, (ver el Gráfico 7. Bobina individual). Cada bobina de estas posee ciertas características geométricas definidas por las características del estator (Numero de ranuras, número de polos, número de fases etc). El bobinado total por fase se realiza conectando de manera especial las bobinas que resulten del proceso de construcción.

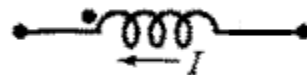
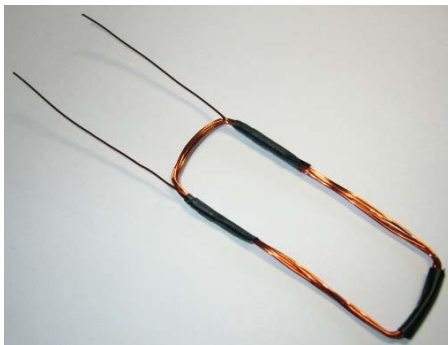


Gráfico 7. Bobina individual y su representación eléctrica.

Estas bobinas individuales se pueden conectar bien sea en serie o en paralelo o en una combinación de ambas. No importando la manera en la cual se conecten, y para el mismo tipo de imán y velocidad de operación se va a tener la misma potencia generada. Sin embargo lo que se ve afectado es la manera en la cual se entrega esta potencia.

Se podría tener entonces un generador de alto voltaje y poca corriente, o el caso contrario, alta corriente y bajo voltaje.

Se podría, por ejemplo, tener un bobinado que produzca por ejemplo 6 Amperios y 1 voltios (6W) o 6 voltios y 1 amperio (6W también), o 3 voltios y 2 Amperios. El número de combinaciones posibles para cada tipo de generador depende de la cantidad de polos que tenga el generador.

Entonces los generadores que producen altas corrientes ( $>10A$ ) y bajos voltajes ( $<24V$ ) se usan preferiblemente para la alimentación de inversores; El caso contrario voltajes altos y corrientes bajas se usan pra alimentar calentadores eléctricos y aplicaciones similares.

Se presenta a continuación en el Gráfico 8, el cual muestra los diferentes tipos de arreglos que se pueden hacer con 6 bobinas individuales y que representan los ejemplos previamente presentados.

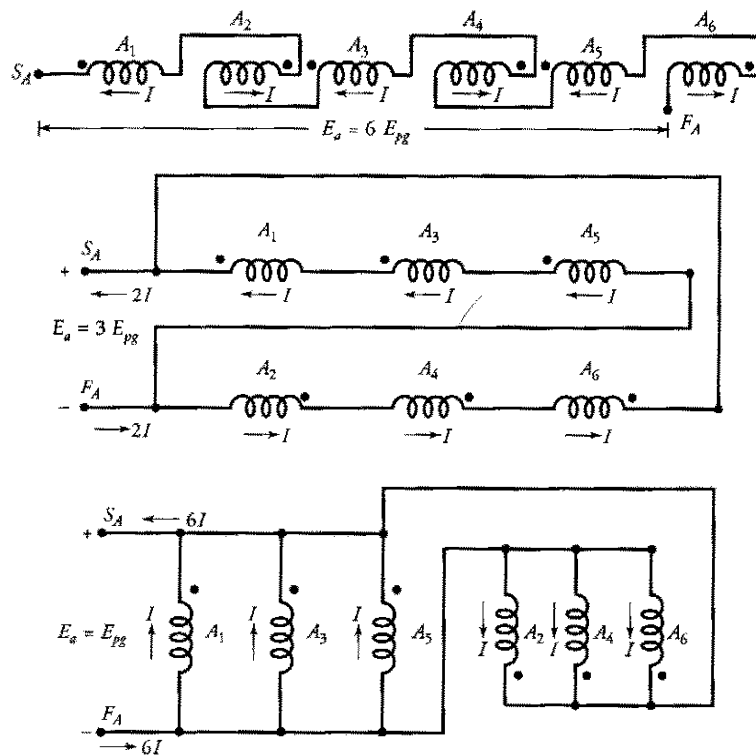


Gráfico 8. Diferentes tipos de arreglos eléctricos por fase que se pueden tener con 6 bobinas individuales. (tomado de [1])

#### 4.2.2 Circuito equivalente

Para predecir el comportamiento bajo carga de un generador síncrono es necesario desarrollar un circuito equivalente, un modelo es el siguiente:

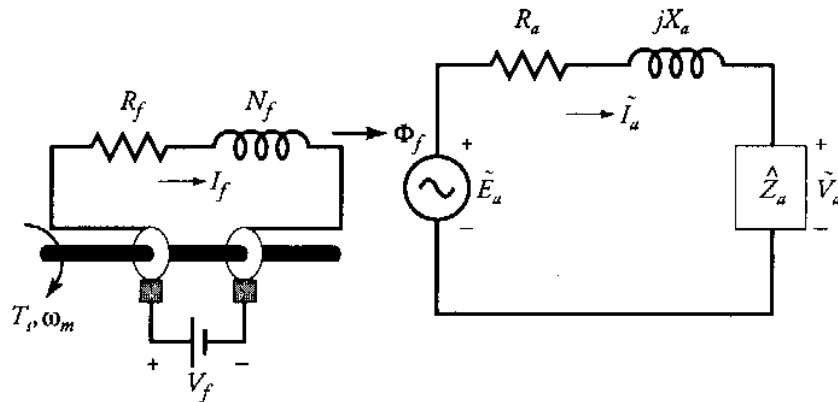


Gráfico 9. Circuito equivalente para un generador síncrono, (tomado de [1])

El circuito de la derecha es el que genera al campo magnético necesario. En el caso de un generador de imanes permanentes este pedazo se reemplaza por un circuito magnético apropiado.

En el circuito a la derecha la fuente de voltaje es la representación del voltaje inducido en el estator, la resistencia modela la resistencia del estator, y por último la inductancia modela el hecho que la corriente que pasa por el bobinado también genera un campo magnético que está desfasado  $90^0$  respecto al campo externo y hace por lo tanto que la corriente y el voltaje se desfasen en ese valor.

Para encontrar los valores equivalentes de estos parámetros eléctricos en un generador cualquiera se realizaran las siguientes pruebas:

##### *Test de circuito abierto:*

Se mide el voltaje entre líneas sin carga. De allí se obtiene el valor de  $E_a$  para diferentes velocidades de operación. Este test se hace para varios valores de velocidad del generador.

##### *Test de resistencia:*

Se mide la resistencia del bobinado (en caliente) mientras que el generador esté apagado. A partir de este test se obtiene la resistencia por fase del generador.

##### *Test de CC:*

Se cortocircuitan todas las líneas del generador y se mide la corriente que pasa por ellas. Este test se hace para varios valores de velocidad del generador.

Para calcular la inductancia síncrona se hace uso de la siguiente expresión

$$Z_s = V_{OC} / I_{SC} \quad X_s = (Z_s^2 + R_a^2)$$

### 4.2.3 Potencia generada con bobinados eléctricos y con electroimanes

La potencia de entrada al generador es el torque que desarrollado por el mismo multiplicado por la velocidad de giro del eje.

Las pérdidas en el generador son:

- Pérdidas mecánicas.
- Pérdidas eléctricas en el estator.
- Pérdidas eléctricas por histéresis y corrientes de fuga.

La potencia de salida es:  $P_o = 3 V_A I_A \cos(\theta)$ , donde  $\cos \theta$  es el factor de potencia

En un generador síncrono con rotor bobinado, (en donde el campo magnético necesario se genera mediante una fuente de alimentación eléctrica externa y electroimanes), es posible dar un valor de potencia y corriente nominal para cierto valor de velocidad de entrada. Es decir, para cualquier tipo de carga que le conectemos a un generador de este tipo podremos extraer del generador de alguna manera su potencia nominal y entregársela a esa carga.

Esto es posible ya que se posee un control sobre la intensidad del campo magnético en el rotor, esto se logra variando la corriente entregada por la fuente externa al bobinado de campo, y por lo tanto haciendo que la fuerza del campo magnético sea mayor induciendo un mayor voltaje y por lo tanto una mayor potencia.

Sin embargo en los generadores de imanes permanentes al no poder tener un control sobre la intensidad del campo magnético en el rotor (ya que este es inducido mediante los imanes permanentes y es por lo tanto una constante), tendremos que la potencia que entrega el generador hacia la carga depende del tipo de carga y de su magnitud.

Por esta razón es necesario caracterizar el comportamiento del generador con distintas cargas conectadas a él (Inductivas, Resistivas, Capacitivas) . A este comportamiento se le conoce como la "característica externa".

La curva de la característica externa de un generador de imanes permanentes se ve de la siguiente manera:

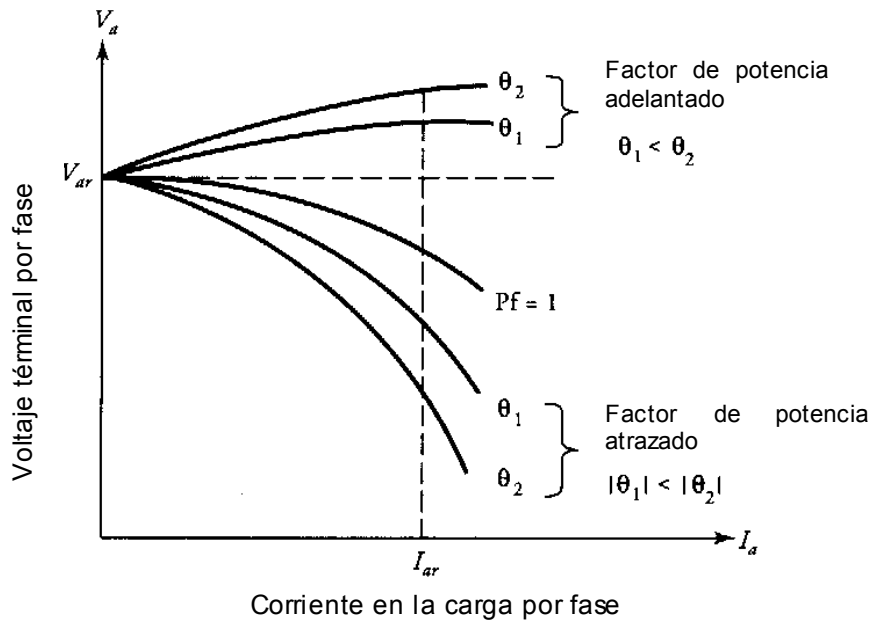


Gráfico 10. Características externa para un generador de imanes permanentes. (tomado de [1])

Como se puede observar claramente, el producto del valor  $Re(V \cdot I)$ , (Potencia) no es una constante a medida que nos movemos por la curva. Esto confirma entonces que la potencia que entrega el generador depende de la carga a el conectada.

En generadores donde se usan electroimanes la característica externa se ve de la siguiente manera:

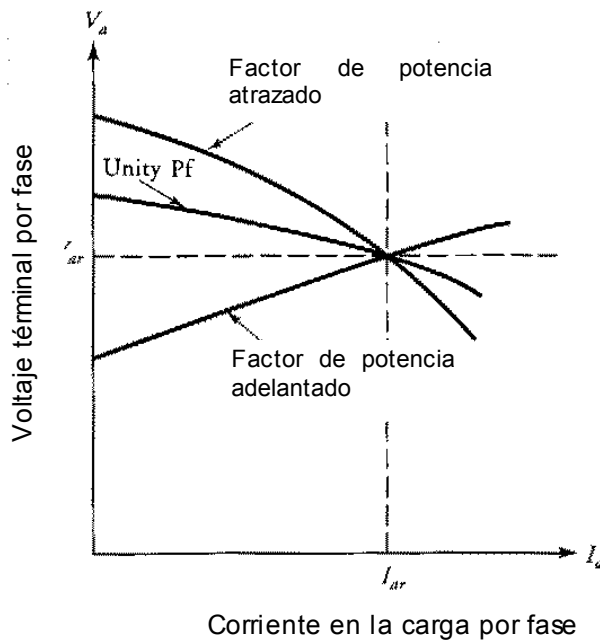
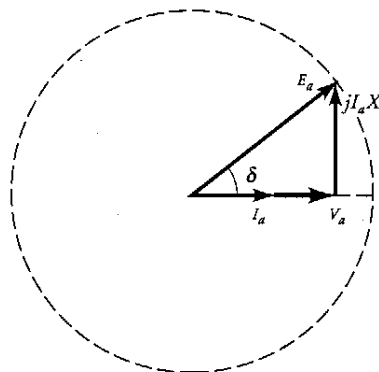


Gráfico 11. Característica externa para un generador síncrono de rotor bobinado. (tomado de [1])

Como se puede observar ajustando el valor de la corriente de campo se puede obtener potencia nominal.

Para predecir esta curva se hace uso del hecho que en el caso de generadores de imanes permanentes el valor de la Fuente de voltaje  $E_a$  es aproximadamente una constante.

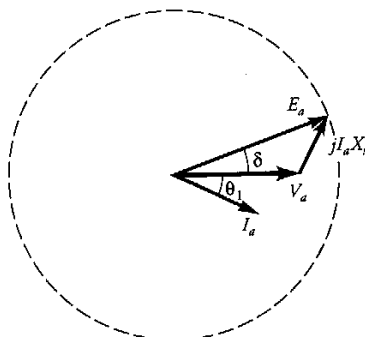
Por lo tanto si hacemos el diagrama vectorial de los voltajes en el circuito tendremos un comportamiento como el siguiente:



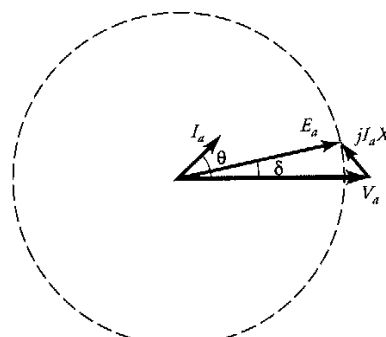
*Carga resistiva*

Gráfico 12. diagrama vectorial para generador síncrono y carga resistiva. (tomado de [1])

El lugar en que cae esta grafica es un círculo, el ángulo que hacen los voltajes  $E_a$  y  $V_a$  se conoce como el ángulo de potencia ( $\delta$ ), ese ángulo depende del valor y el tipo de la carga conectada al motor. La anterior gráfica es para una carga puramente resistiva, las dos siguientes gráficas presentan cargas capacitivas e inductivas.



*Carga Inductiva*



*Carga capacitiva*

Gráfico 13. Diagramas vectoriales para generadores síncronos. (tomado de [1])

El valor máximo de potencia se logra al acoplar la impedancia de la carga con el generador, de tal manera que el generador vea una carga puramente resistiva y del mismo valor de su resistencia interna.

Este modelo junto con las pruebas descritas anteriormente podría llegar a predecir aproximadamente el comportamiento del generador bajo distintas cargas.

#### 4.2.4 Diseño de generadores síncronos

El diseño de un generador sincrónico no es para nada una tarea fácil. El problema en el momento de hacer un diseño se centra básicamente en los 2 siguientes pasos:

- Encontrar la manera de predecir la intensidad y forma del campo magnético que genera el rotor sobre el estator.
- Una vez conocida la manera en que se distribuye el campo, es necesario mirar la manera en que interactúa el campo con el bobinado en el estator, la carcasa y en general toda la geometría del generador.

Todo esto se hace resolviendo las ecuaciones de campo necesarias. (Ecuaciones de Maxwell) para de esta manera hallar el voltaje (EMF) inducida sobre el bobinado de estator.

El problema real es que predecir la forma del campo, y la manera en que este interactúa con la geometría del motor es un problema no lineal que involucra ecuaciones diferenciales parciales.

La solución es resolver las ecuaciones mediante métodos numéricos tales como diferencias finitas, elementos finitos etc.

#### 4.3 MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN

Los motores de inducción son los más comúnmente encontrados en la industria. Esto se debe a que no poseen partes tales como escobillas, conmutadores y otros que podría llegar a desgastarse con el tiempo. Esto los hace unos motores de fácil operación y nulo mantenimiento.

Constan básicamente de dos partes, un estator donde se aloja bobinado de campo y una "jaula" que hace las veces de rotor. El bobinado del rotor es trifásico y se construye de tal manera que tenga una separación eléctrica de  $120^\circ$ .

La jaula se construye a partir de una serie de barras conductoras distribuidas simétricamente alrededor de un eje. Estas barras se unen y cortocircuitan en sus extremos por medio de un anillo de tal manera que formen un circuito cerrado.

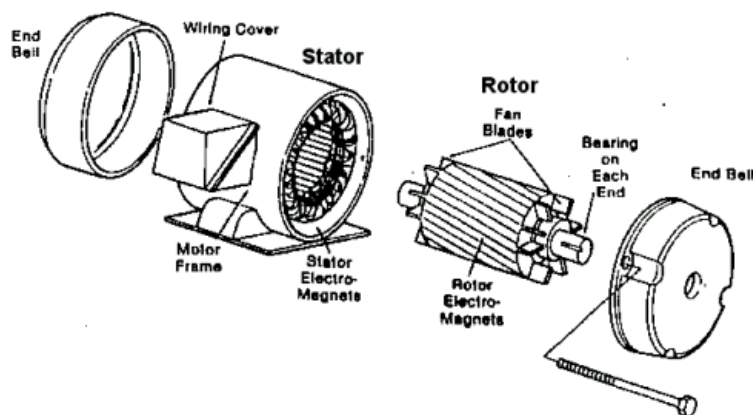


Gráfico 14. Esquema de un motor de Inducción.

En los motores de inducción el bobinado del estator se alimenta por medio de una fuente AC bien sea monofásica o polifásica. Esa fuente AC genera un campo magnético que se mueve alrededor del rotor con velocidad e intensidad constante. La velocidad con la cual gira este campo se denomina “velocidad sincrónica”

Ese campo magnético que varía con el tiempo (debido a su rotación) induce un voltaje en el rotor o la jaula debido a la ley de inducción de Faraday. Como un voltaje fue inducido en las barras, y como estas forman un circuito cerrado, tendremos que una corriente empezará a fluir por ellas; De acuerdo con la ley de Maxwell, si existe una corriente que circula a través de un conductor en presencia de un campo magnético, este sentirá una fuerza inducida lo cual hará que el rotor empiece a rotar en el mismo sentido de la rotación del campo magnético.

Se podría decir entonces que un motor de inducción se comporta de la misma manera que un transformador en donde el bobinado secundaria rota.

Hay que notar que el rotor del motor de inducción siempre gira a una velocidad menor que la velocidad de rotación del campo magnético. Esto es necesario ya que si los dos campos rotaran con la misma velocidad, entonces el voltaje inducido sobre el rotor sería nulo. Si el voltaje inducido es nulo entonces no circula corriente y no existiría una fuerza que hiciera mover el rotor. A la diferencia porcentual de velocidades se le conoce con el nombre de “deslizamiento” (s).

$$s = (\omega_s - \omega_m) / \omega_s$$

La frecuencia que se induce en el rotor también depende del deslizamiento y viene dada por:

$$f_{\text{ROTOR}} = s \cdot f$$

El deslizamiento en este tipo de motores es variable y depende del torque de salida que se le exija al motor, por lo que tendremos que la velocidad de salida no es constante.

#### 4.3.1 Características eléctricas del motor

Al desarrollar un circuito equivalente de un motor de inducción se llega al siguiente modelo:

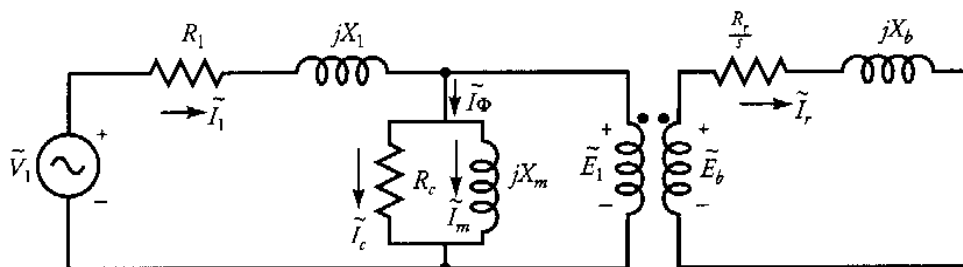


Gráfico 15: Circuito equivalente para un motor de inducción. (tomado de [1])



El circuito equivalente posee básicamente dos segmentos importantes y cada cual representa un lado del transformador, el primario y el secundario.

Este es el modelo exacto del motor, sin embargo es de poca utilidad ya que no se presenta explícitamente el valor del deslizamiento. Refiriendo todos los parámetros eléctricos hacia el lado del estator y relacionando la corriente en el rotor con el deslizamiento se llega al siguiente modelo:

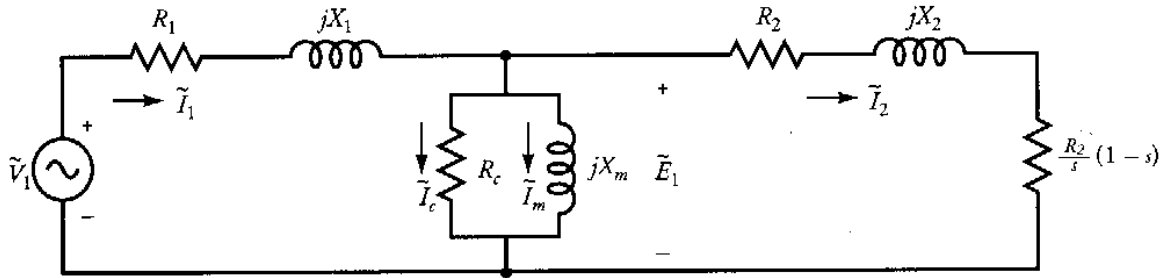


Gráfico 16. Modelo aproximado para un motor de inducción. (tomado de [1])

Como se puede observar los parámetros eléctricos del modelo dependen del deslizamiento, y por lo tanto del punto de operación del motor. En el modelo además se observa que la carga que alimenta (en este caso el torque de salida) se representa por medio de una resistencia. Esta resistencia se conoce con el nombre de “resistencia dinámica”.

#### 4.3.2 Torque de salida en motores de inducción

Interesante es que a partir del modelo propuesto para el motor se puede llegar predecir aproximadamente su comportamiento mecánico. Este comportamiento se ve de la siguiente manera:

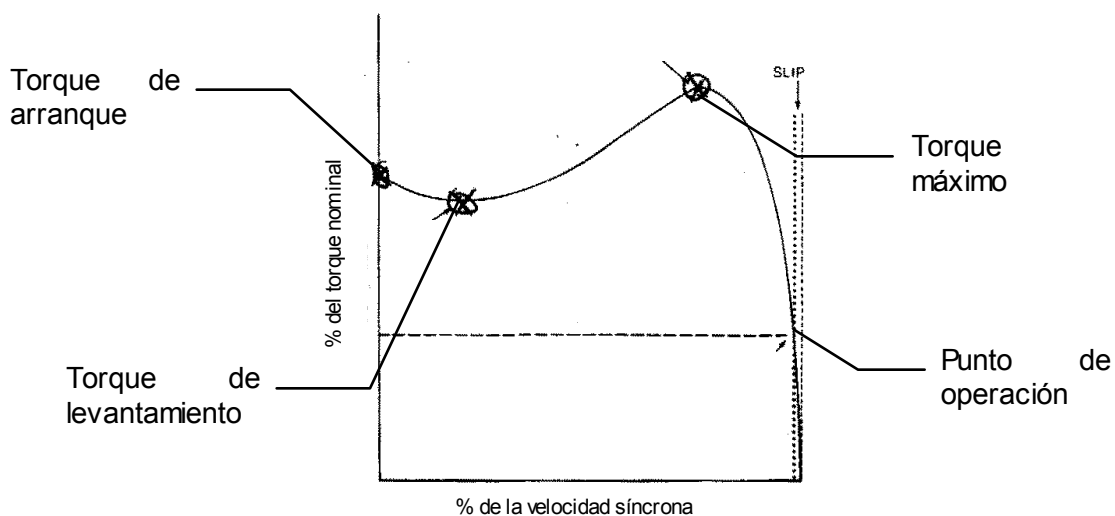


Gráfico 17. Características mecánicas de un motor de inducción. (tomado de [14])

Se puede identificar en la grafica anterior varios puntos de interés los cuales se explican a continuación:

*Torque de arranque:* Es el torque que produce el motor cuando su deslizamiento es cero. Es un criterio de selección importante ya que si el torque de arranque requerido por la carga es mayor que este el motor no arrancará así la potencia del mismo sea la requerida.

*Torque de levantamiento:* Es el mínimo torque desarrollado durante el periodo de aceleración del motor.

*Torque máximo:* Máximo valor de torque que puede producir un motor en operación. Este punto no es el punto de operación ya que la corriente en ese momento es muy alta.

*Punto de operación:* El punto donde se desarrolla la potencia especificada en la placa del motor a velocidad nominal.

### 4.3.3 Condiciones transientes en motores de inducción.

Las condiciones transientes más importantes y notorias se presentan en el momento del arranque, un motor de inducción en ese momento exige una gran cantidad de corriente de la fuente que lo alimenta; Este pico de corriente es aproximadamente de 2 a 7 veces la corriente nominal del motor.

Debido a esto existen varias formas de arrancar un motor de inducción sin tener que exponer el motor a las condiciones de alta corriente que se presentan en el arranque.

Arrancadores suaves o por bajo voltaje, Diseños de rotores con doble jaula, Arranque  $\Delta$ -Y (Delta - Estrella), Arranque con bobinado parcial o fraccionado, Arranque con resistencias en serie con la red, Arranque con reactancias en serie con la red.

El estudio realizado se hizo para un motor en condiciones de estado estable, por lo tanto el problema del arranque no se consideró en ningún momento.

### 4.3.4 Motores estándares en la industria

La NEMA (National Electrical Manufacturers Association) definió seis tipos de motores de inducción estándares. Que van desde la letra A hasta la F; Cada cual posee características propias. Las diferencias entre tipos de motores se presentan el % de torque de arranque que son capaces de dar, la corriente de arranque que exige, el tipo de carga que puede impulsar eficientemente, y la inercia que posee.

Además de estas especificaciones generales se tienen otras relacionadas con la construcción del motor. Por ejemplo, el tipo de protección térmica del bobinado, el tipo de carcasa, tipo de ventilación requerida, dimensiones del eje entre otras. Es de particular importancia tener presentes las especificaciones acerca del tipo de protección térmica en el bobinado.

Tipo de aislamiento	Temperatura (°C)
A	105
B	130
F	155
H	180

#### 4.3.5 Alimentación de un motor AC bajo condiciones de voltaje y frecuencia variable

Cuando un motor AC de inducción es operado en condiciones de voltaje y frecuencia variable cambiará su desempeño en comparación a las condiciones dadas en la placa y en su diseño.

Cuando el motor es alimentado con frecuencia variable se tiene un comportamiento similar al siguiente:

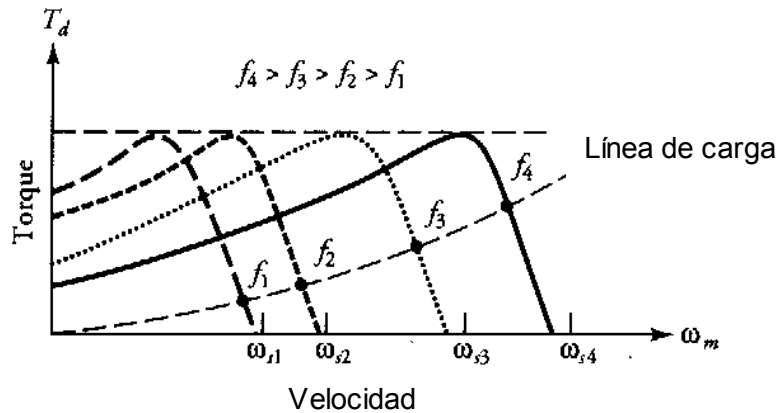


Gráfico 18. Característica torque velocidad para diferentes frecuencias de operación y voltaje ajustado. (tomado de [1])

Cuando se trabaja a frecuencias variables y para mantener un flujo magnético constante en el entrehierro es necesario variar el voltaje de operación en la misma proporción en la cual fue variada la frecuencia de operación.

La anterior gráfica hace uso de ese hecho y por lo tanto su interpretación depende de conocer la manera en la cual se construye.

Cuando un motor se alimenta con voltaje variable se obtiene la siguiente respuesta:

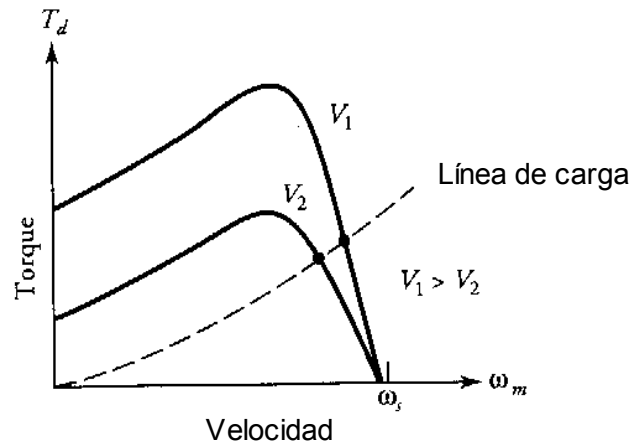


Gráfico 19. Características torque-velocidad como función del voltaje de alimentación. (tomado de [1])

Cuando los motores son excitados con frecuencias y voltajes más bajos que los nominales su velocidad de rotación se ve reducida. Como los sistemas de refrigeración en los motores son generalmente por convección forzada (se acostumbra poner un ventilador de giro solidario con el motor, para de esta forma generar una corriente de aire que retira el calor sobre el motor), entonces a velocidad baja de rotación se tendrá que la tasa de remoción de calor es menor y por lo tanto se tiene que el motor sube su temperatura por encima de la temperatura de operación de diseño.

Pero, ¿Qué pasa cuando un motor es alimentado con voltaje y frecuencia variable?, ¿Y como varían los distintos parámetros eléctricos y mecánicos del motor?

La respuesta completa es incierta, se encuentra literatura especializada en la cual se encuentran gráficas cualitativas donde se presenta el comportamiento del motor cuando se varían sus condiciones nominales en un porcentaje máximo 5%. Sin embargo estos datos no son muy interesantes.

Las siguientes graficas tomadas de [14] muestran por ejemplo lo que sucede cuando un motor se opera bajo condiciones variables de variación en voltaje y frecuencia de operación:

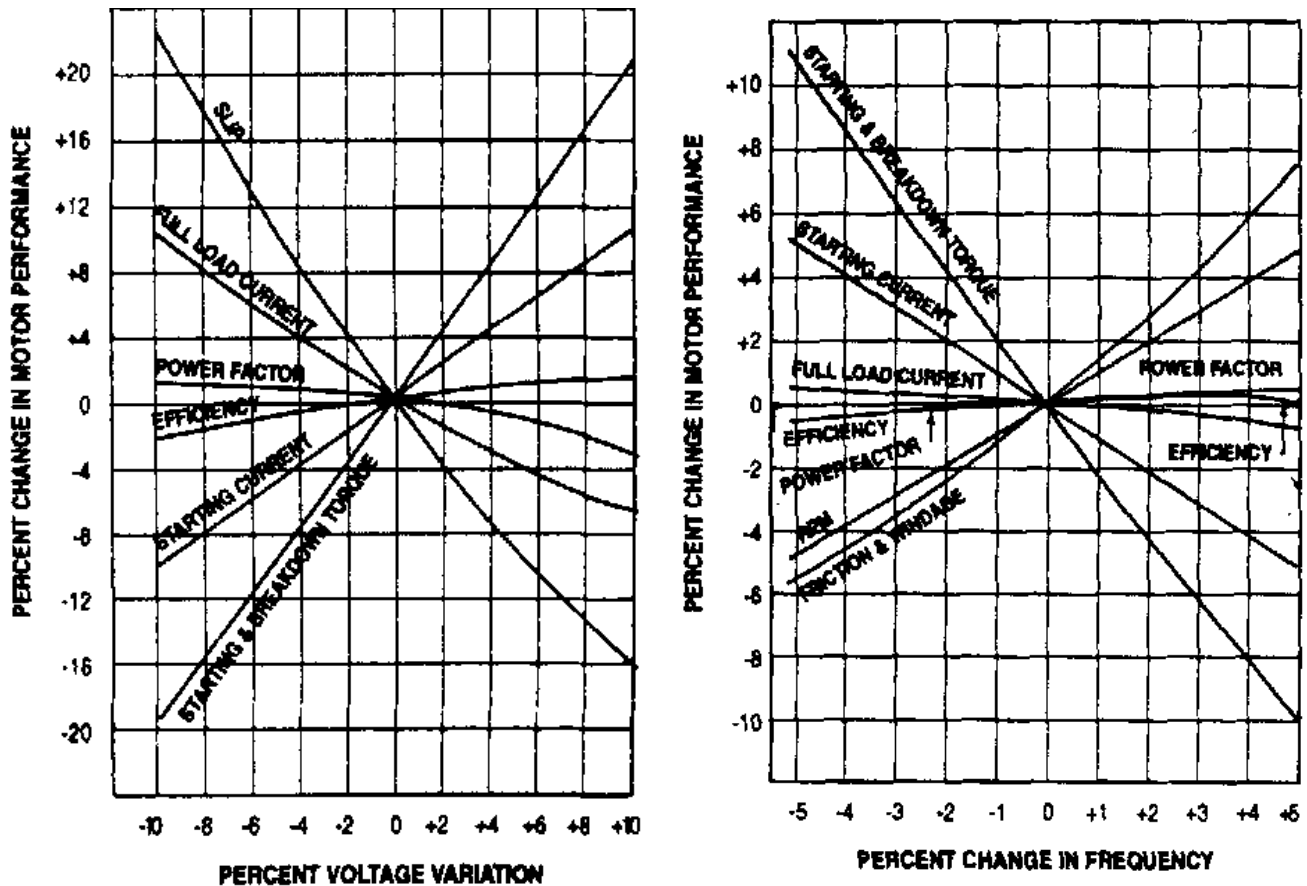


Gráfico 20. Comportamiento mecánico y eléctrico de un motor de inducción al ser sometido a variaciones en las variables eléctricas de alimentación.

Sin embargo estas graficas muestran el comportamiento para variaciones independientes en los parámetros de entrada eléctrica muy pequeños ( $\pm 10\%$ ).

Lo que sucede cuando ambos parámetros eléctricos cambian al tiempo (frecuencia y voltaje de excitación) y en proporciones mayores es una incógnita.

#### 4.4 VARIADORES DE FRECUENCIA

Desde hace varios años se han hecho populares los variadores de frecuencia para impulsar de manera eficiente motores de inducción de acuerdo con las cargas reales impuestas sobre él.

Este tipo de variadores básicamente lo que hacen es tomar la alimentación estándar (240V – 60Hz) convertirla en un voltaje DC por medio de rectificadores y filtros. Seguidamente y de acuerdo con las ordenes impartidas por el usuario convierten es voltaje DC en Voltaje AC con la frecuencia y con el voltaje deseado.

Para mantener el motor funcionando en condiciones favorables de operación, el voltaje de alimentación debe ser variado en la misma proporción en la cual se varió la frecuencia de salida.

Sin embargo la onda de salida no es de forma senoidal, si no que se ve como un tren de pulsos de ancho variable pero de amplitud constante esto se conoce con el nombre de onda seno modificada.

La frecuencia deseada de salida se simula haciendo variar de positiva a negativa el valor de amplitud de la onda de salida. Mientras que el voltaje se simula variando el ancho de los pulsos. Entre más ancho sea el pulso que se le envié al motor más alto será el voltaje de excitación del motor. Este tipo de modulación se conoce con el nombre de PWM (Pulse Width Modulation).

#### **4.4.1 Motores diseñados para operar bajo el mando de un variador de frecuencia**

Se han desarrollado nuevos motores diseñados especialmente para ser operados bajo el mando de un variador de frecuencia, se les conoce con el nombre genérico de “Inverter duty motors”

Entre las características más importantes que debe cumplir un motor de este tipo son:

Aislamiento térmico tipo “F”: Para soportar las elevadas temperaturas de operación generadas por la falta de convección sobre el estator y por el hecho de ser excitado con una onda no senoidal

Aislamiento eléctrico entre fases: El aislamiento eléctrico entre fases debe ser mejor que en otro tipo de motores ya que los picos de corriente que soportan son en algunos casos mayores.

Diseño especial de bobinados y de la manera de ubicarlos en el motor, esto con el fin de eliminar diferencias de potencial interna entre ellos

Pintura especial antiestática para prevenir descargas hacia la corona del motor.

Una construcción robusta y con tolerancias de manufactura muy estrictas, Esto se hace para tener un air gap muy uniforme. Esto se hace para reducir picos de corriente en el motor y para aumentar la vida de los rodamientos.

Un buen diseño de motor exige un rotor especialmente construido de tal manera que sea capaz de soportar las fuertes y súbitas variaciones de flujo en el air gap para minimizar los armónicos generados en él.

## **5 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA: MOTORES ELÉCTRICOS**

Tal y como el problema es presentado, es necesario conocer el comportamiento de un motor eléctrico de inducción bajo las condiciones de alimentación presentadas en el capítulo 1 al inicio de este documento.

Aplicaciones tradicionales para los motores de inducción incluyen la alimentación de este con valores de voltaje y frecuencia nominales (usualmente 220-440V 60-55Hz).

Aplicaciones industriales un poco más especializadas utilizan la ayuda de un variador de frecuencia para poder alimentar el motor a distintas frecuencias de voltaje, y por lo tanto obtener velocidades del eje de salida variables.

Este tipo de variadores pueden ser, como se había mencionado antes, ajustados para obtener una operación de torque constante o de torque variable.

En las aplicaciones de torque constante el voltaje de alimentación es mantenido en un nivel alto, proporcional al cuadrado de la frecuencia de operación.

En las aplicaciones de torque variable el voltaje de alimentación es linealmente proporcional al valor de la frecuencia de operación.

Operar motores bajo el tipo de condiciones impuestas por un variador de frecuencia (variable speed drive) es una labor compleja desde el punto de vista eléctrico para el variador. Sin embargo, y para lograr el objetivo de control, el variador no posee limitaciones en la potencia que puede extraer de la red eléctrica; Este límite de estaría dado por las restricciones propias de la electrónica asociada a la construcción física del variador.

Esto se debe a que la fuente de alimentación se puede considerar infinita y de allí se podría hasta cierto punto extraer una cantidad muy importante de corriente sin limitaciones aparte de la capacidad máxima de la instalación eléctrica que se posea.

Una turbina eólica de pequeña generación no puede ser considerada una fuente infinita de potencia, como si podía ser considerada la red de distribución eléctrica. Por lo tanto, el problema presente es el de encontrar como opera un motor de inducción AC bajo las condiciones de potencia impuestas por una turbina eólica que entrega voltaje, frecuencia y potencia variable eléctrica en su salida.

Entonces se desea conocer la respuesta mecánica y eléctrica del motor bajo estas condiciones variables.

P.e, Un motor opera bajo condiciones nominales con una conexión Y- $\Delta$ , presenta un torque de 16 Nm y opera a 220V -3.6A con un factor de potencia de 0.86 atrasado.

El objetivo es poder dar estos mismos datos bajo cualquier otra condición de excitación arbitraria.

Se podrían haber tomado dos caminos distintos para solucionar esta parte del problema. Un camino es el teórico, y el otro es el experimental.

Se optó por la ruta experimental ya que es más rápida y presenta resultados que a primera mano son más importantes y más precisos que una aproximación teórica. Además la aproximación teórica es mucho más compleja y obtener resultados satisfactorios es muchísimo más complicado.

Lo ideal sería haber realizado una aproximación teórico práctica y de esta manera hallar la solución del problema. Sin embargo esto representaría haber gastado mucho más tiempo del disponible.

Entonces, y con el objetivo de resolver el problema, se realizaron varias pruebas sobre un motor eléctrico montado sobre un banco de pruebas especialmente diseñado para este fin. El procedimiento detallado se presenta a continuación.

## 5.1 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS

Con el fin de caracterizar el comportamiento del motor a diferentes frecuencias y voltajes de operación fue necesario el montaje de un banco de pruebas en donde se pudieran

variar de manera controlada la frecuencia de operación, el voltaje y el deslizamiento del motor de inducción a caracterizar.

El banco de pruebas debía permitir además medir variables de operación como el torque entregado por el motor, la potencia eléctrica suministrada al mismo, la velocidad de giro y la eficiencia del conjunto.

Se resume a continuación la solución que se le dio al problema para de esta manera poder tomar los correspondientes datos.

Característica deseada:

- Deslizamiento variable.
- Frecuencia de entrada Variable.
- Voltaje Variable.

Variables a medir:

- Torque desarrollado por el motor.
- Velocidad de giro del eje de salida.
- Parámetros eléctricos del conjunto. ( I, V, PF)

### **5.1.1 Deslizamiento variable**

Para lograr obtener diferentes valores para el deslizamiento es necesario contar con un mecanismo que permita cargar o frenar el motor a caracterizar a voluntad.

Se optó por tener otro motor de inducción enfrentado al primer motor pero girando en sentido contrario.

La alimentación del motor de freno se hace mediante un auto transformador de bastante capacidad.

La corriente que soportará el bobinado de este motor será muy alta (en condiciones de extremo frenado, de 10 a 15 veces la corriente nominal).

### **5.1.2 Frecuencia Variable**

Gracias al un variador de velocidad para motores de inducción es posible controlar la frecuencia con la cual se alimenta al motor. Sin embargo la onda con esta frecuencia no es senoidal sino es una onda modulada en PWM. El error que se incurre al usar este tipo de ondas es muy bajo y no afecta en principio los datos obtenidos.

### **5.1.3 Voltaje Variable**

Poniendo a la salida del variador de velocidad un auto transformador, es posible controlar la magnitud del voltaje entregado al motor.

### **5.1.4 Medición del torque de salida**

En el eje que conecta el motor a caracterizar con el motor de freno, se instaló un torquímetro marca Omega, referencia TQK5001. Este torquímetro permite medir hasta 5000 in\*lb y posee una precisión que permite obtener datos con 5 cifras significativas de exactitud.



Este torquímetro es del tipo de galgas extensiométricos, y por lo tanto el torque medido es representado mediante una señal de voltaje. Como este voltaje es tan pequeño, fue necesario amplificar la señal mediante un arreglo de amplificadores de instrumentación de precisión. Este montaje amplificaba la señal 2000 veces.

El torque medido no excedió nunca los 200 in\*lb, por lo tanto hubiera sido deseable usar un torquímetro de menor capacidad (10 o 12 veces menos) y que también está disponible en el laboratorio. De esta manera y para el mismo valor de FS la sensibilidad del sistema hubiera sido mayor, y por lo tanto tener datos mas confiables. Esto no se pudo hacer ya que el torquímetro mencionado estaba siendo usado en otro proyecto de grado.

### 5.1.5 Medición de la velocidad de giro

Se conectó un pequeño generador eléctrico DC que gira solidario al eje del motor a caracterizar. El valor del voltaje generado es proporcional a la velocidad de giro del motor.

La curva de calibración que relaciona voltaje Vs RPM se obtuvo mediante el uso de un estroboscopio. Esta se presenta a continuación:

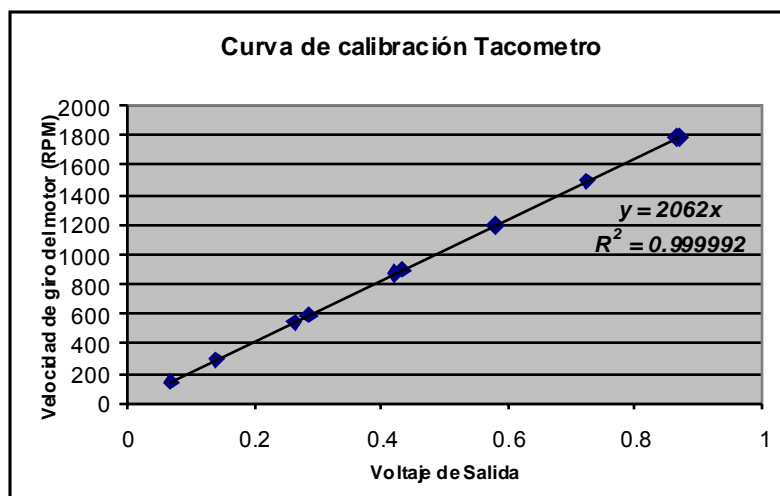


Gráfico 21. curva de calibración del tacómetro.

### 5.1.6 Medición de los parámetros eléctricos del conjunto

Es difícil encontrar un instrumento que cumpla y que mida todas las variables eléctricas deseadas al tiempo, estas variables son 3: Voltaje, Corriente, y factor de potencia del conjunto.

Para este fin entonces se usó un analizador de armónicos marca fluke modelo 41B, este aparato nos arroja información acerca de la potencia real y la potencia compleja del sistema. Voltios, Amperios, Watios, Voltio Amperios, factor de potencia.

### 5.1.7 Integración de la instrumentación

Como en condiciones de rotor bloqueado y de alto deslizamiento la corriente que pasa por los bornes del motor a caracterizar y del motor de freno es muy alta, y con el fin de evitar un daño en el motor y en el auto transformador debido a la generación de calor excesivo, fue entonces necesario diseñar un sistema que tomara los datos relevantes del conjunto de manera rápida y automática

Para lograr adquirir información de torque a lo largo del tiempo se conectó la señal de salida del torquímetro con un sistema de adquisición de datos basados en una tarjeta de adquisición de datos Ni DAQ6023.

Esta tarjeta se controló mediante la versión 6.1 de programa para adquisición de datos de National Instruments llamado Labview .

Para la toma de los datos de velocidad se giro del motor se uso de nuevo la tarjeta de adquisición pero entrando la señal por otro de los 12 canales de entrada análoga que posee.

Guardar los datos del analizador de armónicos es distinto, ya que no existe la posibilidad de manejar el instrumento desde la plataforma de instrumentación LabView .

Por lo tanto se usó para la toma de datos un programa distribuido por Fluke que especialmente diseñado para ello. FlukeView 41.

Usar dos programas de adquisición de datos al tiempo presenta varios retos:

Primero que todo el sistema de adquisición de datos de National Instruments se apodera de muchos de los recursos físicos del Computador lo cual impide realizar otras actividades a tiempo, por ejemplo utilizar el FlukeView a la velocidad de adquisición deseada.

Para solucionar este problema fue necesario el uso de dos computadores simultáneamente y de esta manera poder realizar la adquisición de los datos.

El segundo problema y el más complicado es tratar de aparear los datos obtenidos desde LabView con los datos obtenidos desde FlukeView . Como los formatos con los que guarda los archivos son diferentes, entonces el proceso de apareamiento es muy tedioso. Mas aún si se tiene en cuenta que son mas de 1800 datos individuales los que se tomaron.

Como solución parcial al problema se implementaron 12 algoritmos de reconocimiento, organización y apareamiento en VisualBasic desde Excel. Esto facilitó un poco el trabajo que igual no dejaba de ser un proceso largo y complicado en algunas etapas.

Se presenta seguidamente el programa de adquisición realizado en Labview .

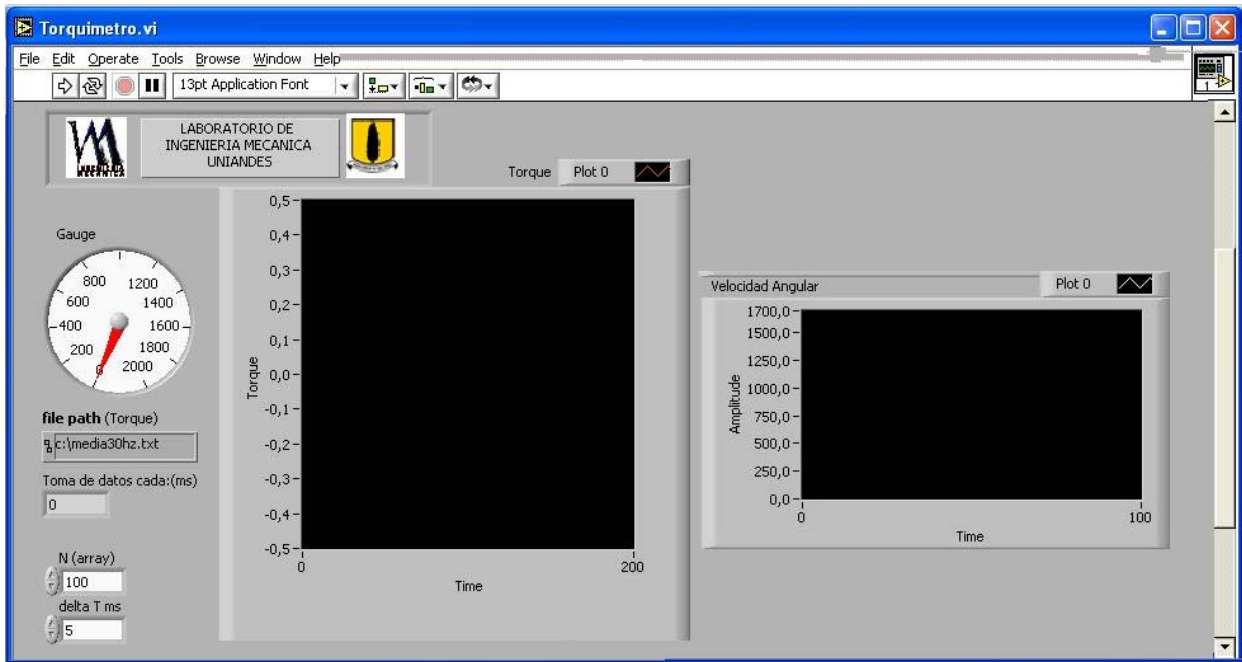


Gráfico 22. Panel frontal del instrumento virtual.

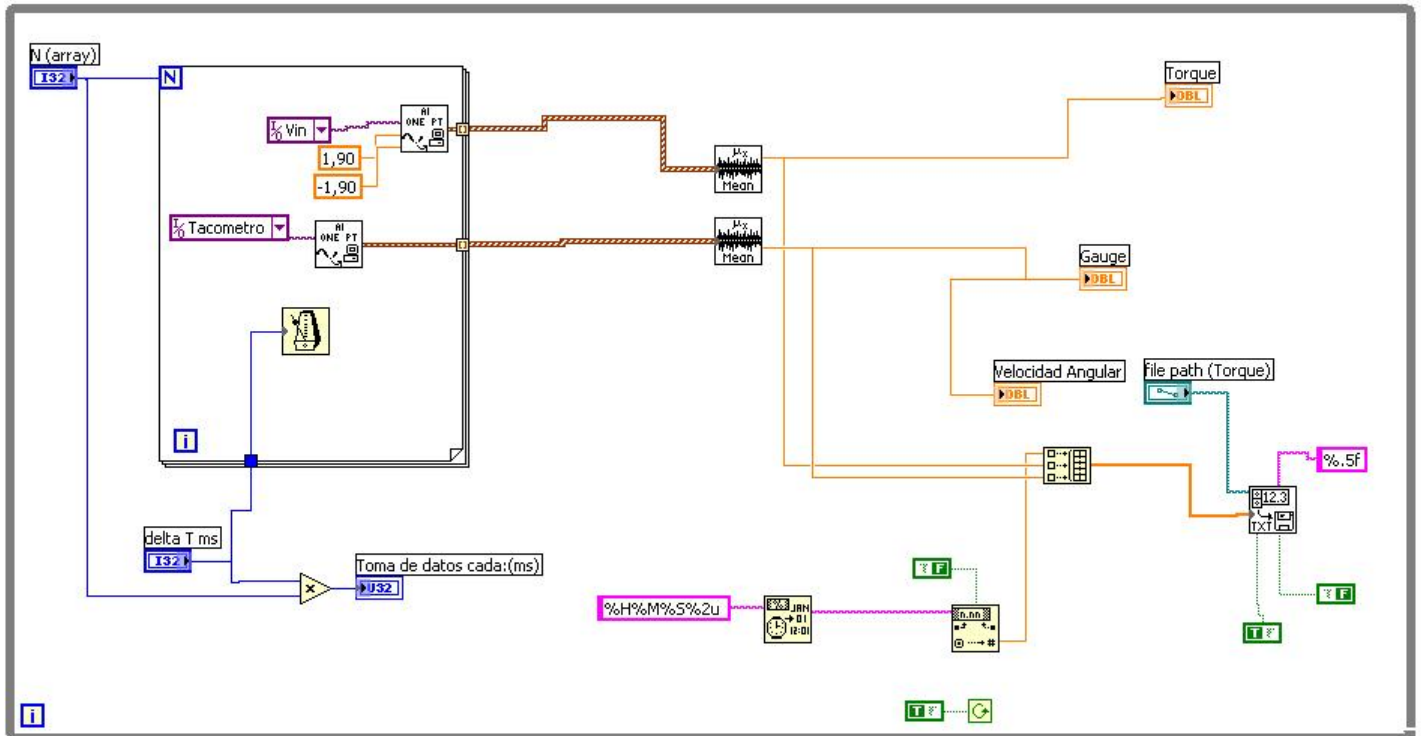


Gráfico 23. Panel trasero del instrumento virtual.

### 5.1.8 Montaje final

Ahora se presenta un esquema representativo del montaje final que se montó:

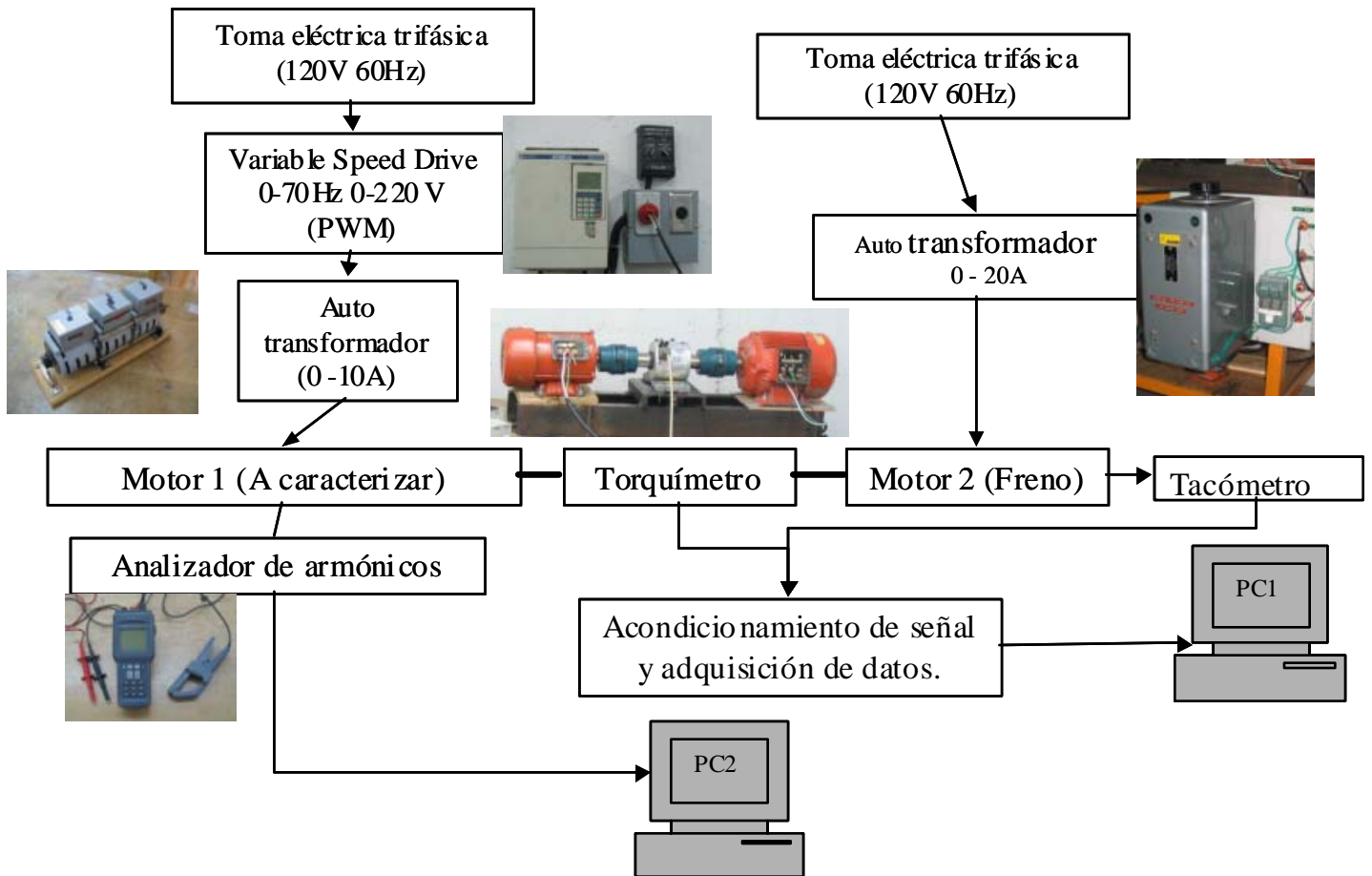


Gráfico 24. Esquema del banco de pruebas montado.

El montaje físicamente se ve de la siguiente manera:



Gráfico 25. Banco de pruebas montado.

## 5.2 RESULTADOS OBTENIDOS

Las gráficas que se presentan a continuación son resultado de las pruebas realizadas sobre un motor de inducción tal y como se explicó en los apartados anteriores. Se presentan estas gráficas de manera adimensional con el fin de hacer más fácil la interpretación de su contenido.

La adimensionalización se logra simplemente dividiendo los resultados obtenidos de torque, corriente, y voltaje entre los valores nominales suministrados por el fabricante para el motor en el catalogo. Esto se conoce también en los libros de maquinaria eléctrica como la adimensionalización por unidad (p.u.)

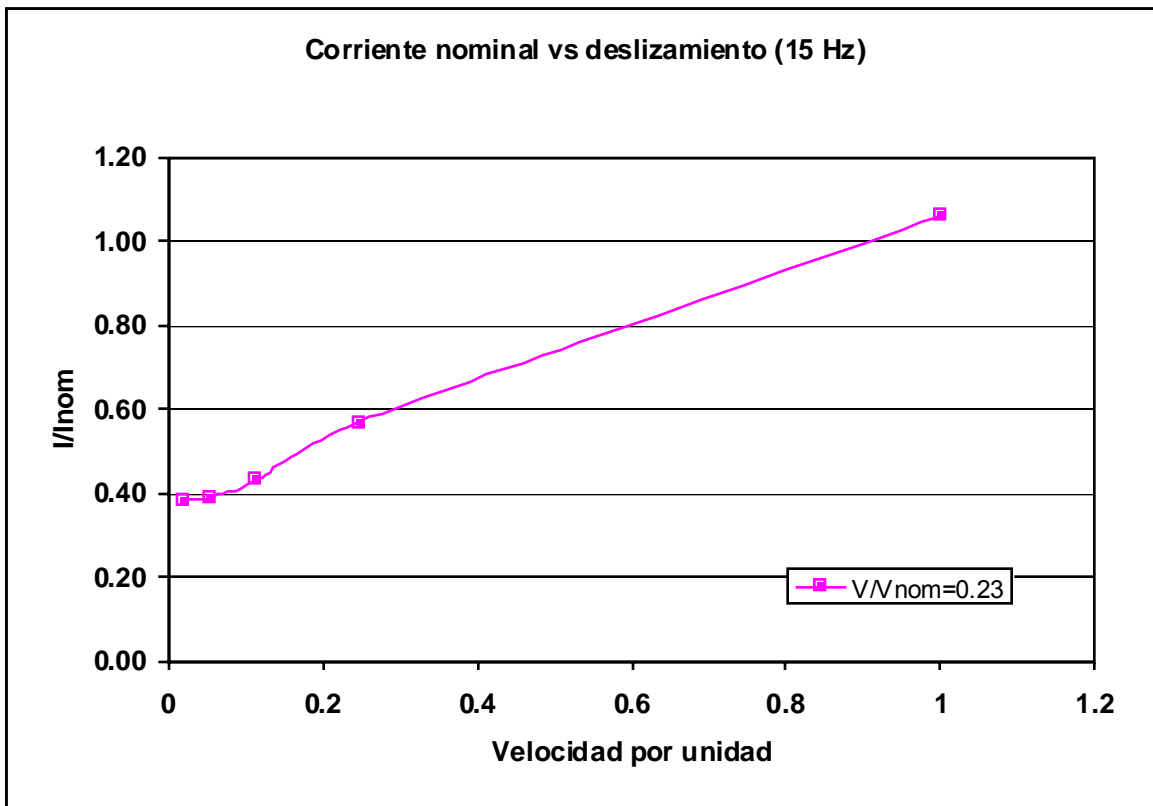
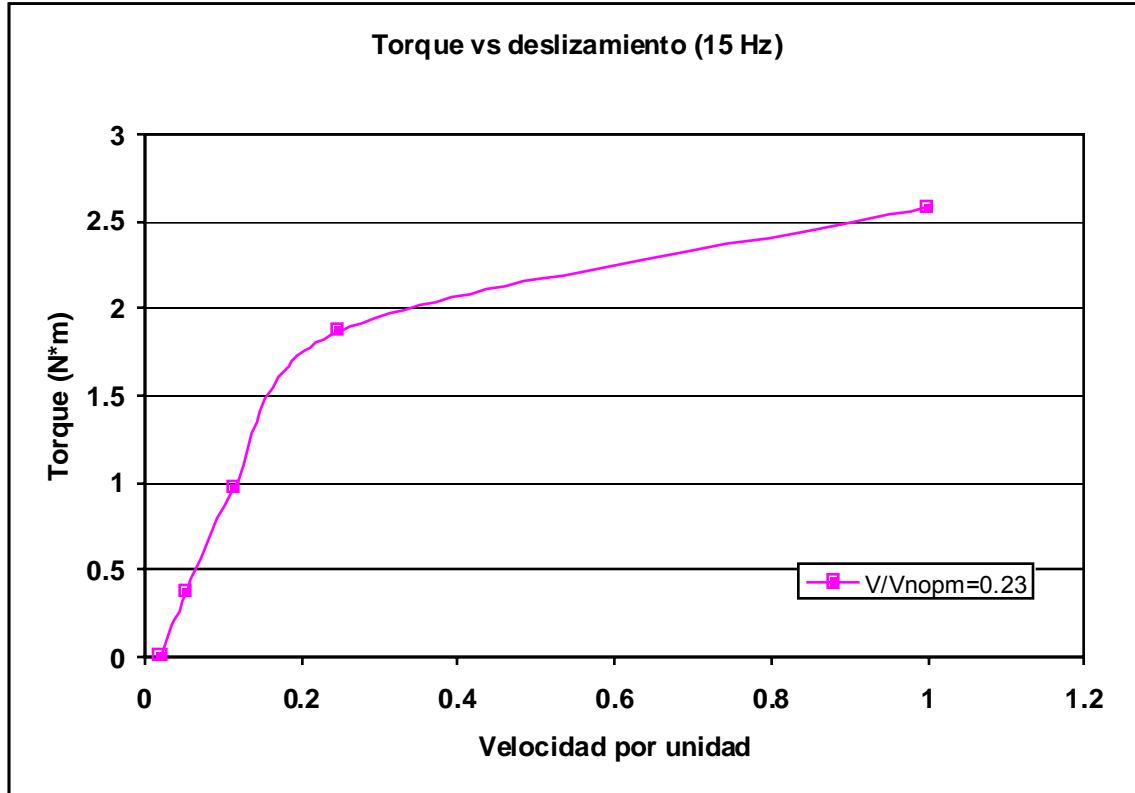
Se intentaron hallar números adimensionales que organizaran de mejor manera los resultados obtenidos sin encontrar un número que fuera interesante para presentar.

La velocidad por unidad se calculó como  $1 - w/w_{\text{sinc}}$

Los datos del motor probado son los siguientes:

- Conexión Delta
- $V_{\text{nom}}=220\text{V}$
- $I_{\text{nom}}=3.6\text{A}$
- $F_{\text{nom}}=60\text{Hz}$
- Velocidad nominal de giro: 1720 RPM
- Potencia nominal=1.0 Hp

## 5.2.1 Pruebas a 15HZ



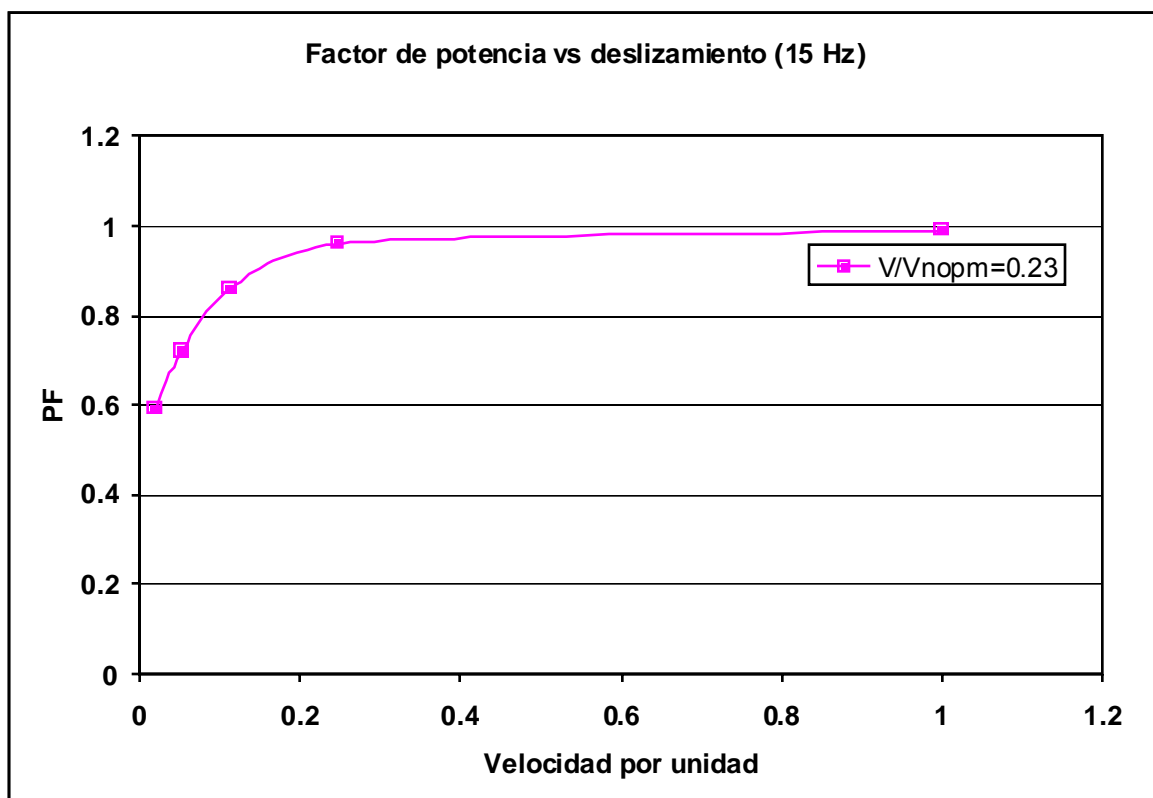
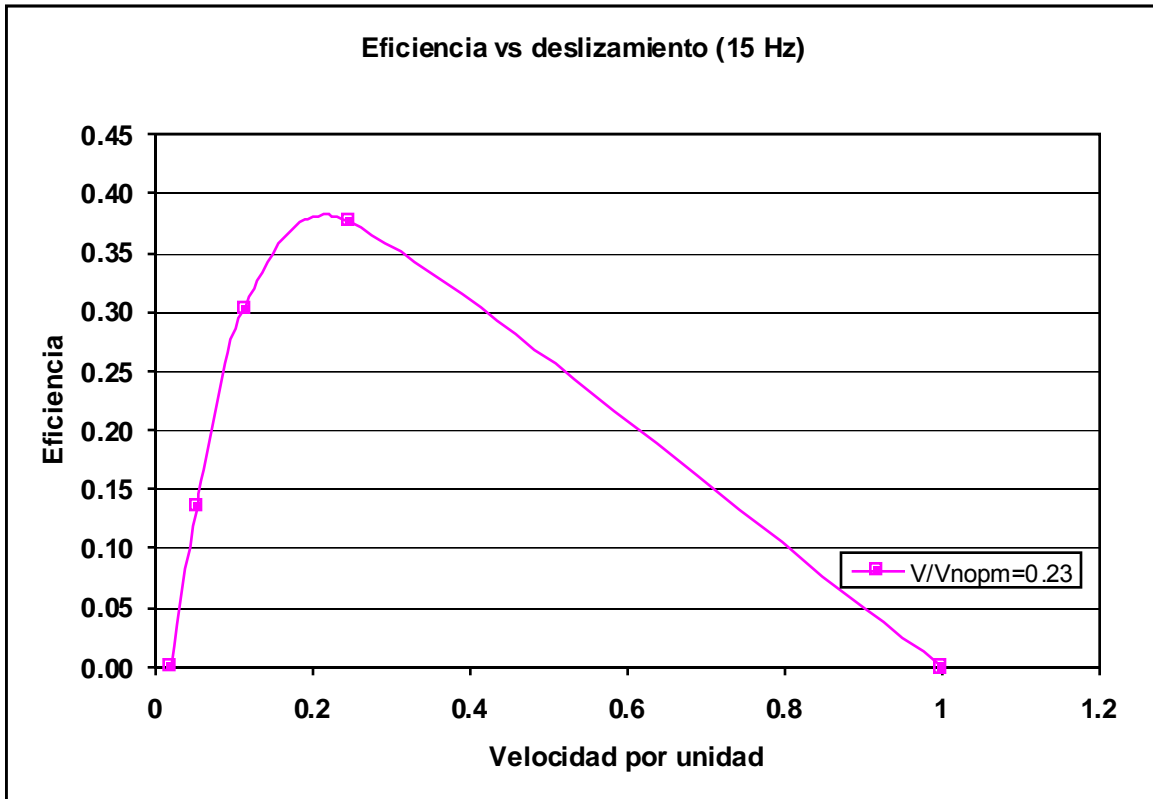
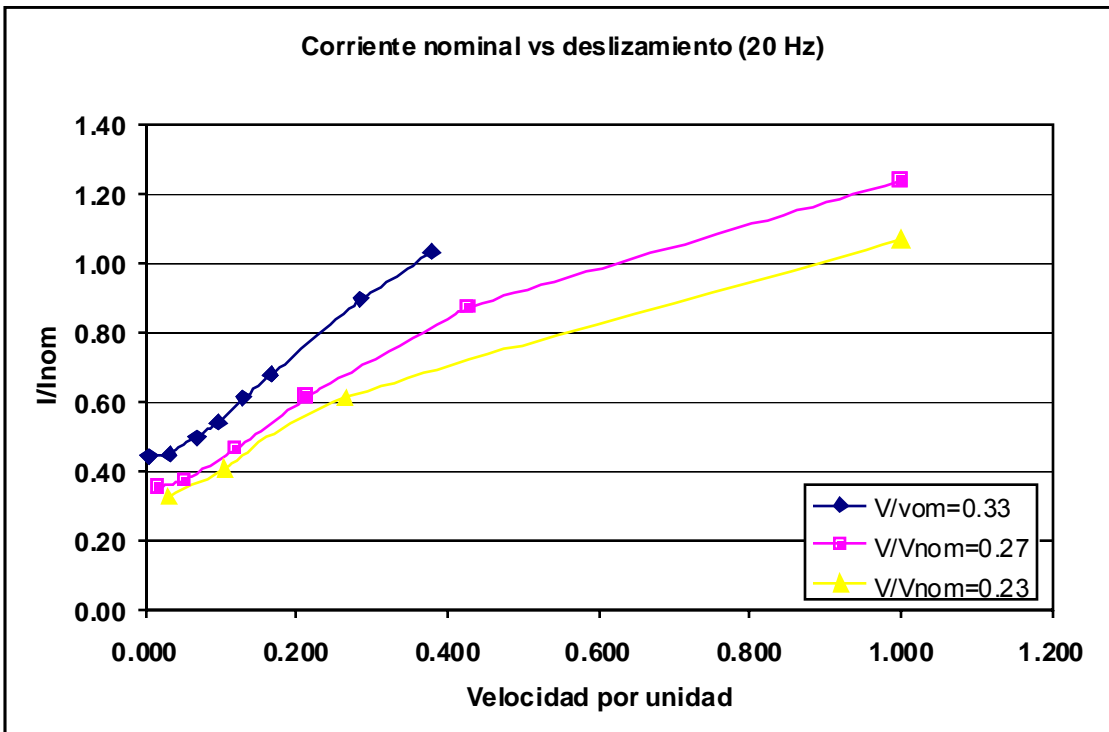
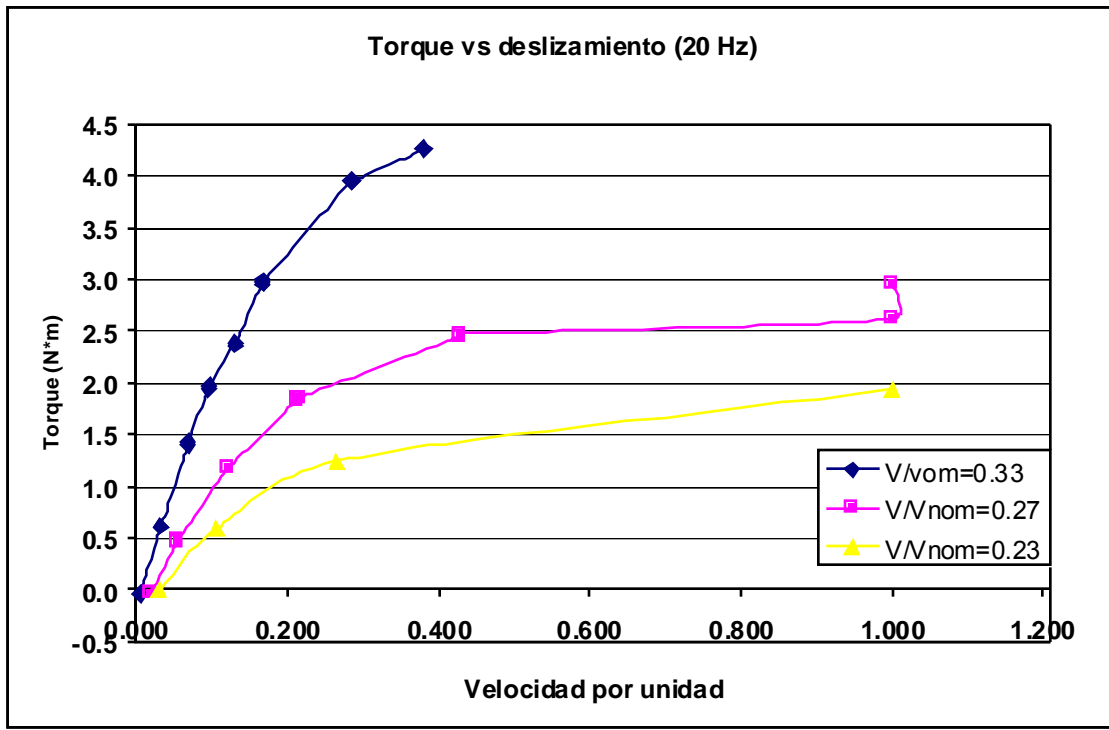


Gráfico 26. Conjunto de gráficas para la respuesta de un motor de inducción alimentado a una frecuencia de 15 Hz con voltaje y carga variables.

5.2.2 Pruebas a 20HZ





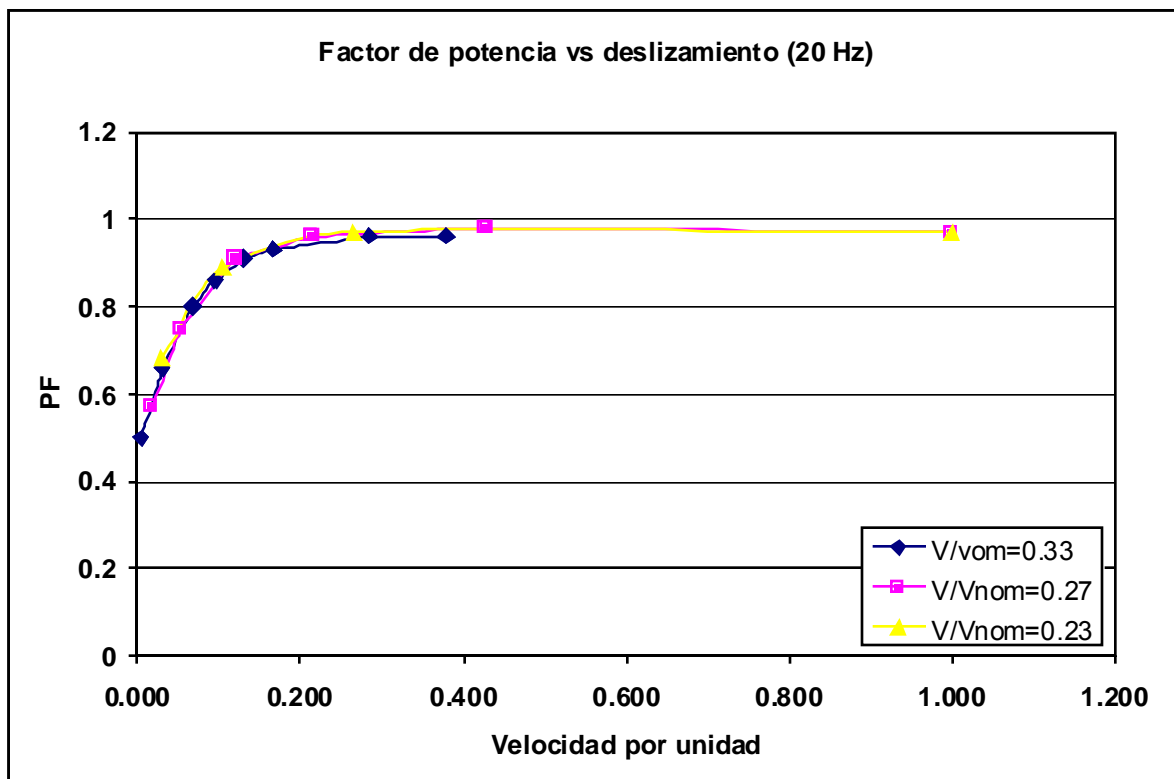
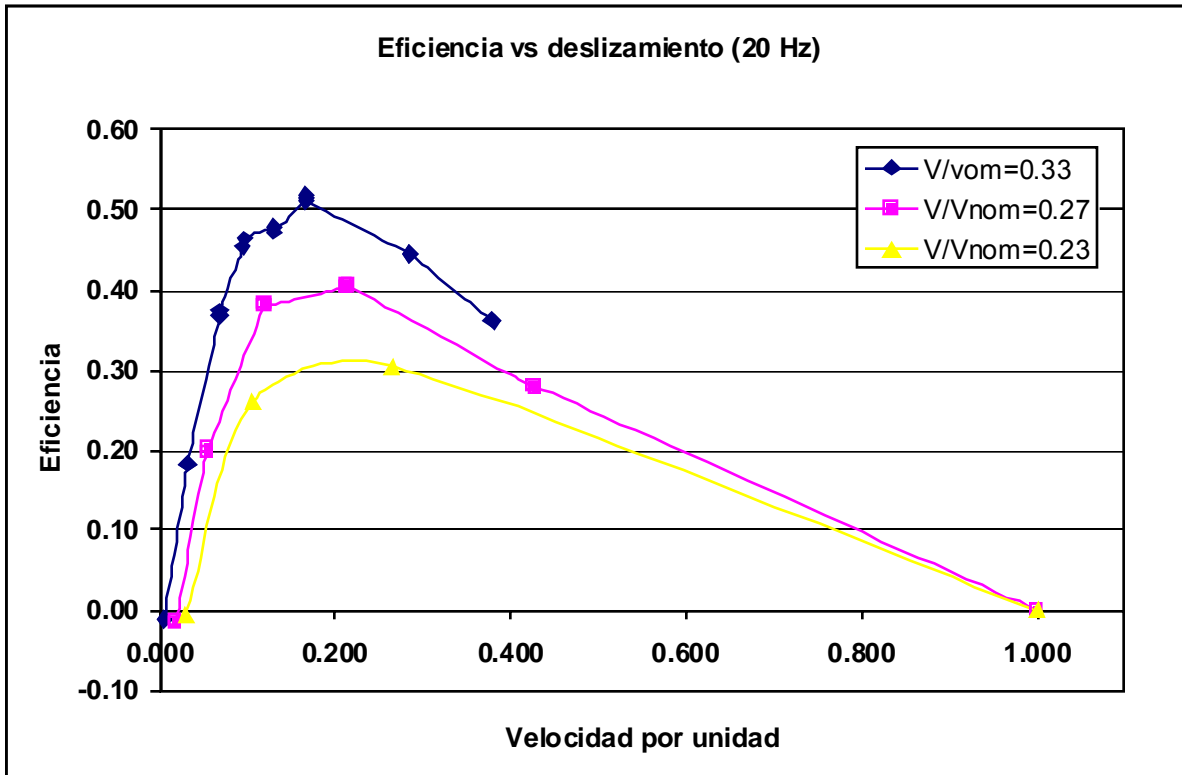
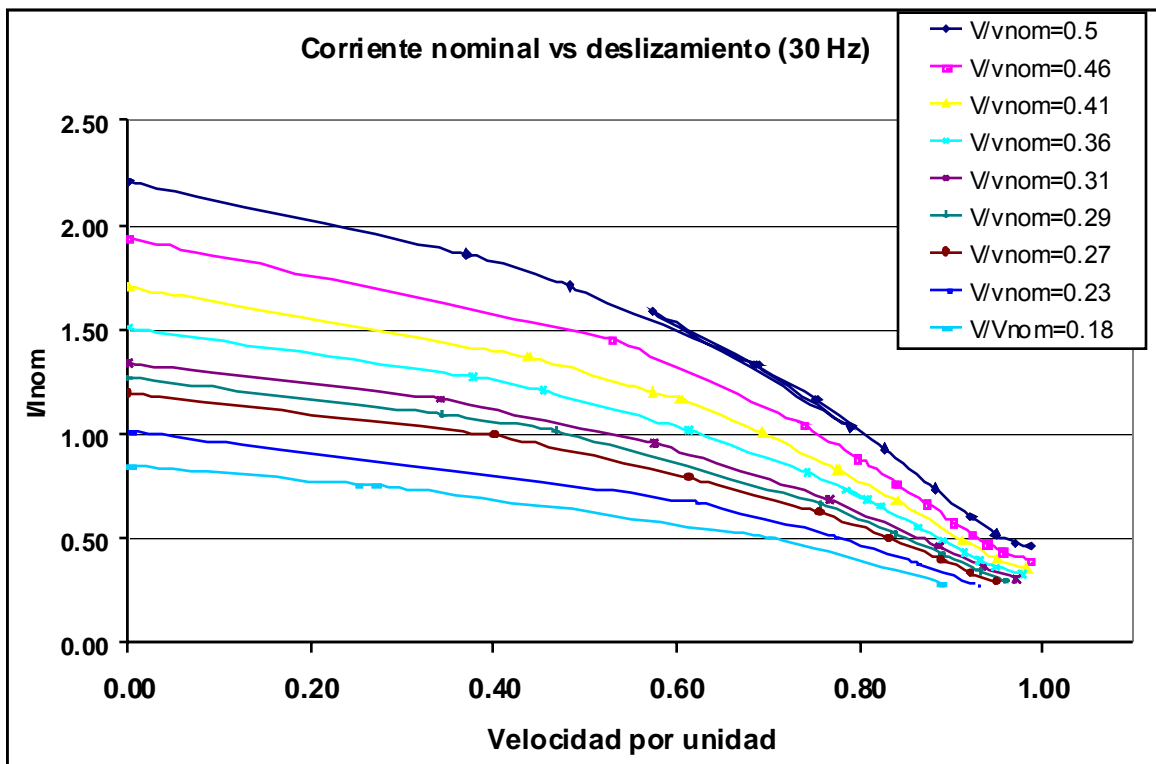
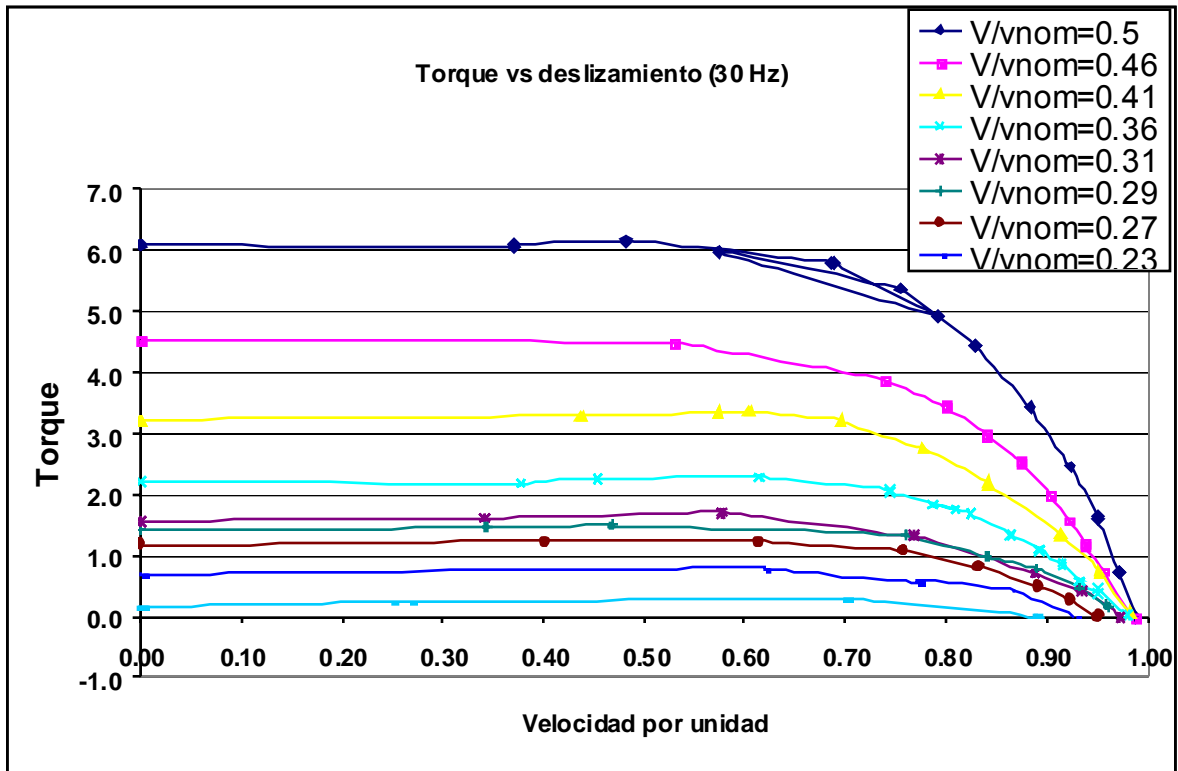


Gráfico 27. Conjunto de gráficas para la respuesta de un motor de inducción alimentado a una frecuencia de 20 Hz con voltaje y carga variables.

5.2.3 Pruebas a 30HZ



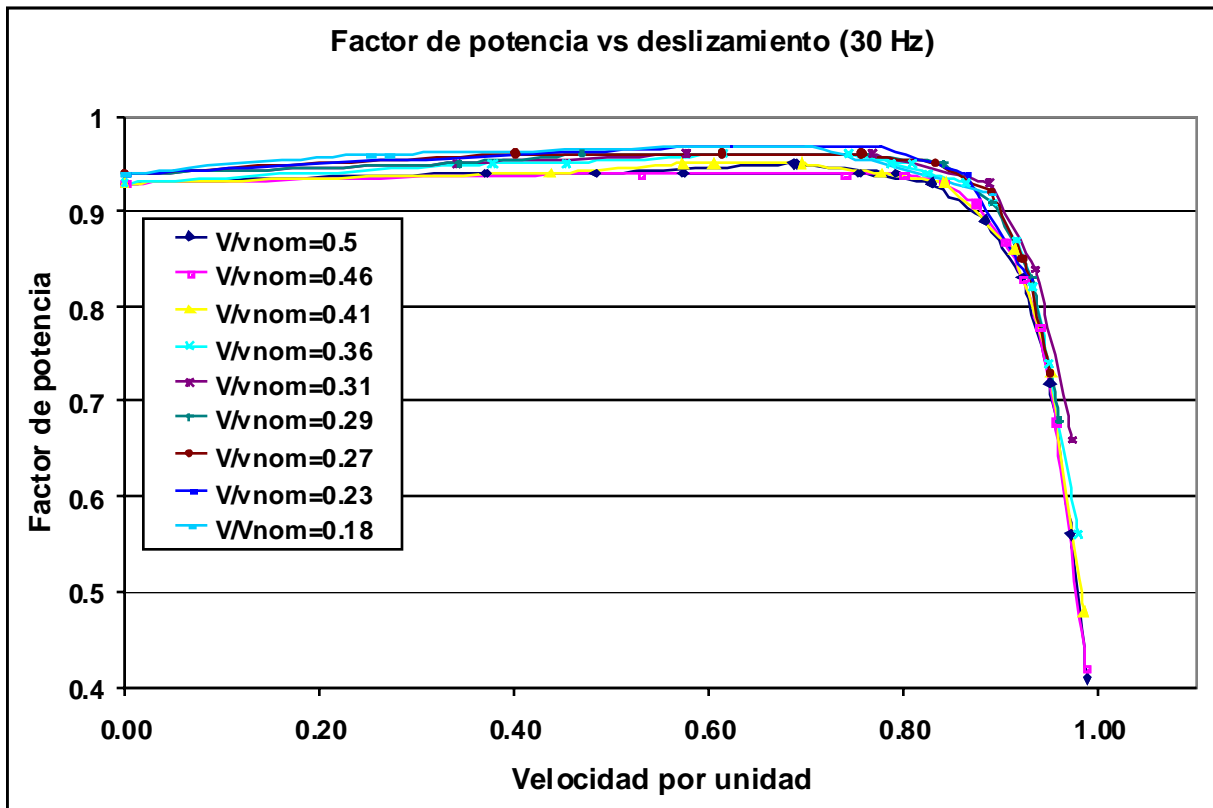
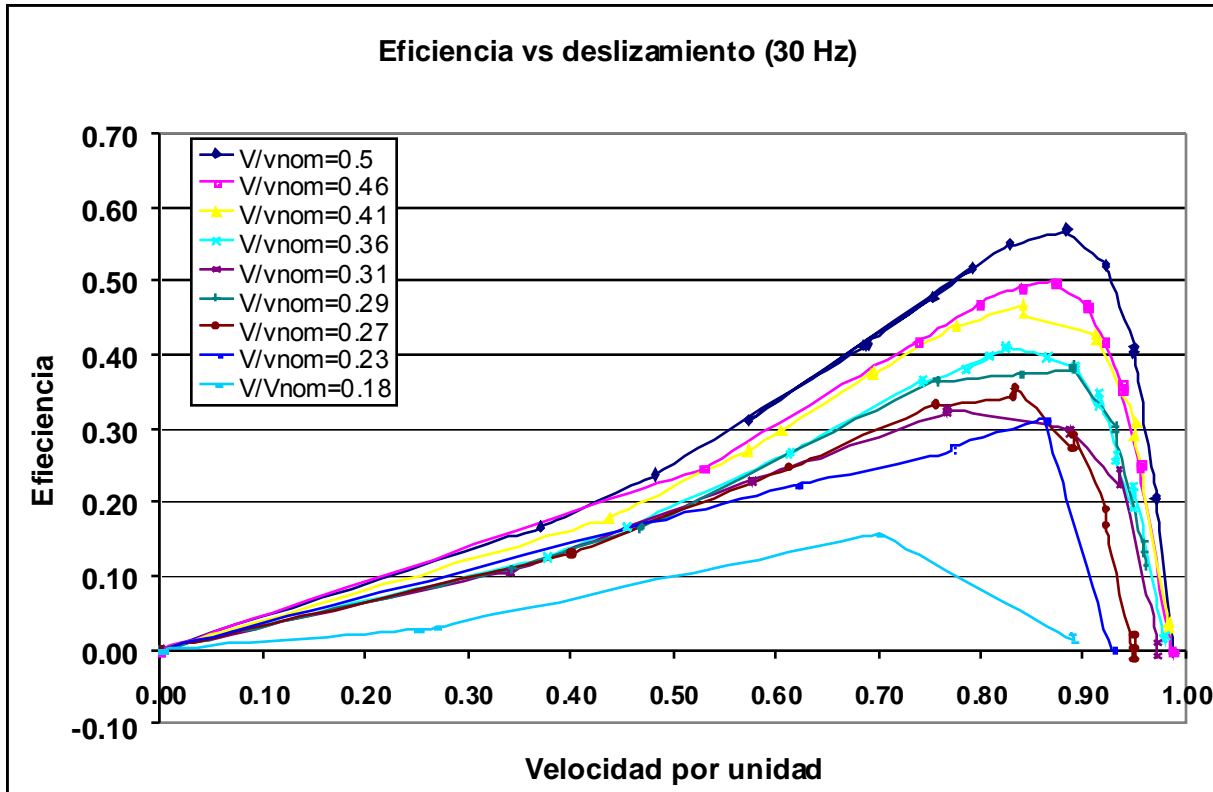


Gráfico 28. Conjunto de gráficas para la respuesta de un motor de inducción alimentado a una frecuencia de 30 Hz con voltaje y carga variables.



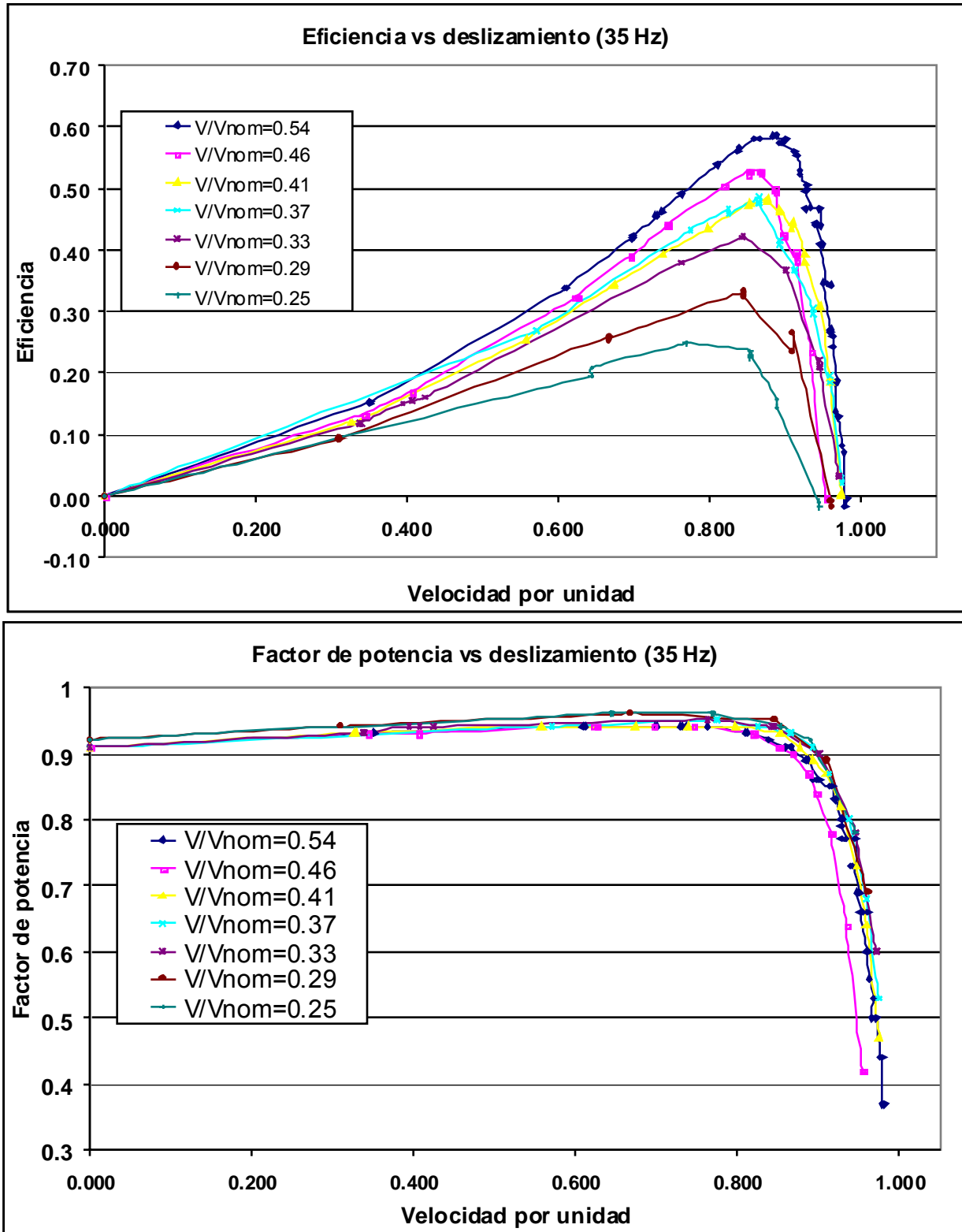
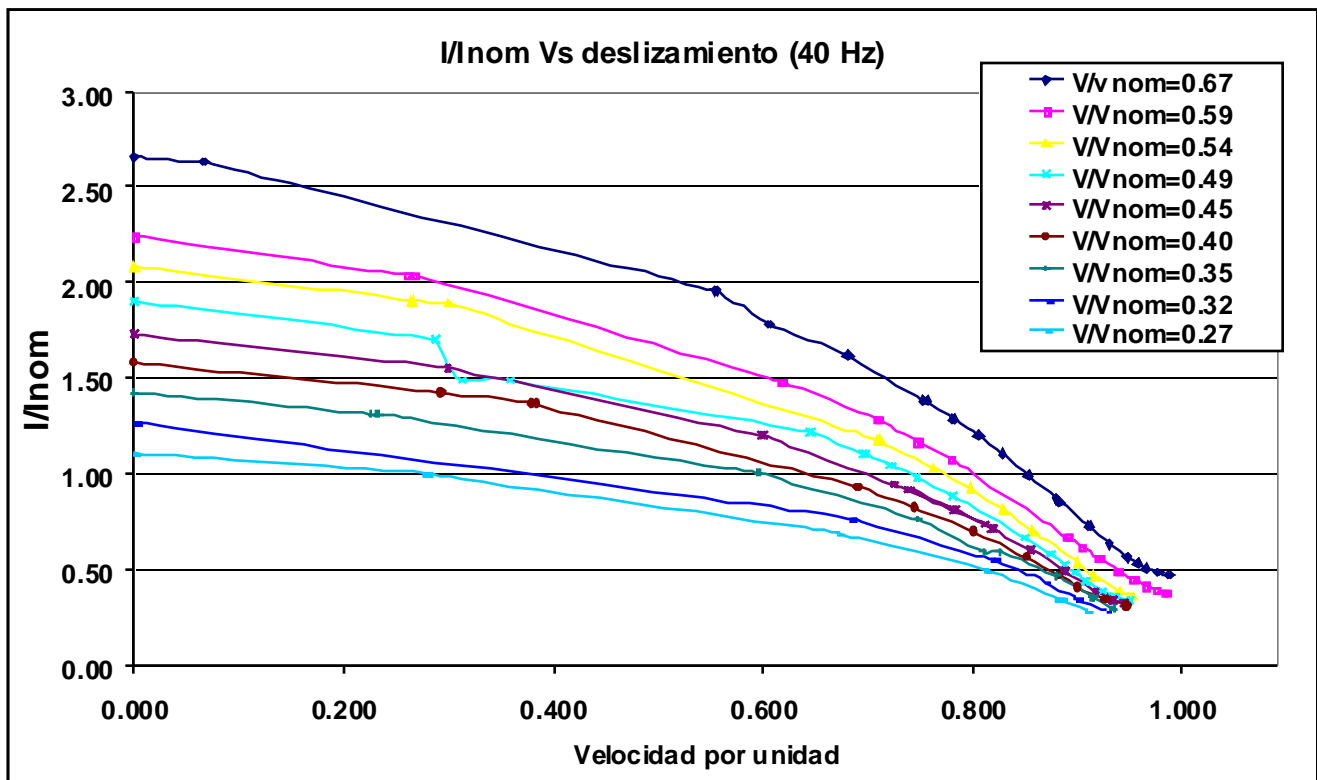
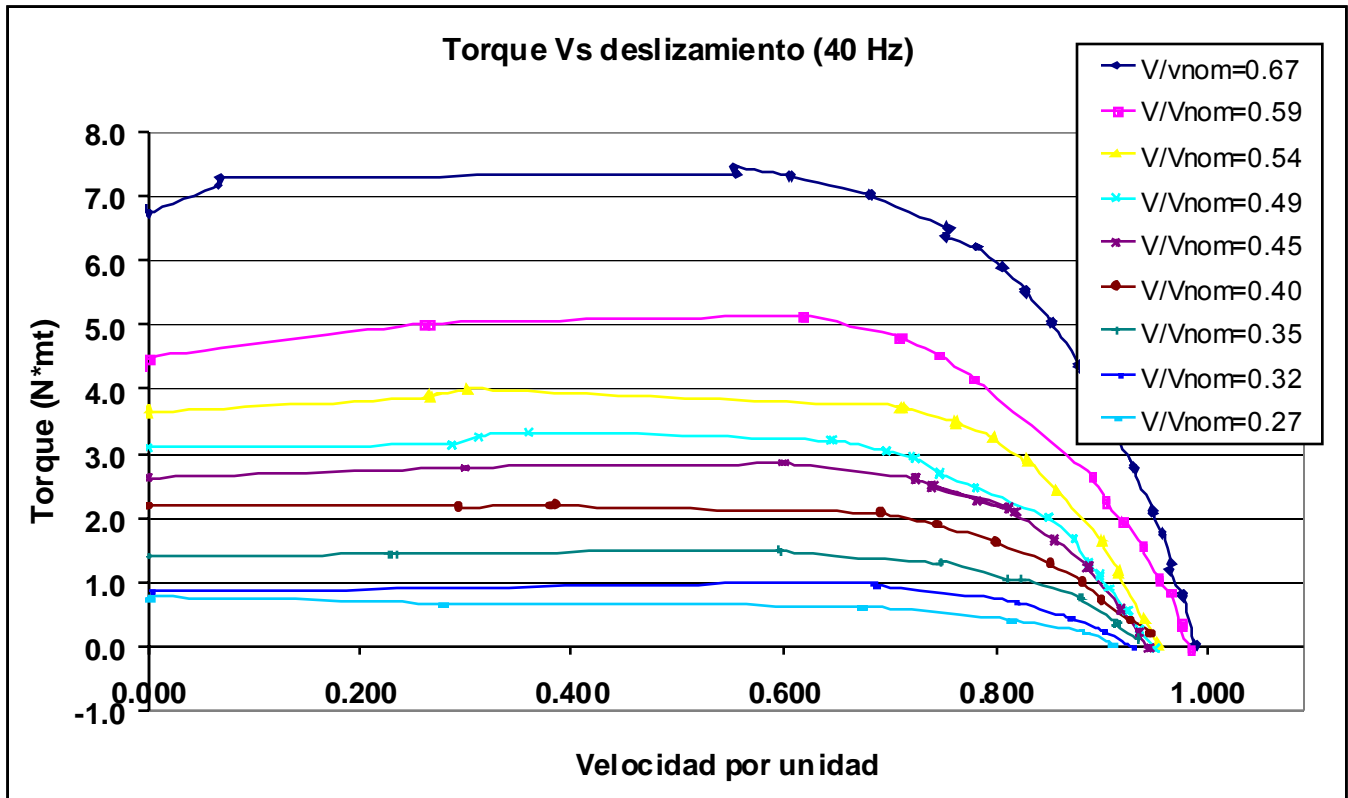


Gráfico 29. Conjunto de gráficas para la respuesta de un motor de inducción alimentado a una frecuencia de 35 Hz con voltaje y carga variables.

5.2.5 Pruebas a 40HZ



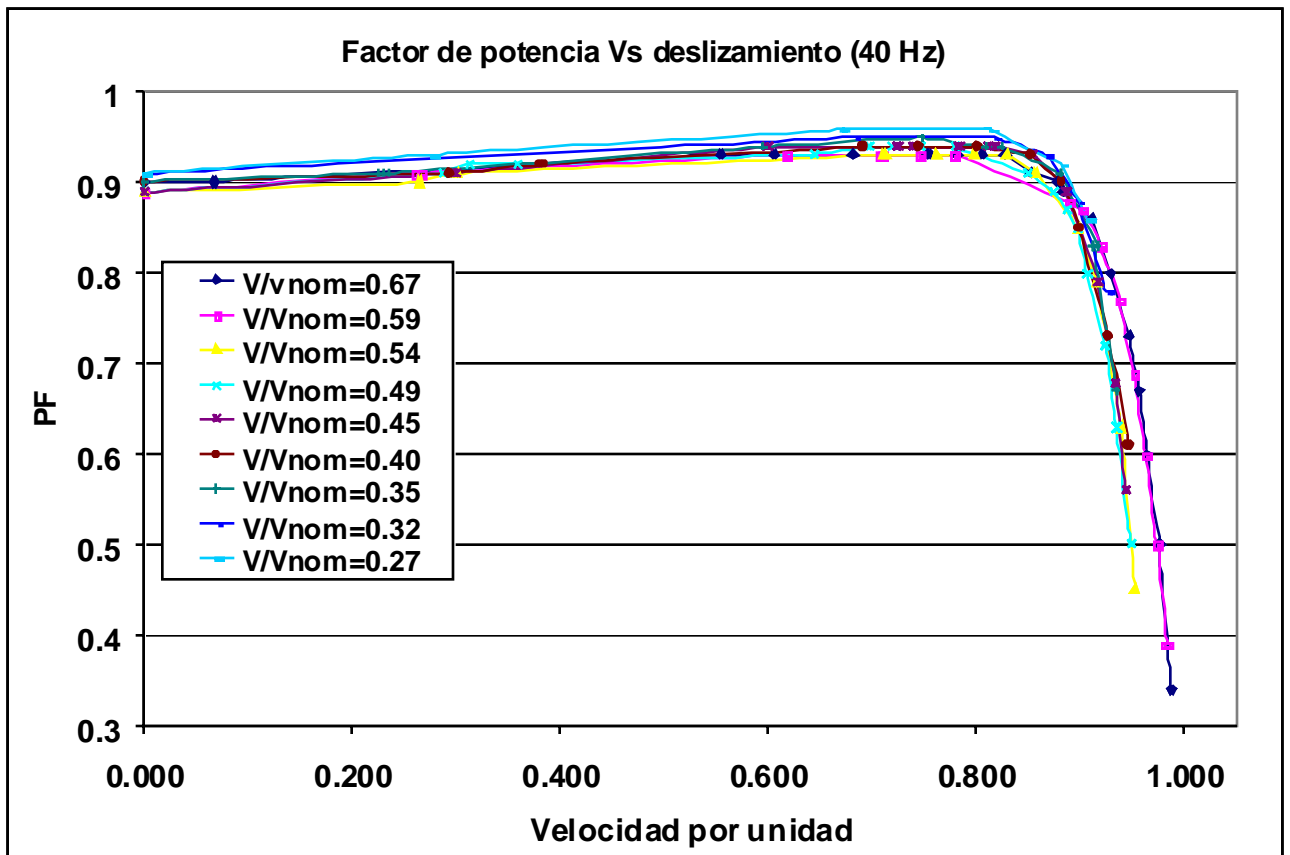
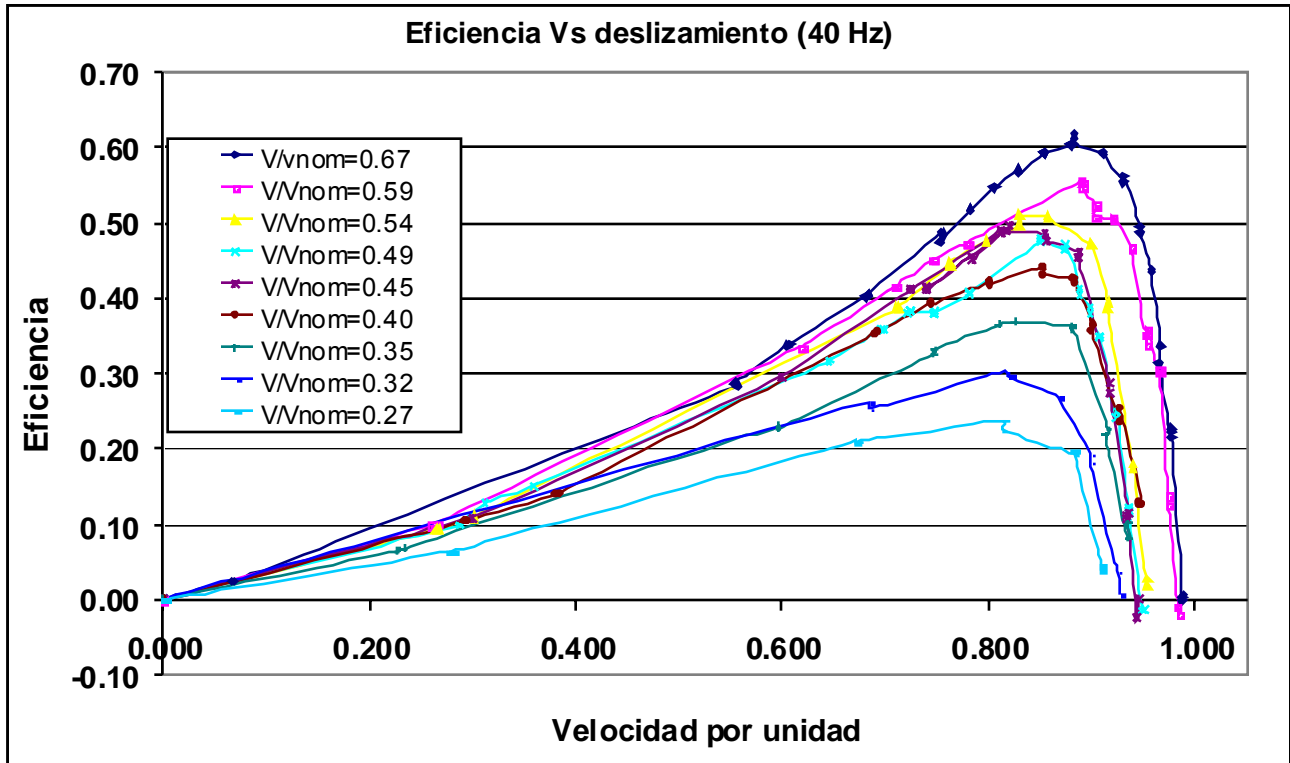
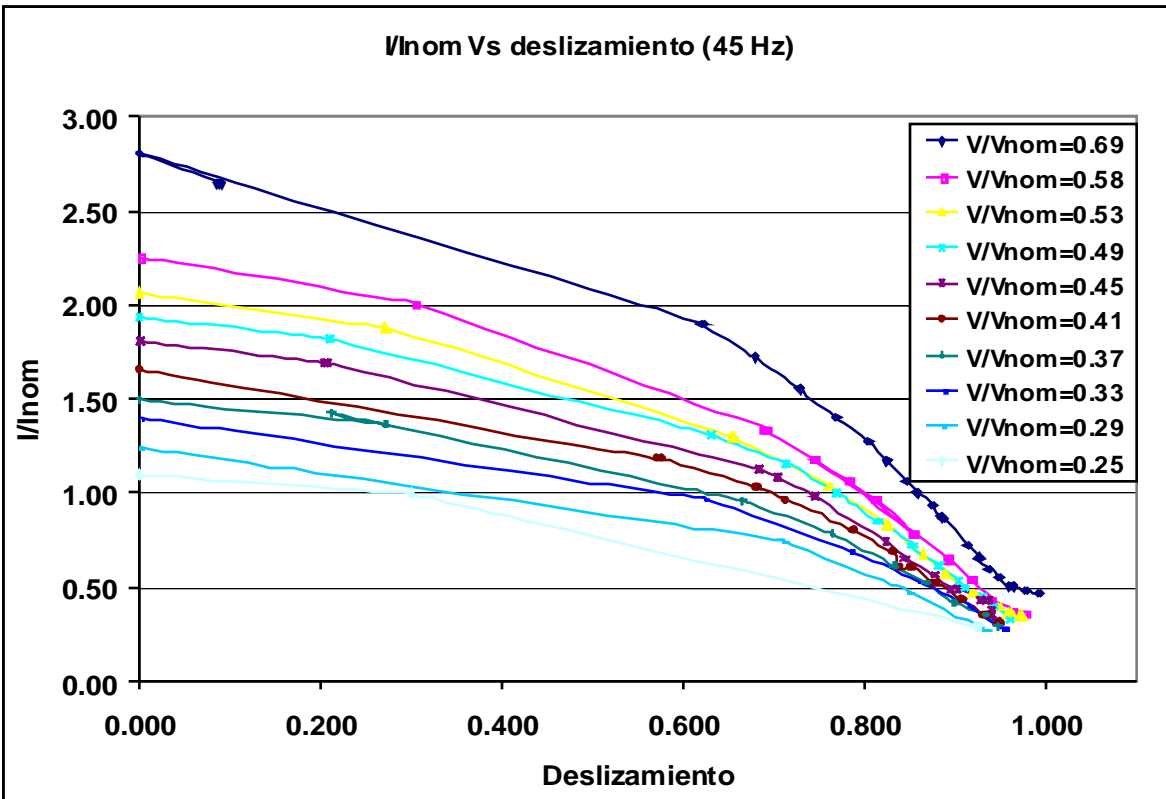
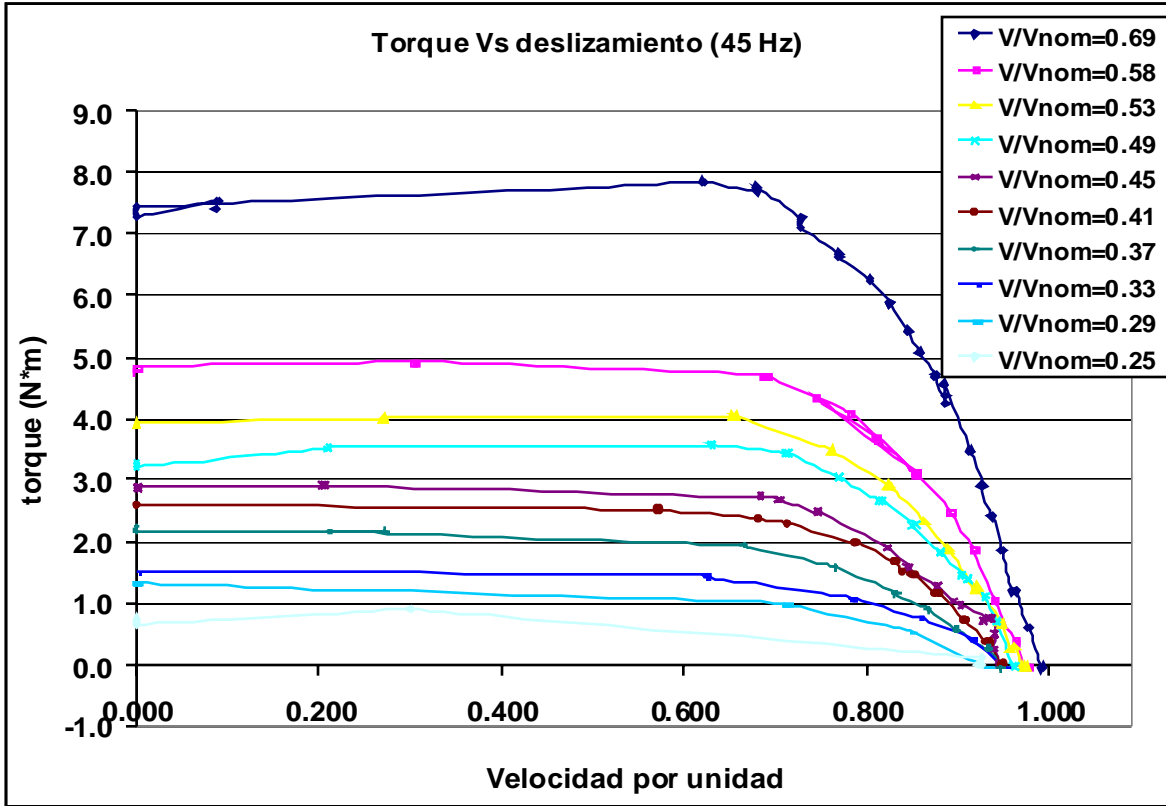


Gráfico 30. Conjunto de gráficas para la respuesta de un motor de inducción alimentado a una frecuencia de 40 Hz con voltaje y carga variables.

5.2.6 Pruebas a 45HZ





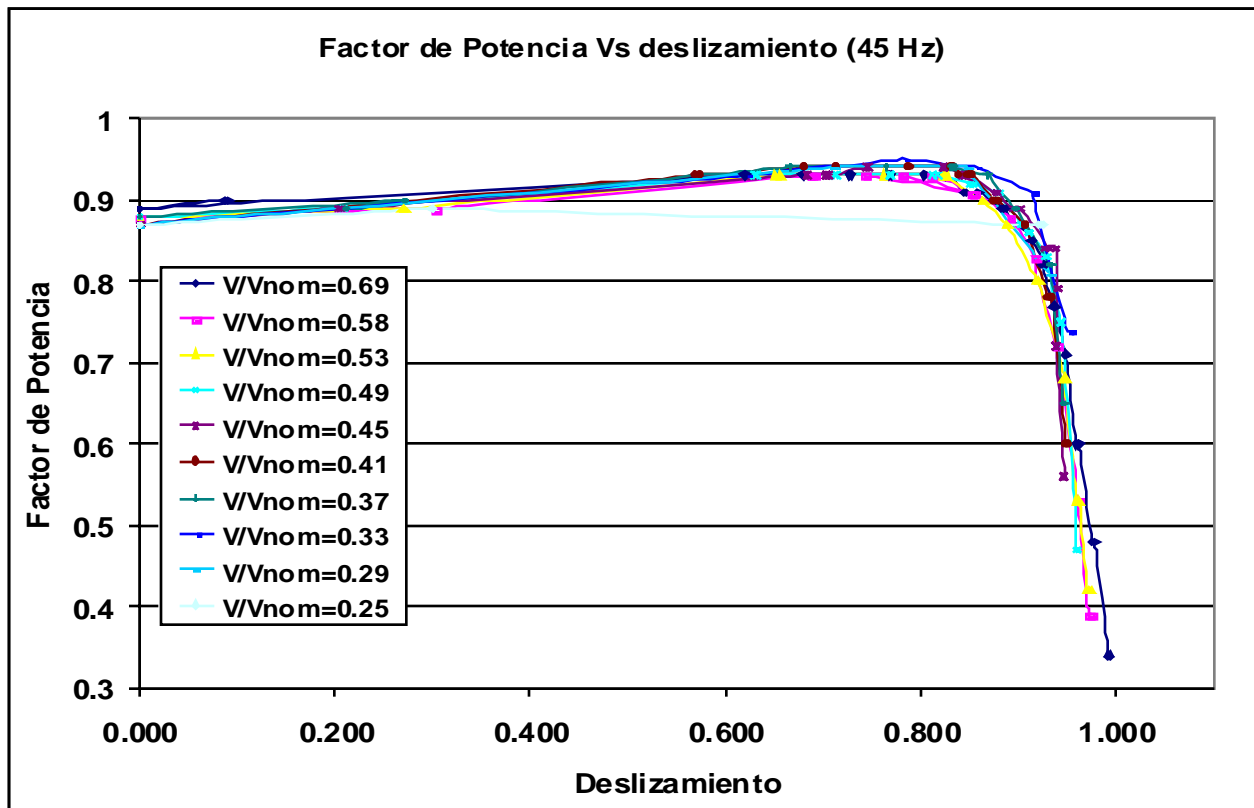
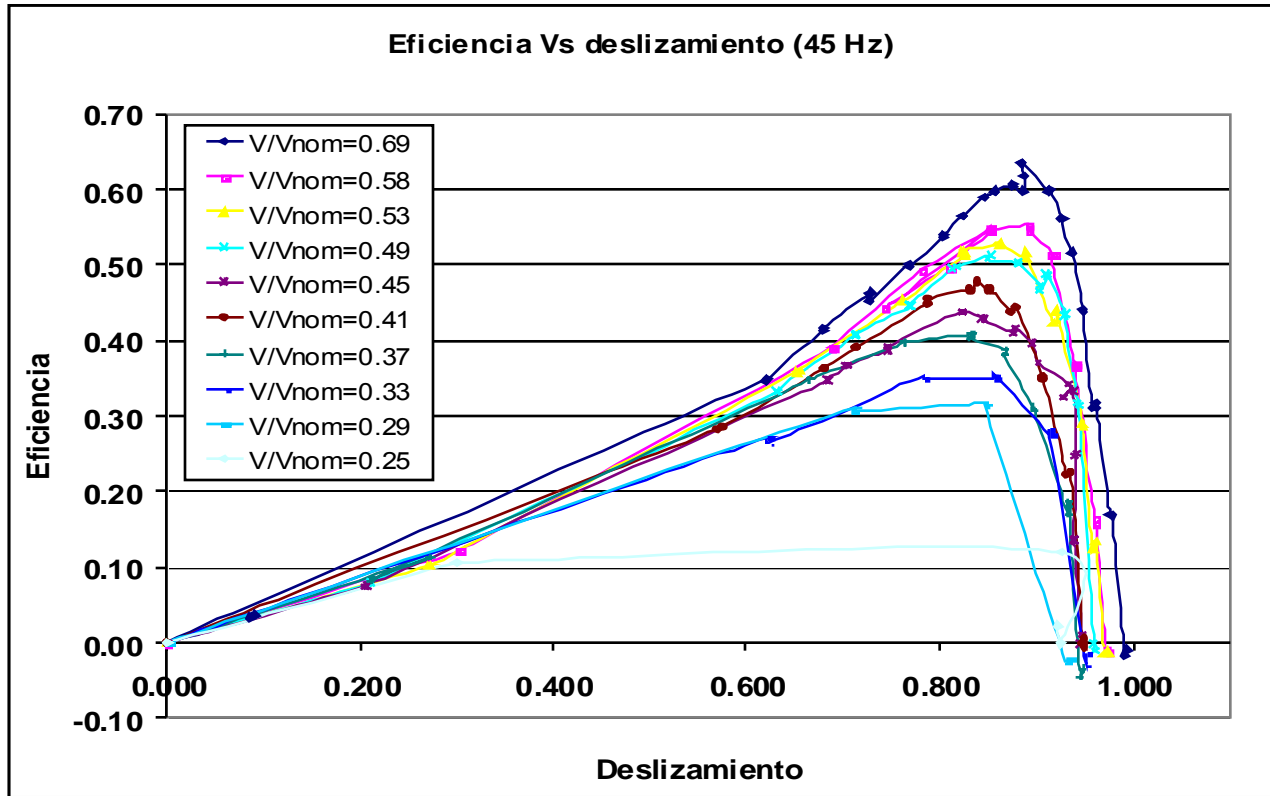
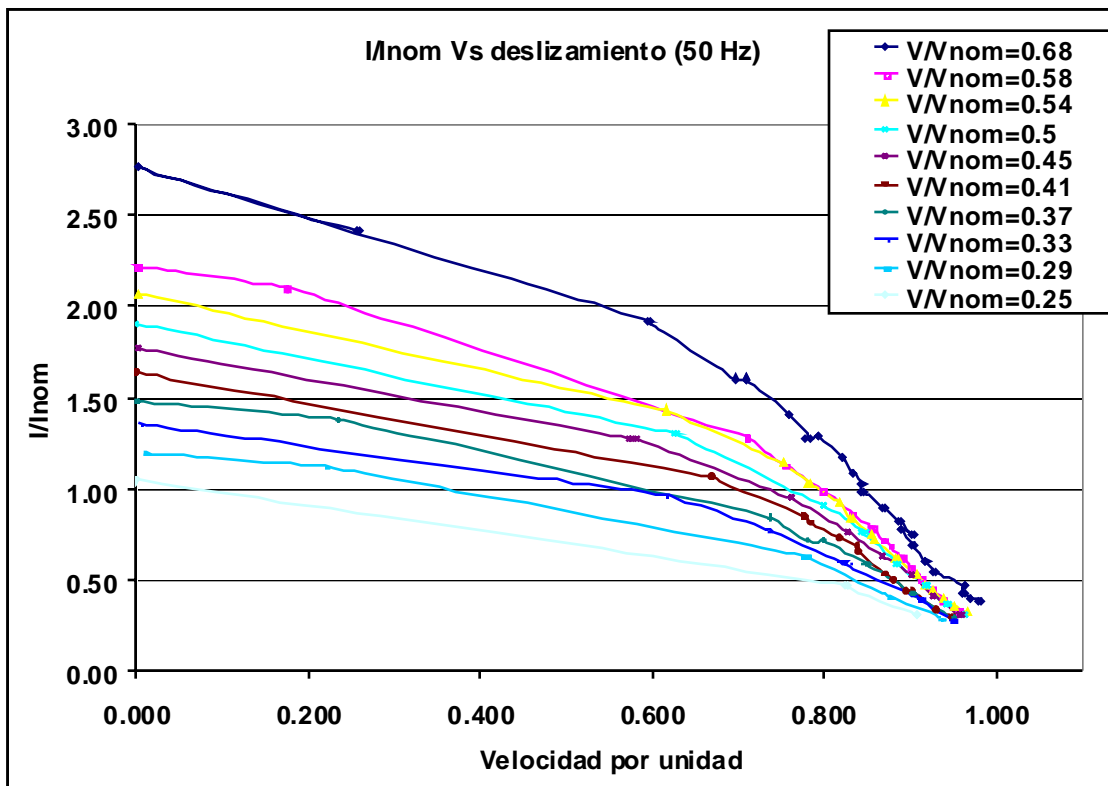
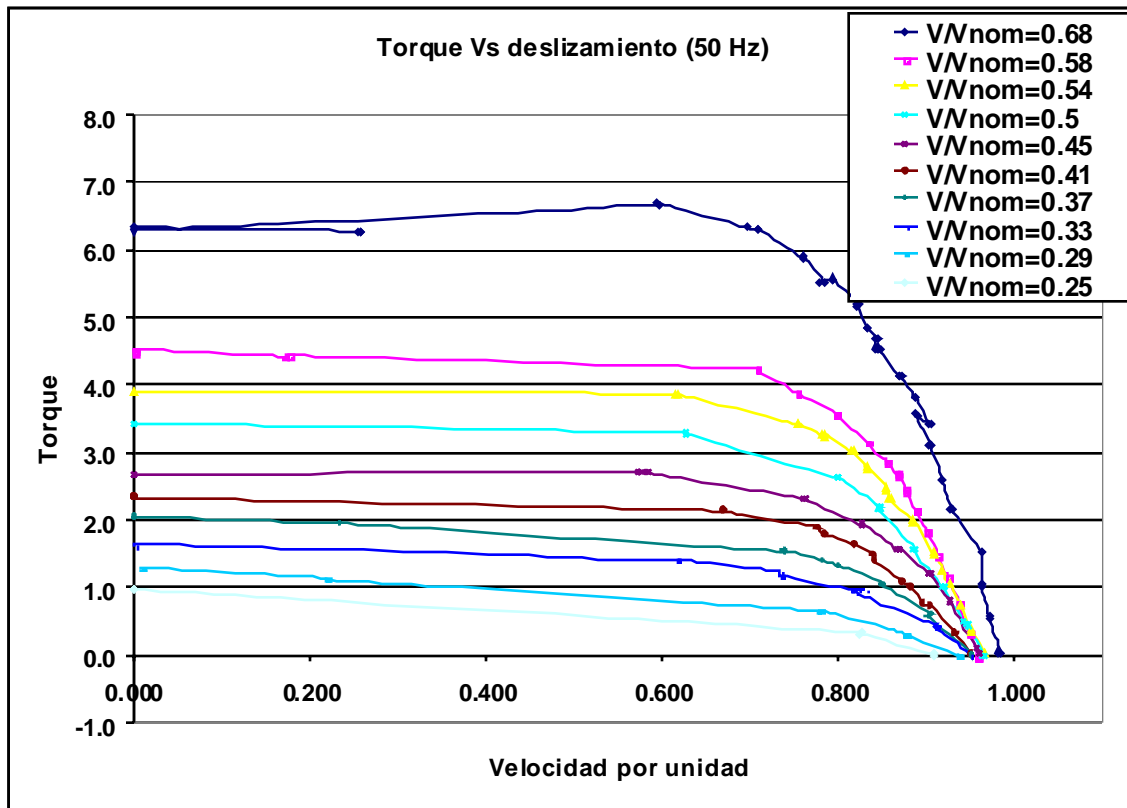


Gráfico 31. Conjunto de gráficas para la respuesta de un motor de inducción alimentado a una frecuencia de 45 Hz con voltaje y carga variables.

5.2.7 Pruebas a 50HZ



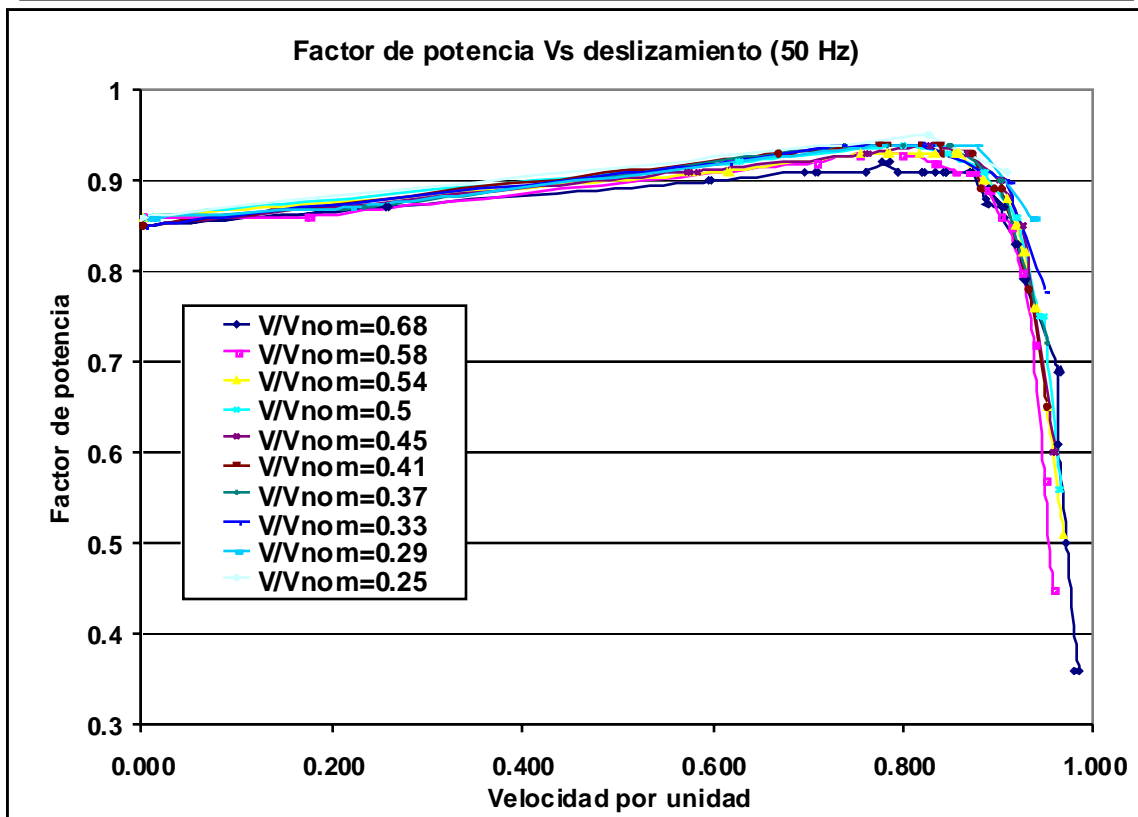
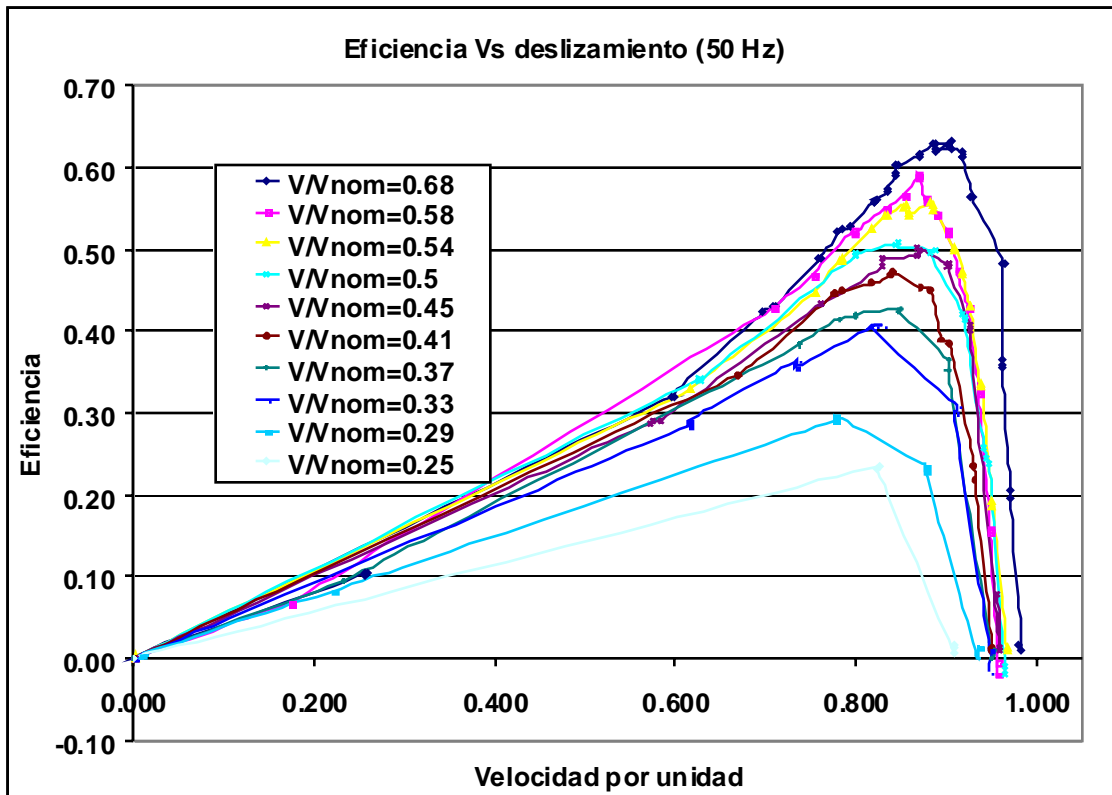
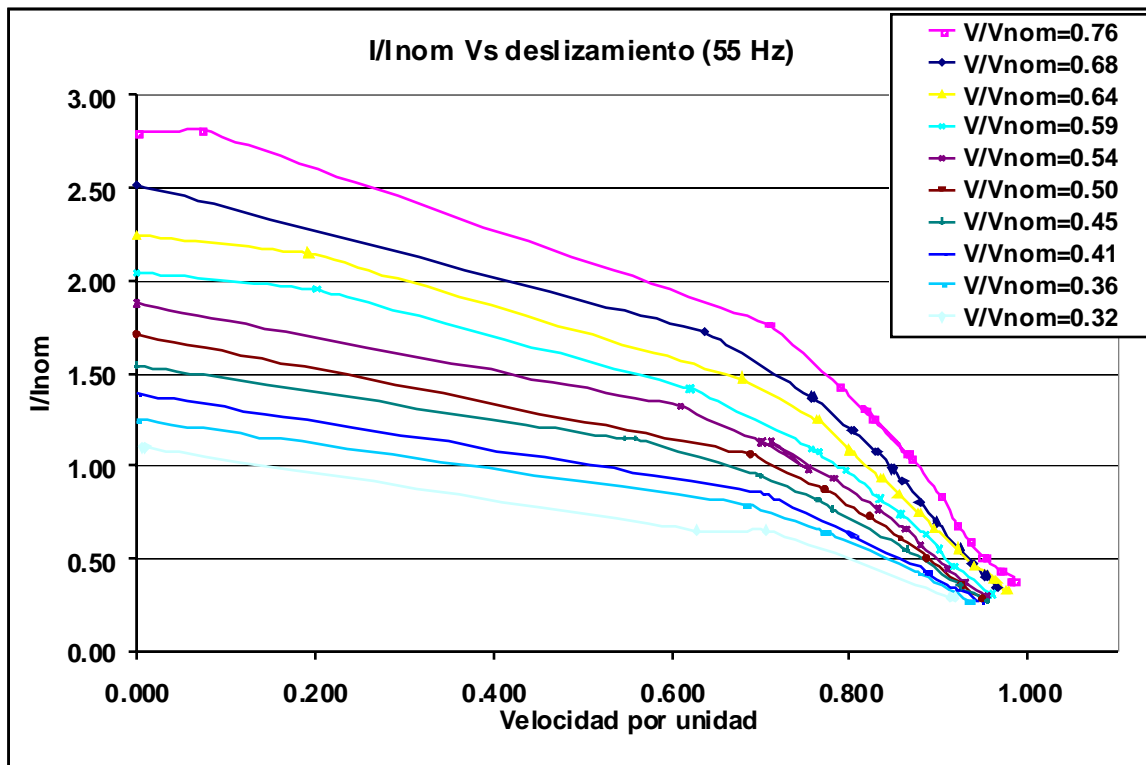
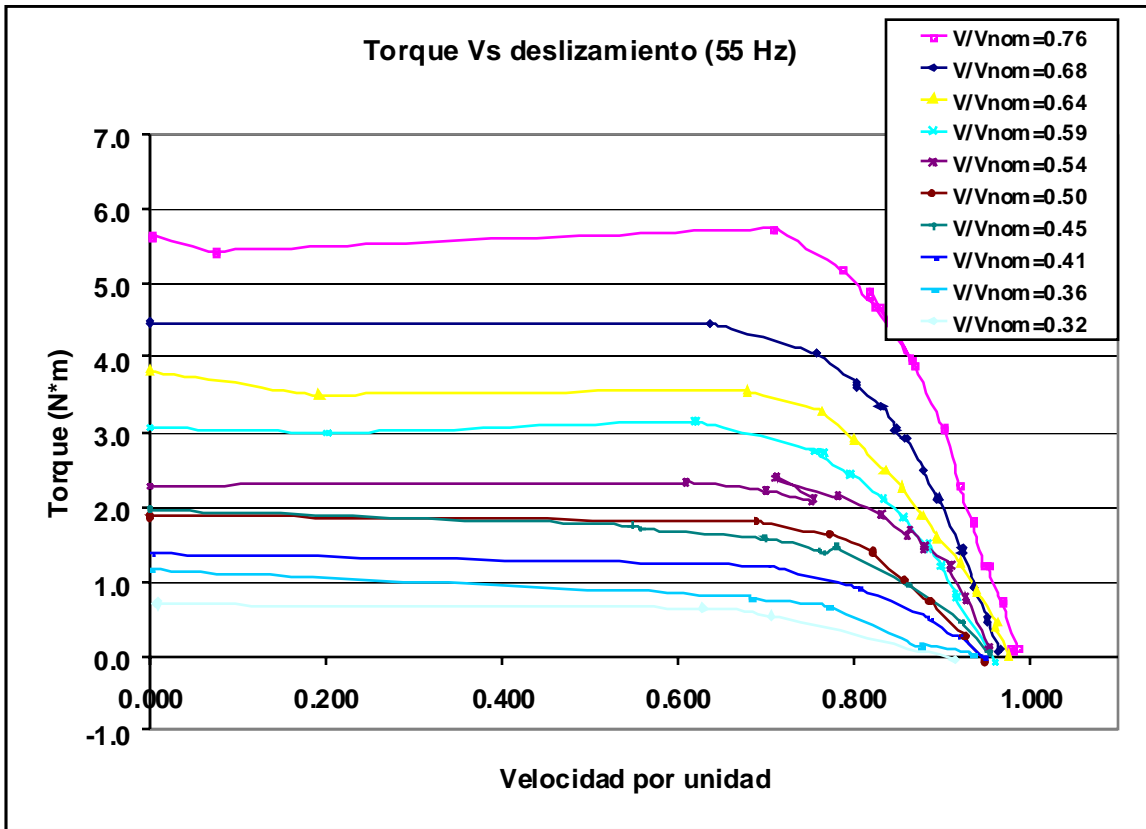


Gráfico 32. Conjunto de gráficas para la respuesta de un motor de inducción alimentado a una frecuencia de 50 Hz con voltaje y carga variables.

5.2.8 Pruebas a 55HZ



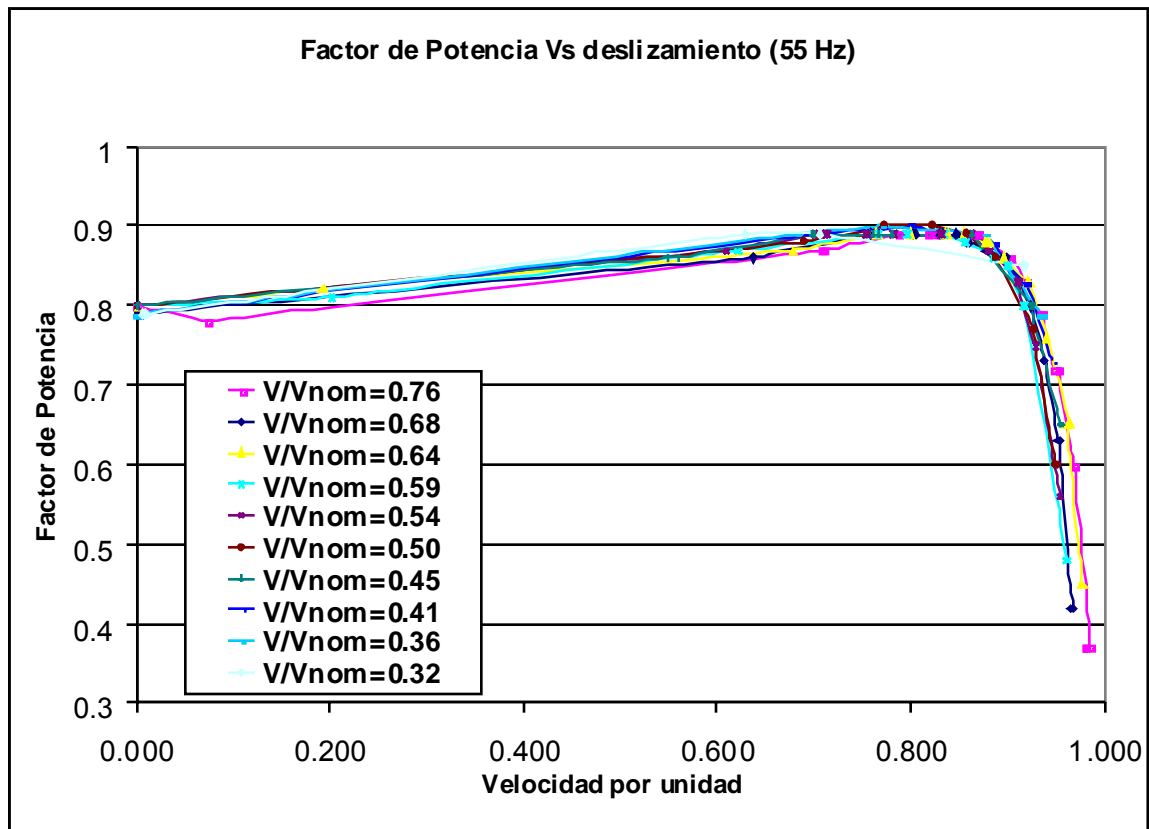
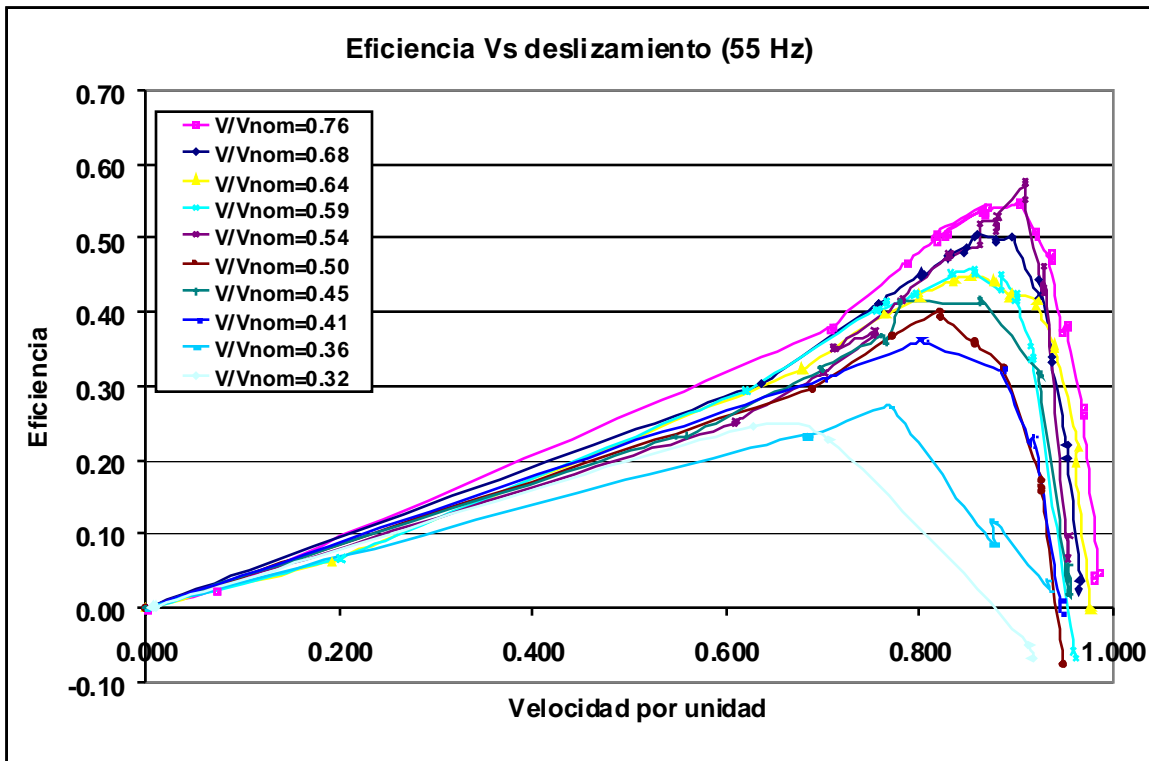


Gráfico 33. Conjunto de gráficas para la respuesta de un motor de inducción alimentado a una frecuencia de 55 Hz con voltaje y carga variables.



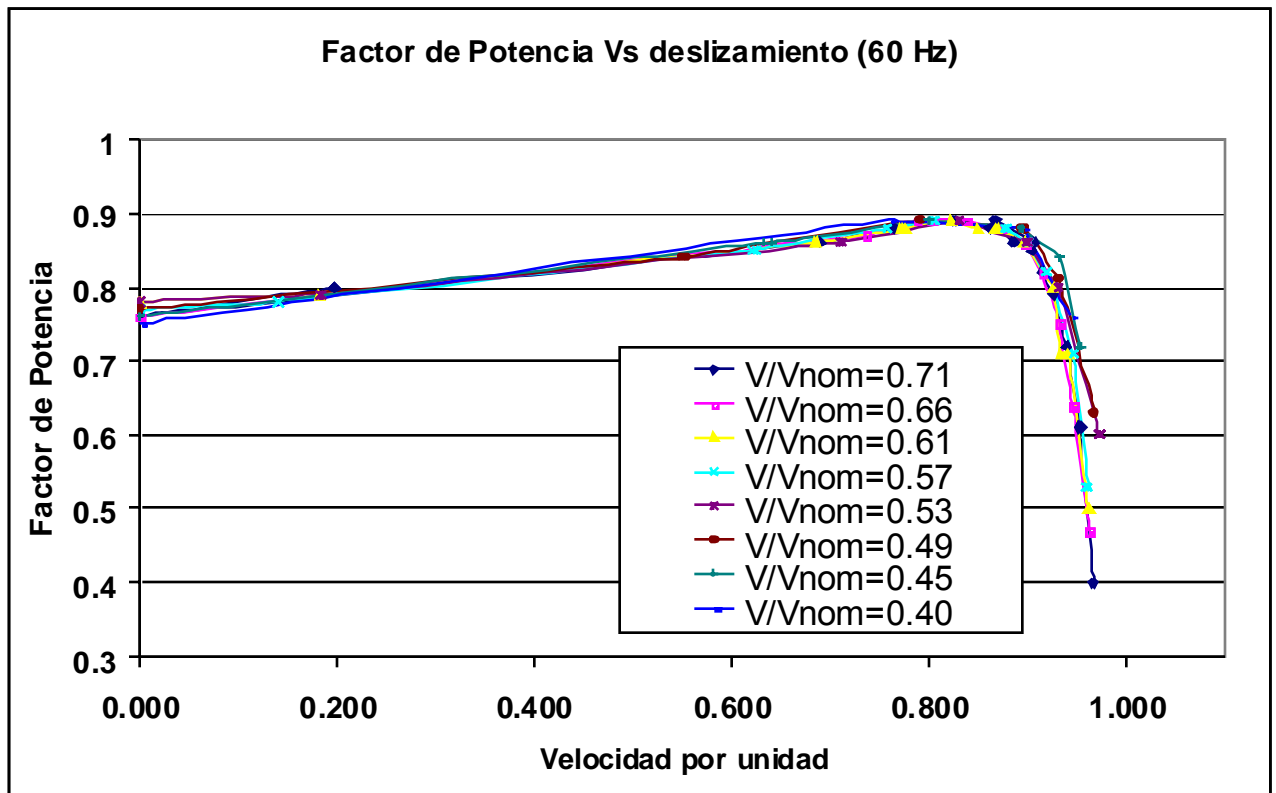
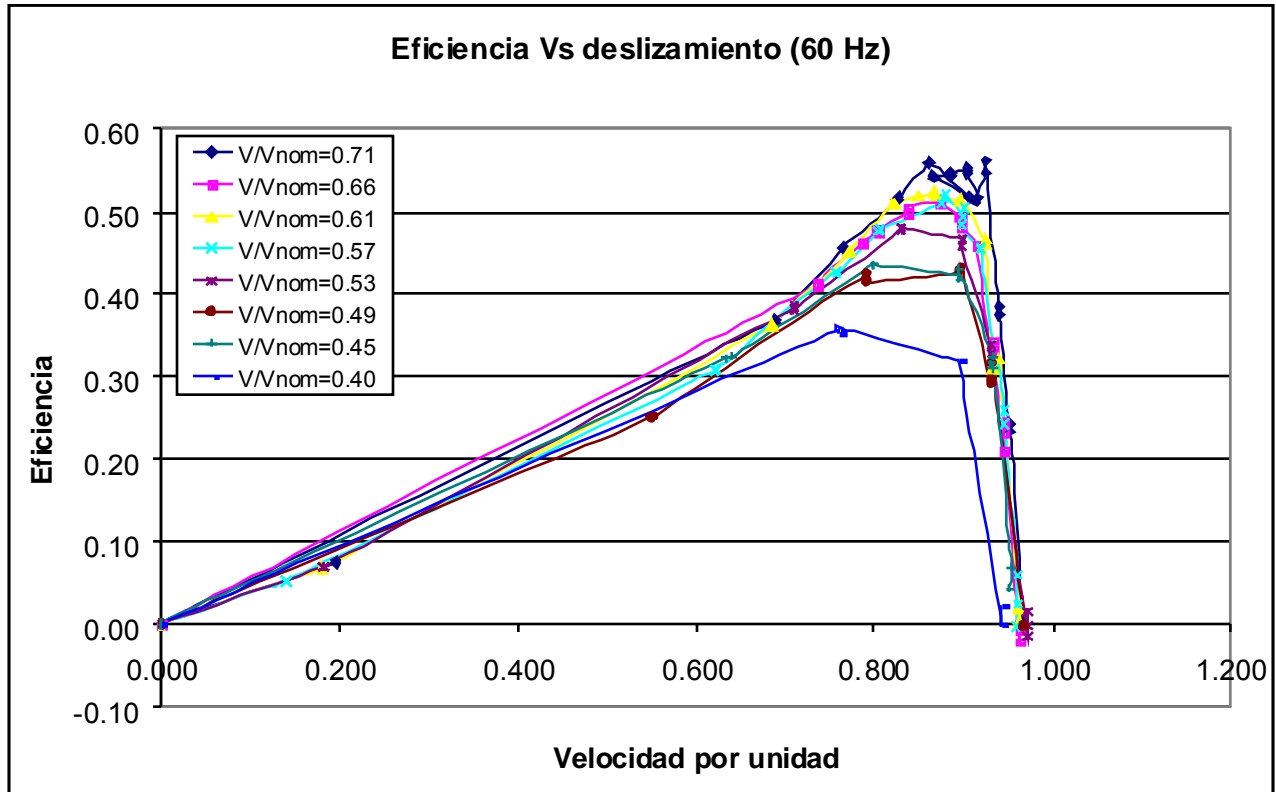


Gráfico 34. Conjunto de gráficas para la respuesta de un motor de inducción alimentado a una frecuencia de 60 Hz con voltaje y carga variables.





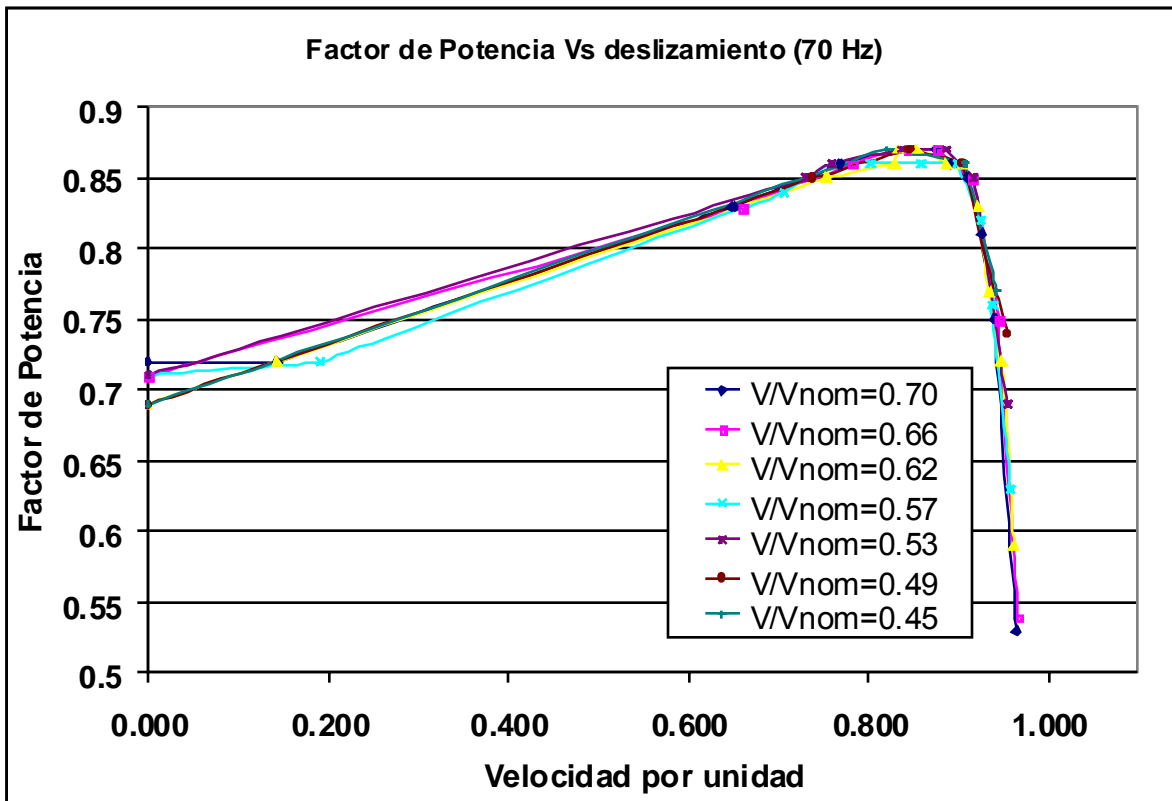
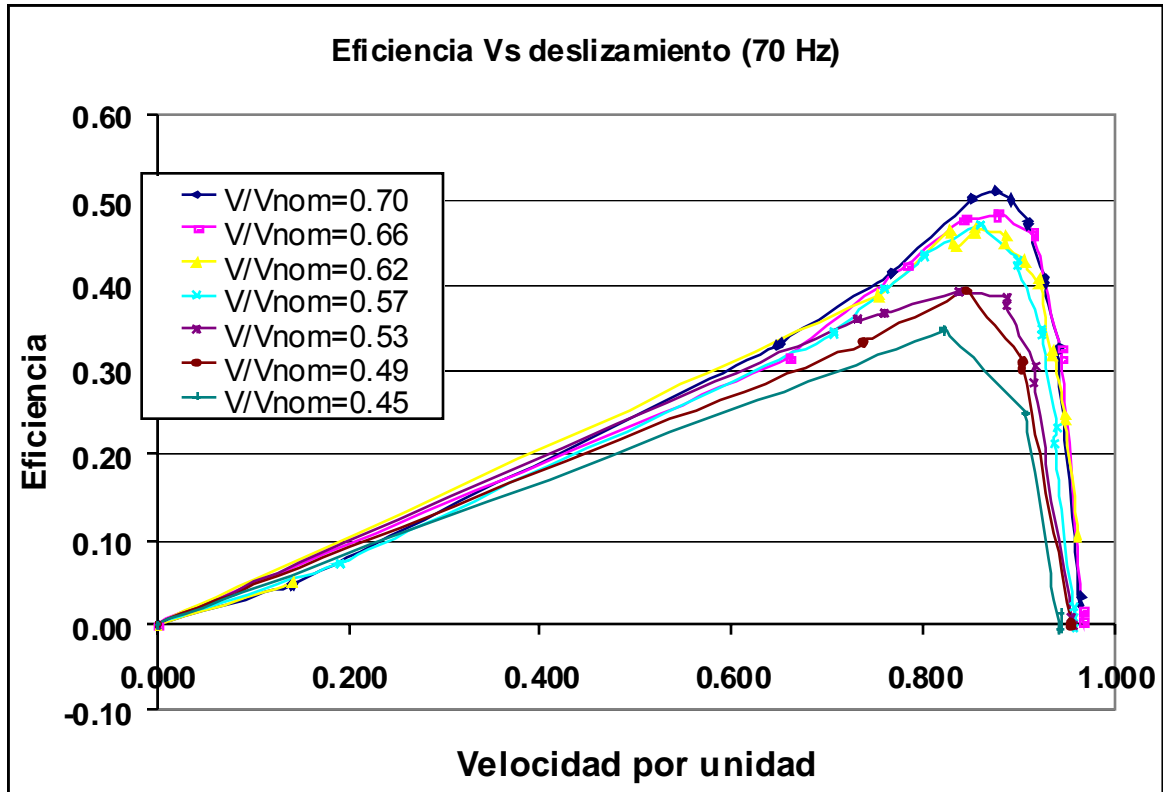


Gráfico 35. Conjunto de gráficas para la respuesta de un motor de inducción alimentado a una frecuencia de 70 Hz con voltaje y carga variables.

### 5.3 INTERPRETACIÓN CORRECTA DE LAS GRÁFICAS OBTENIDAS

Las gráficas presentadas son extremadamente útiles sin su interpretación y limitaciones son entendidas correctamente.

Los experimentos se realizaron sobre para un motor trifásico NEMA tipo B de 1HP. Por lo tanto estos resultados son válidos únicamente para este tipo de motor. Se pueden extrapolar lo resultados a motores de mayor potencia o menor potencia esperando que los resultados no se aparten mucho y se ajusten medianamente bien al motor extrapolado.

### 5.4 CONCLUSIONES EXPERIMENTALES

A partir de las gráficas experimentales podemos concluir lo siguiente:

Como es de esperarse y debido a que el motor está diseñado para ello, se tiene una mayor eficiencia a mayor voltaje de operación para la misma frecuencia.

La tendencia indica que existe un punto límite superior para el valor de voltaje de alimentación máximo el cual dará una eficiencia máxima. De nuevo se espera que este punto se encuentre ubicado en el valor nominal de diseño del motor.

El torque de salida depende fuertemente del voltaje de operación, un pequeño cambio en el voltaje de entrada y el torque se ve afectado como el cuadrado de este cambio de voltaje (Tal y como la teoría lo predice).

Debido a esto se recomienda alimentar el motor por encima de  $0.6 V/V_{nom}$  para obtener un torque de salida alto cuando esto sea posible.

Existe un valor mínimo de voltaje para el cual la eficiencia cae abruptamente, este valor se puede aproximar en  $0.3$  el valor nominal de alimentación. Trabajar el motor por debajo de este valor es altamente ineficiente, y debido al bajísimo valor de torque en la salida no podría impulsar ningún tipo de carga acoplada a él.

Este comportamiento se explica debido a la existencia de un punto límite en el cual las pérdidas eléctricas en el estator, en el núcleo y en general las demás perdidas eléctricas no mencionadas son apenas compensadas por la fuente de alimentación, imposibilitando la conversión de energía eléctrica en mecánica.

Entonces sería excelente alimentar el motor por encima de  $0.6 V/V_{nom}$ , esta bien alimentarlo entre  $0.3$  y  $0.6 V/V_{nom}$  y es malo alimentarlo por debajo de  $0.3 V/V_{nom}$ .

A diferentes frecuencias de operación pero para el mismo valor de  $V/V_{nom}$  la eficiencia máxima es menor a frecuencias mayores. Esto se explica debido al hecho que las pérdidas por histéresis son proporcionales a la frecuencia de operación elevado al factor de Steinmenz, y por lo tanto a mayor frecuencia de operación más perdidas eléctricas por este fenómeno. También esto se explica debido a que las perdidas mecánicas por fricción y rotacionales también aumentan al aumentar la velocidad de giro del motor.

El torque a frecuencias bajas es mucho mayor para el mismo voltaje y deslizamiento que a frecuencias altas.

El torque a frecuencias bajas es mucho mayor para el mismo voltaje y eficiencia que a frecuencias altas.

Esta tendencia se nota en todo el rango de medición, se espera que exista un límite inferior para la frecuencia de operación en la cual esta tendencia se estabilice, ya que no es lógico que esta tendencia continúe hasta llegar a los 0Hz.

Sin embargo, y debido a la imposibilidad de realizar experimentos a frecuencias más bajas que 15hz con mayores voltajes de operación, este punto es desconocido.

Para un motor utilizado a condiciones nominales el deslizamiento de trabajo es del orden del 5 al 10%. Bajo las condiciones de alimentación variable, para el mismo valor en la frecuencia de alimentación, y para diferentes voltajes de alimentación, el deslizamiento para obtener máxima eficiencia se va corriendo a la derecha (sobre la gráfica de velocidad por unidad) a medida que se aumenta el voltaje de alimentación. Así es que se encuentran en algunas gráficas deslizamientos óptimos que están en el rango de 15 a 17%. Esto tiene como consecuencia una exigencia de corriente mayor sobre el bobinado del motor, y un mayor torque en comparación con un deslizamiento del 10%.

Para el mismo voltaje de la fuente y diferentes frecuencias de alimentación el valor óptimo para el deslizamiento no se ve afectado.

El factor de potencia no se nota muy afectado por la variación en la frecuencia y voltaje de operación.

Las necesidades de corriente no se ven fuertemente afectadas al subir el voltaje y variar la frecuencia de operación, y usando el motor en un punto de alta eficiencia.

## **6 MODELO MATEMÁTICO DE UN GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES.**

El desarrollo del modelo matemático hace uso de distintas fuentes, cada fuente presenta ciertas ventajas y problemas respecto a los otros. Por lo tanto el modelo final implementado será básicamente la integración de partes de cada uno de estos modelos ajustados a la necesidad del diseño requerido.

### **6.1 MODELO PROPUESTO POR ANDERS GRAUERS (Phd TESIS, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY)**

Este modelo se propone en el documento de tesis de doctorado de Anders Grauers. Presentado el año de 1996 en Göteborg. El título de la tesis es –“Design of Direct-driven Permanent-magnet Generators for Wind Turbines”. ISBN 91-7197-373-7.

En esta tesis de doctorado se explican algunos métodos para calcular analíticamente los parámetros eléctricos que caracterizan un generador síncrono AC.

El objetivo de la tesis de Grauers era el diseño y la optimización de generadores de imanes permanentes muy grandes (>50Kw).

En el documento se plantean las ecuaciones necesarias para modelar un generador sincrónico AC. Las ecuaciones planteadas se pueden en:

<i>De optimización:</i>	Son funciones de costo que usará para optimizar el diseño.
<i>Generales de diseño:</i>	Son ecuaciones geométricas.
<i>Parámetros Eléctricos:</i>	Ecuaciones para hallar los parámetros equivalentes en el modelo eléctrico del generador.
<i>Perdidas eléctricas:</i>	Ecuaciones para calcular las perdidas eléctricas en el generador.
<i>Pérdidas mecánicas:</i>	Modelan las perdidas de este tipo en el generador.
<i>Ecuaciones de construcción:</i>	Se usan para hallar la masa y el volumen del generador.
<i>Ecuaciones de salida:</i>	Ecuaciones para computar la potencia y voltaje de salida del generador.

Como es claro, la mitad de las tesis se propone construir las ecuaciones para describir los parámetros eléctricos del circuito equivalente, y la otra mitad de las tesis posee ecuaciones de optimización que se usaron para encontrar las dimensiones económicamente óptimas de diseño para este generador.

Por lo tanto solo la primera mitad (la de diseño) nos interesa a nosotros.

El modelo propuesto es para un generador eléctrico sincrónico, de imanes permanentes, de flujo radial, con imanes montados en la superficie sin concentradores de flujo, un número no definido de polos, bobinado en el estator montado sobre ranuras, bobinado del tipo de doble capa (double layer), 1 ranura por polo y fase, un factor de bobinado igual a 1 (winding factor), cada "coil" o grupo de fase en el modelo solo posee una vuelta, una estructura interna de conexión en serie.

Para ajustar el valor de  $V_{oc}$  (ver circuito equivalente) en el modelo al valor requerido, de acuerdo con Grauers, es necesario escoger el número de "branches" conectadas en paralelo o en serie y el número de ranuras. Sin embargo el modelo no soportaría una conexión diferente a la expuesta en el párrafo anterior.

La conexión interna de los bobinados propuesta es en forma de "Y", común en este tipo de máquinas debido a la línea neutra al ser sacada y propiamente enterrada provee una operación más segura del generador.

El modelo no hace referencia a un rango de potencia para el cual funcione mejor.

Como este modelo es muy específico y limitado a las condiciones expuestas por los requerimientos de Grauers, entonces de allí solo se extrajo la formula para el cálculo de la inductancia síncrona.

Usar este modelo como se había venido usando en tesis previas [8][9][11] posiblemente no arrojará resultados reales ya que las características que posee un generador comercial o construido en el laboratorio pueden diferir fuertemente de las condiciones por Grauers asumidas.

## 6.2 MODELO PROPUESTO EN EL LIBRO “ELECTRIC MACHINERY AND TRANSFORMES”, GURU [1]

Es un modelo basado en el desarrollo de las ecuaciones de Maxwell en su forma más sencilla. Por lo tanto es un modelo aproximado.

Este modelo es más benevolente que el modelo de Grauers ya que deja abierto a criterio del diseñador muchas de las variables de diseño que Grauers consideraba como constantes, aunque deja por fuera muchas otras que lo hacen una aproximación menos exacta. Es además un modelo de estado estable.

Las ecuaciones de este modelo fueron las que se usaron como base para el desarrollo del modelo por mí propuesto.

## 6.3 MODELO PROPUESTO

Como se menciona en las secciones anteriores el modelo se conforma de tres partes:

Grauers:	Cálculo de la inductancia síncrona.
Gurú:	Cálculo de la EMF generada. Cálculo de la frecuencia de salida eléctrica del generador. Algunos parámetros físicos de construcción del estator.
Aporte personal:	Cálculo del flujo magnético por polo establecido por los imanes (circuito magnético). Cálculo del peso y longitud total de las bobinas. Cálculo de la característica externa del generador.

### 6.3.1 Desarrollo del modelo

El modelo se hace cargo del cálculo de tres parámetros:

- Fuente de voltaje  $E_A$
- Resistencia por fase  $R_A$
- Inductancia síncrona  $X_A$

Para el cálculo de la fuente de voltaje del modelo  $E_A$  es necesario conocer el flujo establecido por los imanes permanentes. Este cálculo también se aborda en los subsiguientes capítulos.

### 6.3.2 Cálculo de la Fuente magneto motriz

El valor de la fuente electromotriz se halla a partir de la ley de inducción de Faraday. (1ra ley de Maxwell).

Algunos términos de importancia:

**P:** # de polos en el generador.

**S:** # de Ranuras en la armadura (estator en este caso)

<b>q:</b> # de fases.	
<b>N<sub>s</sub>:</b> Velocidad de giro del rotor (rpm)	
<b>N<sub>c</sub>:</b> # de vueltas que posee cada bobina individual	
<b>n:</b> # de bobinas por polo y fase (grupo de fase)	= S/(P*q)
<b>f:</b> Frecuencia del voltaje generado (Hz).	= N <sub>s</sub> * P / 120
<b>ρ:</b> Distancia eléctrica entre el inicio de una bobina y su final	
<b>K<sub>p</sub>:</b> Factor de paso	= seno(ρ/2)
<b>γ:</b> Distancia eléctrica entre ranuras adyacentes (grados)	= 180 / {S/P}
<b>K<sub>d</sub>:</b> Factor de distribución	= {seno(nγ/2)} / {n seno(γ/2)}
<b>K<sub>w</sub>:</b> Factor de bobinado	= k <sub>p</sub> *k <sub>d</sub>
<b>Φ<sub>p</sub>:</b> Flujo magnético por polo establecido por los imanes.	
<b>E<sub>pG</sub>:</b> Voltaje inducido por grupo de fase	= 4.44 n N <sub>c</sub> k <sub>w</sub> f Φ <sub>p</sub>
<b>a:</b> Número de caminos paralelos en el bobinado por fase)	
<b>E<sub>a</sub>:</b> Voltaje inducido por fase	= P/a E <sub>pG</sub>

El modelo de Grauers es similar a este, sin embargo y no se usa ya que él asume un valor de densidad de flujo magnético en el air gap constante. De allí a partir de un circuito magnético sencillo calcula las dimensiones que debería tener un imán permanente para lograr establecer ese flujo. Sin embargo el asume un valor de H (coercitividad del imán) constante, y nunca asegura que el imán se este usando de la manera correcta (punto de operación donde se posea el máximo valor de B\*H).

### 6.3.3 Cálculo del flujo magnético impuesto por los imanes permanentes.

El modelo usado (Gurü), exige el conocimiento del flujo magnético por polo establecido por los imanes. Esto se logra mediante la construcción de un circuito magnético equivalente. Con la ayuda de este circuito se establece el punto de operación de los imanes y por lo tanto se puede establecer el flujo magnético que ellos ofrecen.

Los circuitos magnéticos son el símil de los circuitos eléctricos donde las fuentes de voltaje, resistencias y la corriente se remplazan por similares magnéticos.

En la construcción de un circuito magnético se observa el “camino magnético” que debe atravesar el campo del imán para lograr hacer un circuito cerrado.

En estos circuitos las fuentes de voltaje son remplazadas por fuentes mmf (magnetomotrices). Estas fuentes realmente son fuentes de flujo magnético y se consiguen mediante una bobina llevando una corriente “I” que genera una densidad de flujo magnético (B), o bien se pueden crear mediante imanes permanentes.

En el caso de generadores donde el campo magnético lo genera un electroimán:

$$e = N \cdot I$$

e:	Valor de la fuente de “voltaje”
N:	Numero de vueltas en la bobina
I:	Corriente que circula en la bobina

En el caso de imanes permanentes:

$$e = H \cdot L$$

- e: Valor de la fuente de "voltaje"  
 H: Intensidad de campo eléctrico en el imán.  
 L: Longitud del imán

La corriente en este tipo de circuitos es remplazada por un flujo magnético (ley de Ampere):

$$\Phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = B \cdot A$$

- $\Phi$ : Flujo magnético.  
 B: Densidad de flujo magnético.  
 A: Area del material.

Las resistencias son remplazadas por reluctancias que son la medida de que tan fácil deja pasar un material a través de si un flujo magnético.

$$\mathfrak{R} = (l \cdot \mu) / A$$

- $\mathfrak{R}$ : Valor de la reluctancia  
 l: Longitud del material.

Teniendo estos tres elementos básicos podemos enunciar la ley de Ohm Magnética:

$$\Phi \cdot \mathfrak{R} = e$$

Acá también aplican las leyes de Kirchoff de corriente y de voltaje.

### 6.3.3.1 Imanes permanentes

En el diseño de circuitos magnéticos es pues deseable usar el imán permanente en un punto donde se le pueda extraer la máxima cantidad de energía. Este punto es fácil de hallar en la curva de demagnetización del material y es donde se presenta el mayor producto B·H. (Sección 4.1)

Para hallar el punto de operación del imán permanente es necesario encontrar la solución del circuito magnético correspondiente. Esta solución es de la forma B(Teslas)=k·H, donde k es una constante que depende de las condiciones geométricas del generador.

### 6.3.3.2 Construcción de un circuito magnético

Construir un circuito magnético significa encontrar el camino el cual es ocupado por el flujo magnético en su necesidad de ir de polo a polo magnético.

Un generador de dos polos se vería de la siguiente manera:

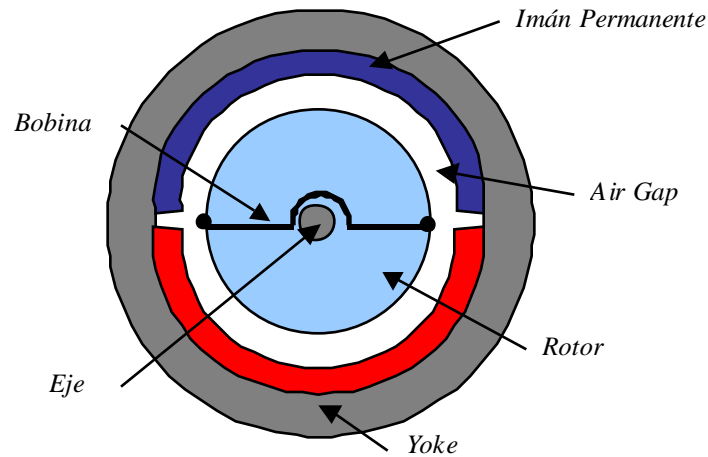


Gráfico 36. Esquema de un generador de dos polos.

El camino que debe atravesar el flujo para llegar de un polo a otro es el siguiente:

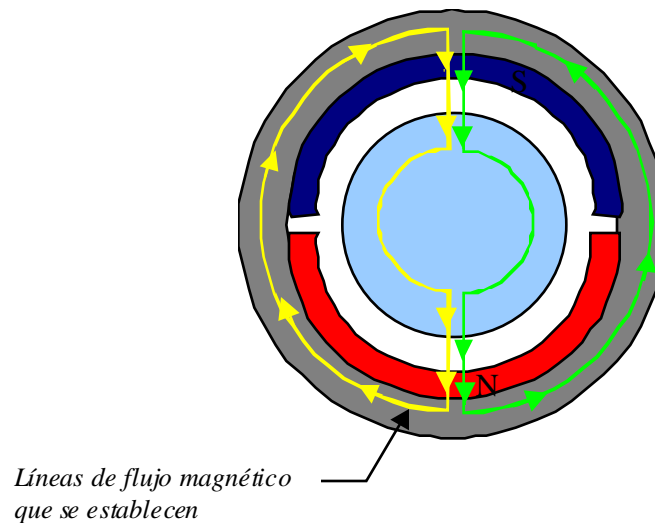


Gráfico 37. Posibles caminos del flujo magnético en el generador

Esto es obviamente una aproximación. En realidad las líneas de flujo se distorsionan debido a factores geométricos en la superficie del generador, además estas se curvan en los extremos laterales del mismo. Este fenómeno es conocido como "fringing". Esto reduce el flujo total que puede establecer cada imán.

Se debe resolver entonces el circuito magnético para solo uno de los dos caminos establecidos ( $\Phi$ ). El flujo total que cada imán establece será entonces dos veces el flujo calculado para un solo camino.  $\Phi_T = 2 * \Phi$

Para un generador de dos polos el camino magnético promedio es el que se presenta en la siguiente gráfica:



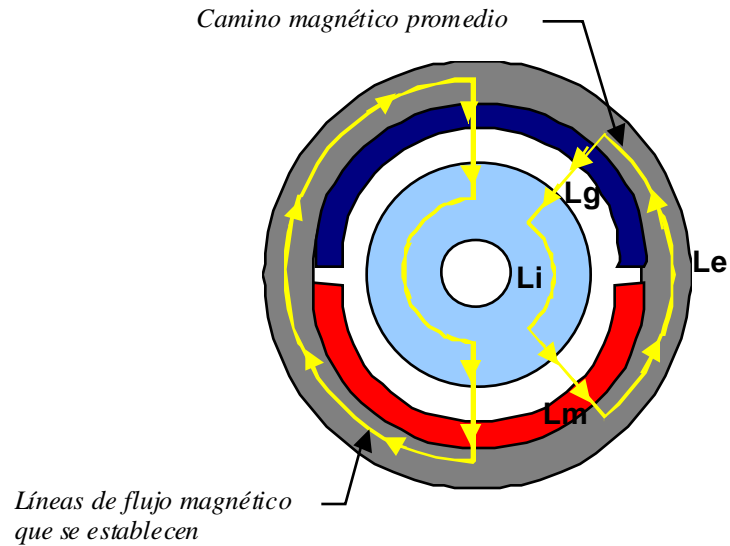


Gráfico 38. Caminos magnéticos para un generador de imanes permanentes.

De allí se puede observar que el flujo magnético debe atravesar 6 segmentos los cuales poseen 6 longitudes correspondientes: 1 vez el estator, 2 veces air gap, 2 veces magneto, 1 vez el rotor.

De acuerdo con esto el circuito magnético equivalente es el siguiente:

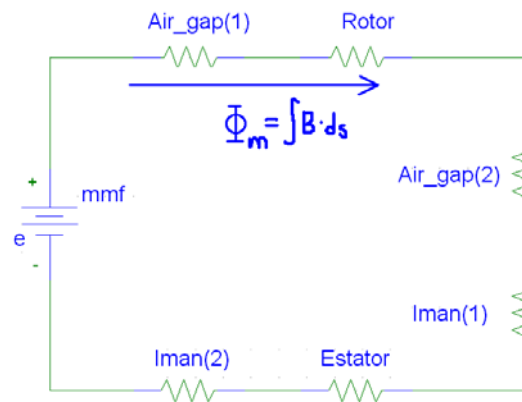


Gráfico 39. Circuito magnético para el generador síncrono.

La única diferencia entre el camino magnético de un generador de 2 polos o de varios polos es la longitud del cada uno de los segmentos antes mencionados, el circuito magnético es el mismo.

No existe diferencia alguna tampoco en el circuito si los imanes son colocados en la parte interna del generador (rotor interno) o en la parte externa (rotor externo).

Para hallar la reluctancia de cada uno de los segmentos debemos conocer la longitud promedio de cada uno de estos segmentos (Gráfico 38). Para ello se hacen uso de las siguientes variables geométricas:

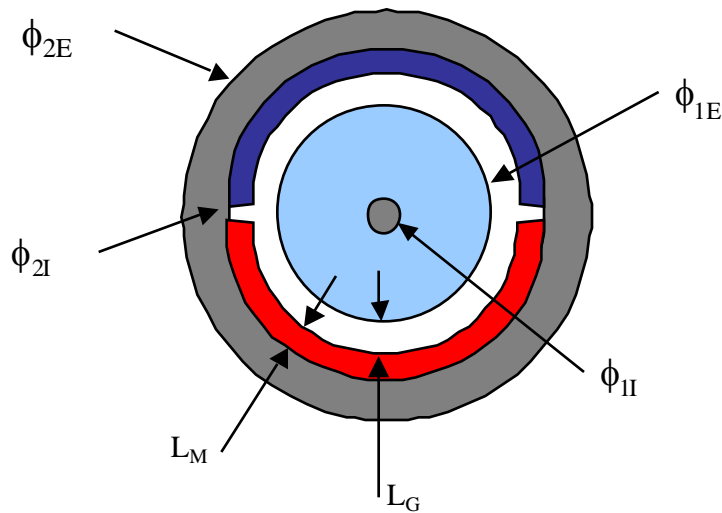


Gráfico 40. Características geométricas del generador.

**L<sub>M</sub>**: La longitud del camino a través de los imanes, es un parámetro de entrada al diseño y que depende de la geometría específica en que se encuentren los imanes comercialmente en el mercado.

**L<sub>I</sub>**: La longitud del segmento interno del generador (que puede ser rotor o estator).

$$L_I = (\phi_{1E} / 2 - \phi_{1I} / 2) + \{ \phi_{1I} / 2 + (\phi_{1E} - \phi_{1I}) / 4 \} \cdot \pi / P$$

**L<sub>G</sub>**: Longitud del air gap.

$$L_G = 2 \cdot (\phi_{2I} / 2 - \phi_{1E} / 2 + L_M)$$

**L<sub>E</sub>**: Longitud del segmento externo del generador (que puede ser rotor o estator).

$$L_E = (\phi_{2E} / 2 - \phi_{2I} / 2) + \{ \phi_{2I} / 2 + (\phi_{2E} - \phi_{2I}) / 4 \} \cdot \pi / P$$

Haciendo uso del hecho que las caídas de mmf en las reluctancias vienen dadas por  $\text{mmf} = H \cdot L$  y que la sumatoria de mmf's alrededor del circuito debe ser igual a cero tenemos:

$$2 \cdot H_M \cdot L_M + 2 \cdot H_G \cdot L_G + H_E \cdot L_E + H_I \cdot L_I = 0$$

$$2 \cdot H_M \cdot L_M = - \{ 2 \cdot H_G \cdot L_G + H_E \cdot L_E + H_I \cdot L_I \}$$

Como el flujo magnético por cada una de las reluctancias es el mismo tenemos que:

$$\phi = B_M \cdot A_M = B_G \cdot A_G = B_E \cdot A_E = B_I \cdot A_I$$

Donde  $A_{M,G,E,I}$  representan las áreas seccionales de cada uno de los segmentos ilustrados y  $B_{M,G,E,I}$  representa la densidad de flujo magnético que los atraviesa.

$$A_M = \text{Profundidad} \cdot \text{Largo\_imán} / 2$$

$$A_G = \text{Prof} \cdot (\phi_{2I}/4 + \phi_{1E}/4 + \text{Alto\_imán}/2) \cdot 2 \cdot \pi / P$$

Si el imán esta colocado en la parte interna del generador

$$A_G = \text{Prof} \cdot (\phi_{1E}/4 + \phi_{2I}/4 - \text{Alto\_imán}/2) \cdot 2 \cdot \pi / P$$

Si el imán esta colocado en la parte externa del generador

$$A_E = (\phi_{2E} - \phi_{2I})/2 \cdot \text{profundidad}$$

$$A_I = (\phi_{1E} - \phi_{1I})/2 \cdot \text{profundidad}$$

Combinando las anteriores ecuaciones y sabiendo que  $B = \mu \cdot H$  tenemos:

$$2 \cdot H_M \cdot L_M = -B_M \cdot A_M \{ 2 \cdot L_G / (\mu_G \cdot A_G) + L_E / (\mu_E \cdot A_E) + L_I / (\mu_I \cdot A_I) \}$$

$$B_M = -2 \cdot H_M \cdot L_M / [A_M \cdot \{ 2 \cdot L_G / (\mu_G \cdot A_G) + L_E / (\mu_E \cdot A_E) + L_I / (\mu_I \cdot A_I) \}]$$

Combinando las ecuaciones anteriores con esta y con el conocimiento previo aproximado de los valores de permeabilidad ( $\mu$ ) para cada uno de los segmentos incluidos y remplazando esto en la formula anterior se obtiene una expresión que se ve de la siguiente manera:

$$B_M = -k \cdot H_M$$

Donde k es una constante numérica.

Esta ecuación se conoce con el nombre de la línea de operación del circuito. El punto de operación del imán se encuentra como la intersección de esta línea con la curva de demagnetización del imán. De allí se extrae entonces el valor de  $H_M$  y  $B_M$  tal y como se mostró en el capítulo 4.

El flujo establecido por el imán es por consiguiente:

$$\phi = B_M \cdot A_M$$

y el flujo total es:

$$\phi_T = 2 \cdot \phi$$

Grauers hace un desarrollo similar en su tesis, sin embargo su parámetro de diseño es el logro de una densidad de campo de 1T en el air gap. Por lo tanto usa el circuito magnético para calcular la longitud del imán requerida para establecer este flujo, aproximación que no es útil para nuestro propósito de diseño.

### 6.3.4 Calculo de la resistencia equivalente

Para el cálculo de la resistencia se multiplica el valor de la resistividad del material por la longitud de este que se usará en la construcción del generador.

Longitud del alambre en bobina por fase ( $L_A$ ):

$L_A = 2 \cdot (\text{ancho de la bobina} + \text{distancia mecánica entre slots adyacentes}) \cdot \text{Diámetro del estator} / 2 \cdot N_c \cdot N_o$  de bobinas a construir por fase.

$$R_A = L_A \cdot \rho \quad (\Omega/m)$$

### 6.3.5 Cálculo de la reactancia sincrónica

El valor de la inductancia sincrónica es el valor más complicado de calcular. Si recordamos, una parte de esta inductancia sincrónica, la llamada reactancia de fuga (leakage reactance), aparece en el modelo debido al flujo magnético que se produce en el generador debido a la corriente que circula por la armadura. La corriente que circula por allí genera un campo magnético que a su vez se acopla con el resto del bobinado del estator y de las partes metálicas del generador induciendo una fuente de voltaje que se opone en signo (o en fase para circuitos AC) a la fuente de magnetomotriz básica. Este fenómeno se conoce con el nombre de "Auto-inductancia".

Esta caída de voltaje se modela mediante  $e = N \cdot d\Phi/dt$  (Ley de Faraday). Si se define la Inductancia como  $L = N \cdot d\Phi/dI$  podemos expresar el voltaje inducido como  $e = N \cdot d\Phi/dI \cdot dI/dt = L \cdot dI/dt$ , es decir una inductancia.

$$\begin{aligned} L_{sl} &= 2 \cdot p \cdot q \cdot \mu_0 \cdot l_e \cdot \lambda_{sl} & \lambda_{sl} &= (2 \cdot h_{Cu}) / (3 \cdot b_s) + (3 \cdot h_i) / (2 \cdot b_s) + h_{s1} / b_{s1} + h_{s2} / (b_s - b_{s1}) \cdot \ln(b_s / b_{s1}) \\ L_{tl} &= 2 \cdot p \cdot q \cdot \mu_0 \cdot l_e \cdot \lambda_{tl} & \lambda_{tl} &= (\delta + h_m) / (b_{s1} + 0.8 \cdot (\delta + h_m)) \\ L_b &= 2 \cdot p \cdot q \cdot \mu_0 \cdot l_e \cdot \lambda_b & \lambda_b &= 0.25 \end{aligned}$$

La segunda parte de la Inductancia sincrónica se compone de la llamada reactancia por reacción de la armadura. El flujo establecido por los polos del generador se superpone al flujo producido en la armadura, este flujo debido a inductancia mutua entre los agentes generadores de flujo, genera de nuevo una fuente de voltaje que se opone en signo a la fuerza electromotriz primaria en el circuito. A este fenómeno se le conoce con el nombre de "Inductancia Mutua".

$$L_m = p \cdot \mu_0 \cdot l_e \cdot \lambda_m \quad \lambda_m = \tau_p / \{2(\delta_{ef} + h_m)\}$$

Tenemos pues que la Inductancia total del generador es la suma de las inductancias antes mencionadas.

$$L_a = 4/3 \cdot L_m + L_b + L_{tl} + L_{sl}$$

El factor 4/3 cuenta por una conexión en Y interna del bobinado.

Se presentan las variables tal y como aparecen en el modelo de Grauers. Este modelo asumía un estator ranurado. El modelo propuesto asume un estator sin ranuras perforadas en el estator. Por lo tanto al usar estas expresiones es necesario hacer las modificaciones correspondientes.

### 6.3.6 Pérdidas en el generador

Las pérdidas en el generador son principalmente:

- Perdidas mecánicas por la inercia del rotor.
- Perdidas mecánicas por la fricción del aire interna.
- Perdidas eléctricas por la resistencia de las bobinas.
- Perdidas eléctricas por la histéresis en los materiales del núcleo.
- Perdidas por corrientes parásitas "Eddy Currents".

Modelar estas pérdidas es un proceso complicado y no se abordó durante el desarrollo de la tesis.

Sin embargo se supone una eficiencia del 85% lo cual es un valor típico para estos generadores pequeños.

### 6.3.7 Potencia eléctrica generada

La potencia disponible en el circuito magnético se puede calcular como la energía magnética disponible en los imanes multiplicada por la velocidad de giro de este.

La potencia neta que se puede extraer del generador es entonces este valor multiplicado por la eficiencia del conjunto.

$$P = \{(B_M \cdot H_M)_{\text{Punto Operación}} \cdot \text{Volumen imán} \cdot \text{Numero imanes}\} / 2$$

De aquí se puede extraer la potencia máxima que puedo extraer del generador.

### 6.3.8 Implementación del modelo

El modelo se implementó en Excel 2000 y mediante algunos algoritmos montados en Visual Basic el uso del modelo se hace un poco más amable para el usuario final.

## 7 VALIDACIÓN DEL MODELO PROPUESTO

Con el propósito de verificar que el modelo propuesto sea una buena aproximación a la práctica es necesario comparar los resultados que el modelo arroja con resultados experimentales realizados generadores ya construidos.

Paran ellos se realizaron experimentos sobre algunos generadores de imanes permanentes disponibles en el laboratorio.

Se encontraron 5 generadores disponibles, estos han sido resultado de tesis previas o han sido adquiridos comercialmente.

Adquiridos comercialmente encontramos los siguientes:

- 1 Generador Whisper 600, Montado en el laboratorio de eólica.
- 1 Generador comprado en la tesis de Osorio. [10]

Construidos como parte de un trabajo de grado están los siguientes:

- 1 Generador probado en la tesis de Orozco. [8]
- 2 Generadores construidos y probados en la tesis de Santos. [9]

Sin embargo y para validar el modelo es necesario conocer todos los detalles de construcción de los generadores. Esto no siempre es posible de encontrar ya bien sea por falta de documentación en los trabajos previos de diseño y construcción, o bien sea por que el generador fue comprado y no se tienen datos acerca del tipo de bobinado que posea o del tipo de imanes con los cuales fue construido.

Esto, y la falta de tiempo hicieron imposible la validación del modelo.

Sin embargo se realizaron pruebas sobre los generadores antes mencionados y se presentan a continuación los resultados:

### 7.1 GENERADOR DE [10]



Gráfico 41. Generador de [10]

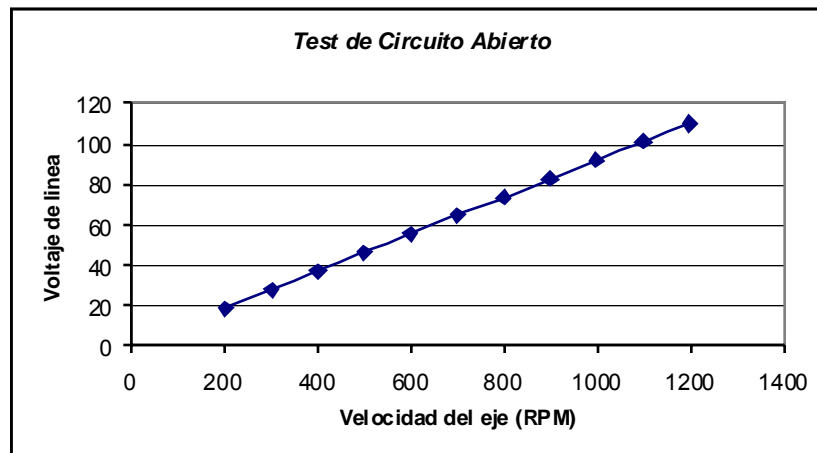


Gráfico 42. Test de circuito abierto.

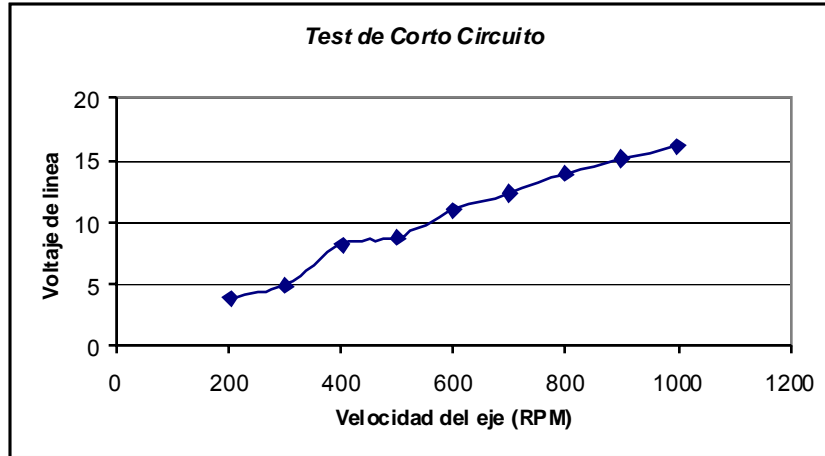


Gráfico 43. Test de corto circuito.

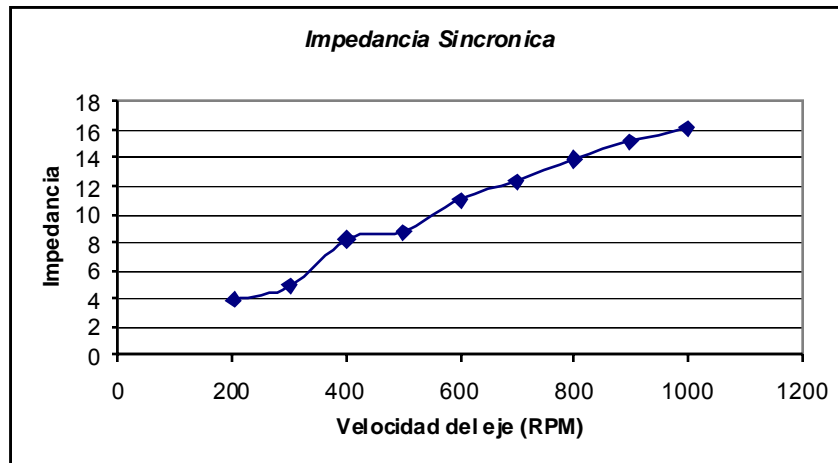


Gráfico 44. Impedancia síncrona para el generador de [10]

Resistencia por fase: 0.5 Ohms

## 7.2 GENERADOR DE [8]



Gráfico 45. Generador de [8]

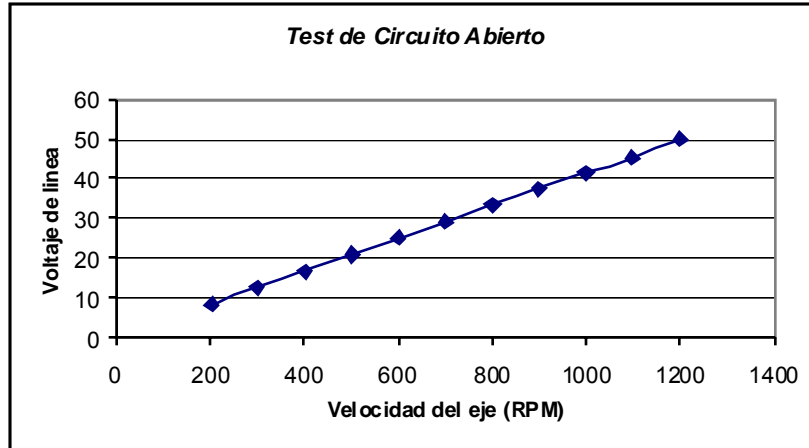


Gráfico 46. Test de circuito abierto para [8]

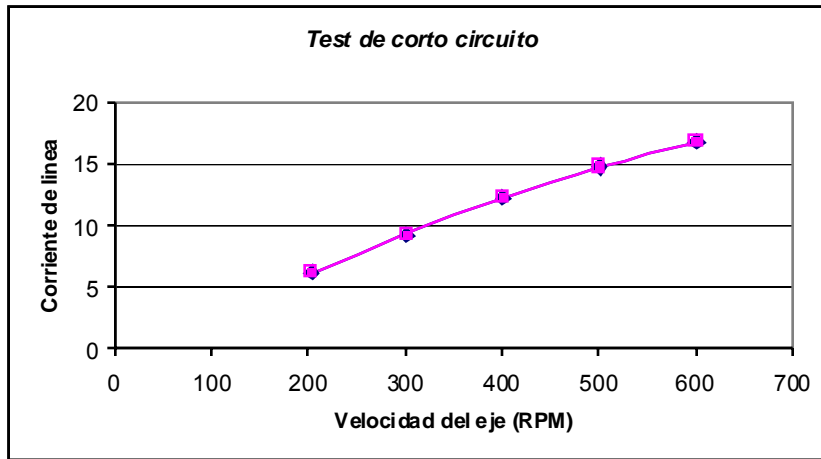


Gráfico 47. Test de corto circuito para [8]

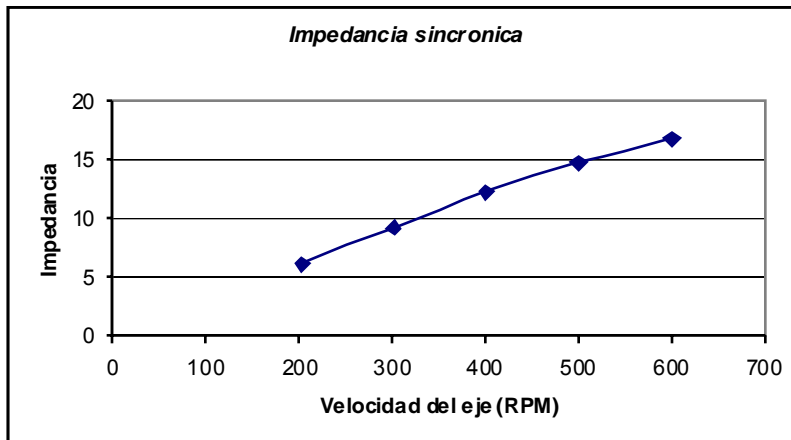


Gráfico 48. Impedancia síncrona para [8]

Resistencia DC por fase: 0.5 Ohms



7.3 GENERADOR WHISPER



Gráfico 49. Generador Whisper

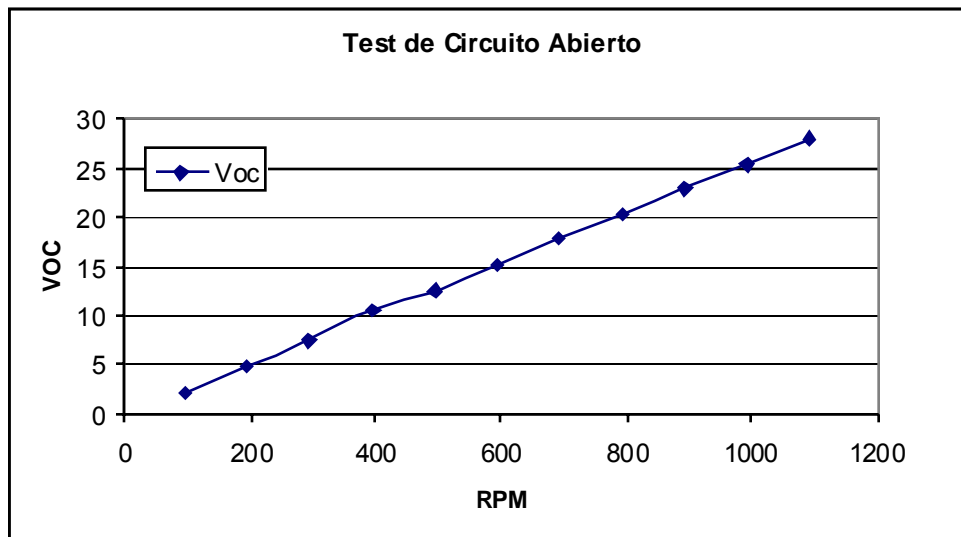


Gráfico 50. Test de circuito abierto para Whisper.

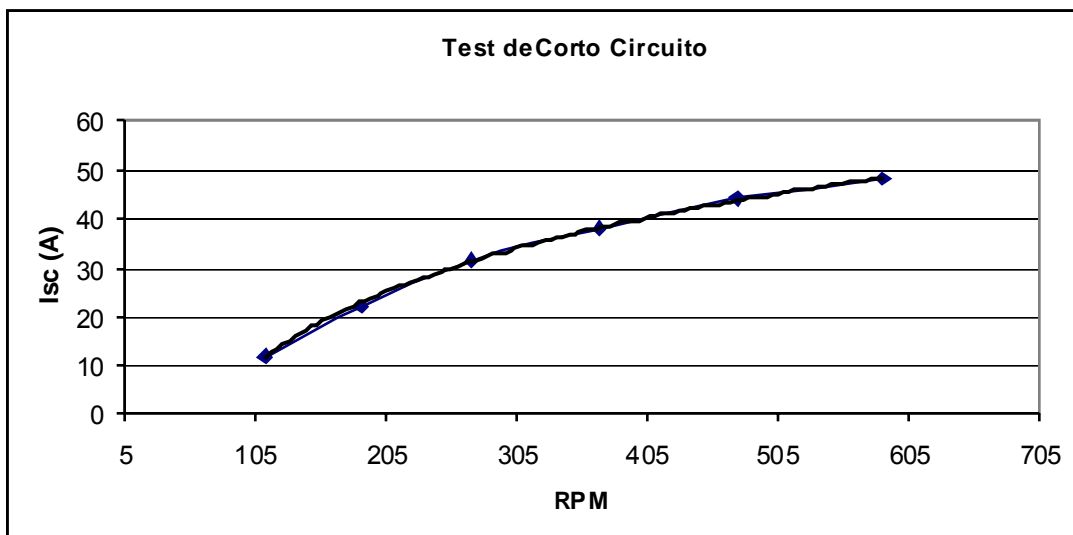


Gráfico 51. Test de corto circuito para Whisper

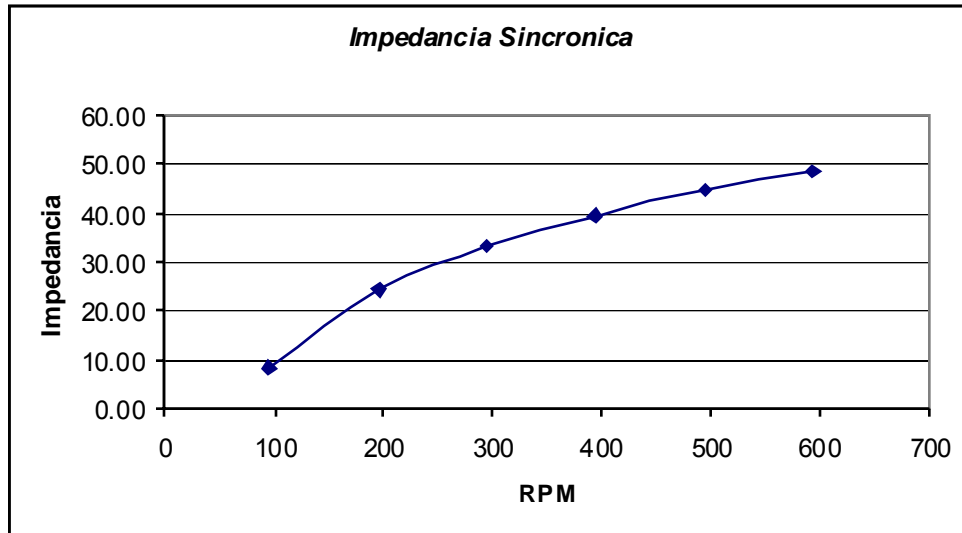


Gráfico 52. Impedancia síncrona para Whisper.

Resistencia DC por fase: 0.5 ohms

Experimentos sobre los generadores construidos en [9] no se realizaron ya que en esta tesis se encuentran detallados los resultados obtenidos.

Sin embargo y los experimentos sirven para comprobar que ningún modelo puede predecir de manera acertada el valor de la inductancia síncrona.

Se nota claramente en estos tres experimentos que el valor de la inductancia varía en función de la velocidad de operación del generador, y en el modelo presentado por [2] esta dependencia no está presente.

Mediante la solución del circuito equivalente bien sea por métodos tradicionales o por métodos modernos se puede construir la característica externa del generador (ver capítulo 4.2.3)

## 8 APLICACIÓN DEL ESTUDIO A LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Es en este capítulo donde se da solución al problema planteado en la tesis.

Suponga que un diseñador de sistemas de generación eólica desea resolver el problema de impulsar un motor eléctrico mediante un pequeño molino impulsado con energía eólica.

El problema podría ser separado en problemas más pequeños a resolver:

1. Encontrar las condiciones de potencia requeridas por la carga que debe impulsar el motor. (Torque requerido y a que velocidad angular).
2. Dimensionar el motor adecuado para la aplicación requerida.
3. Diseñar o escoger el generador eléctrico que mejor se ajusta a las condiciones impuestas en el punto anterior.

4. Diseñar el rotor del sistema eólico que cumpla con las condiciones impuestas arriba. (Este paso incluye simulación de viento, etc)

Para poder solucionar de manera correcta los pasos 2 y 3 es necesario hacer uso de las graficas presentadas previamente. ¿Como?

Suponga primero que dispongo de varios generadores eléctricos con diferentes características propias eléctricas y mecanicas pero con la misma potencia nominal de donde escoger.

Suponga ahora que la carga deseo impulsar solicita un torque de 5 N\*m a entre 200 y 400 RPM, un torque de 7 N\*m entre 400 y 500 RPM y así sucesivamente. Estos valores son definidos en el paso de diseño #1.

Para escoger, o para diseñar el mejor generador que cumpla esta labor, o por lo menos para saber si el generador con el cual se cuenta será capaz de impulsar el motor, se siguen los siguientes pasos:

1. Buscar el gráfico de la frecuencia de excitación que me ubica aproximadamente el rango de velocidad de trabajo deseada.
2. En la gráfica de torque Vs deslizamiento busco el valor de  $V/v_{nom}$  sobre un deslizamiento del 15 al 20% que me genera el torque deseado.
3. Miro en la gráfica de  $I/nom$  para esas condiciones de voltaje y deslizamiento que corriente me pedirá el motor.
4. Busco cual será el factor de potencia del conjunto.
5. En la gráfica de la característica externa del generador miro si este es capaz de suplir las condiciones impuestas por el motor.
6. Itero este el proceso las veces necesarias.

En este proceso se generan las respuestas a las siguientes preguntas.

- ¿Qué voltaje mínimo de alimentación es necesario para obtener el torque requerido?
- ¿A que frecuencia de alimentación sucede esto?
- ¿Bajo esas condiciones de voltaje, cual es la corriente y el factor de potencia del motor?
- ¿Podrá el generador suplir esa potencia bajo las condiciones impuestas por el motor?

Todas las respuestas a estas preguntas se conocen ya que se poseen modelos para el generador y para conocer cual será su comportamiento en relación con el comportamiento eléctrico del motor.

El proceso de diseño pues esta completo, y si se realizó de la manera adecuada asegura para ciertos puntos de operación la eficiencia del conjunto.

## 9 CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

El objetivo de la tesis era el de encontrar las condiciones para que un generador síncrono de imanes permanentes pudiera alimentar de manera óptima un motor eléctrico de inducción trifásico.

Para ellos se realizaron pruebas sobre un motor de inducción estándar de 1.0 HP de tal manera que a partir de estos datos experimentales surgiera que tipo de fuente de alimentación era la necesaria para impulsar el motor.

Seguidamente se construyo y adaptó un modelo teórico para el diseño de generadores síncronos de imanes permanentes.

Posteriormente y con estas dos herramientas en la mano se propone una metodología de diseño que permite encontrar respuestas a las preguntas más importantes al iniciar un proyecto de este tipo:

¿El generador con el cual se dispone podrá impulsar el motor con el que cuento?

¿Podría yo diseñar un generador de tal manera que este alimente de manera óptima el motor que debo utilizar?

De acuerdo con los resultados obtenidos tanto experimentalmente como teóricamente el conjunto generador – motor debe cumplir con las siguientes características.

El diseño o la selección de un generador de imanes permanentes que impulsará un motor eléctrico debe asegurar que el voltaje de circuito abierto del generador, es decir voltaje sin carga, cuando la velocidad de giro del molino es la velocidad nominal de diseño, debe ser del orden de 2 a 2.5 veces el voltaje nominal de operación del motor.

Este factor de numérico cuenta por el hecho que al conectar carga al generador, el voltaje terminal del mismo se ve disminuido. Y se desea entonces que para las condiciones nominales de viento de operación el voltaje terminal del generador sea similar al nominal del motor.

Este voltaje de alimentación y en la medida de los posible debe ser mantenido por encima de los  $0.6 V/V_{nom}$ .

Es decir la velocidad mínima en la cual operara el generador debe proveer este valor mínimo de voltaje para asegurar un buen comportamiento del motor.

Si esto no es posible debido a la imposibilidad de cuadrar esto en el diseño del rotor eólico, el valor mínimo de alimentación es  $0.4 V/V_{nom}$ .

Esto se logra en el diseño del generador haciendo que cada bobina individual tenga tantas vueltas como sea posible teniendo en cuenta la limitación impuesta por la corriente máxima que soporta el bobinado y por las limitaciones físicas de construcción del mismo.

Sin embargo al aumentar el número de vueltas que posee cada bobina se traduce en el aumento de la resistencia por fase lo cual generará más perdidas eléctricas ohmicas.

Aumentar el número de vueltas por bobina también aumenta el valor de la inductancia síncrona lo cual genera una mayor caída de voltaje terminal cuando se conecta carga al generador.

Lograr un compromiso entre estos dos parámetros es labor del diseñador del sistema eólico.

El bobinado interno (los grupos de fase) deben estar conectados puramente en serie (es decir sin caminos paralelos), esto con el objetivo de tener un único camino para la corriente generada por fase y de esta manera obtener el voltaje más alto posible.

Las tres fases internas deben ser conectadas en Y, esto por seguridad de operación y por que si fuesen conectadas en delta el voltaje línea - línea sería menor.

Un diseño un poco más complejo indicaría tener en el generador dos bobinados independientes, uno de muy alto voltaje (400V) necesario para condiciones de bajo viento y otro de menor voltaje (250V) usado en condiciones de viento más favorables.

Este tipo de montajes con dos bobinados independientes daría solución también al problema del arranque del motor. En el momento del arranque se conecta la bobina diseñada para este propósito y después que el motor este corriendo por medio de un control electrónico o por medio de sw itches se podría desconectar este bobinado y hacer funcionar el secundario (más eficiente)

El problema con este tipo de soluciones es que el tamaño del generador se aumenta. Esto a veces es un problema y a veces no lo es tanto. Depende de las necesidades específicas de cada diseño y debe ser avaluado con más detalle en futuras investigaciones.

Como el torque de salida es menor a mayores frecuencias de operación para el mismo valor de voltaje de alimentación, es necesario en la medida de lo posible que el generador a diseñar o a comprar sea de pocos polos. Esto reduce la frecuencia de la onda de salida generada.

Como el generador que se propone es de pocos polos y suponiendo que el volumen del imán se mantenga constante, los imanes tendrían una relación de aspecto grande, por lo tanto estos tenderán ser alargados, mas bien flacos y bastante curvados para adaptarse al rotor.

De acuerdo con esto el diámetro del rotor debe ser pequeño, ya que conseguir comercialmente imanes con estas características es una labor menos fácil.

De acuerdo con la corriente esperada que exige el motor se propone un calibre de alambre entre 18 y 16 con un esmaltado que proporcione una protección térmica equivalente a la grado F.

Al ser usado un motor a una velocidad menor a la velocidad de diseño el sistema de refrigeración que es por convección forzada se ve afectado siendo menor su capacidad de remoción de calor. Por lo tanto la temperatura del motor se eleva más allá de la temperatura de servicio. Esto se traduce en un daño al bobinado lo cual afecta la vida útil del mismo. Por lo tanto al usar un motor bajo estas condiciones es necesario añadir un sistema que remueva el calor extra que no esta siendo removido.

Esto se podría hacer mediante el rediseño del ventilador del motor y cambiarlo por un más grande o aumentando el tamaño de las aletas disipadoras de calor que rodean la carcasa del motor.

Como el factor de potencia es casi constante no importando la condición de voltaje y frecuencia de alimentación, y solo siendo este dependiente de la carga impuesta al motor (deslizamiento), entonces, al corregir el factor de potencia mediante el uso de condensadores para una única condición de carga, se soluciona el problema para el resto de rango de operación.

Con los datos obtenidos en el proceso de experimentación, usando el modelo matemático propuesto, y con la ayuda de programas de interpolación como Matlab o Matemática, es posible generar modelos computacionales de simulación. Estos modelos iterarían sobre tablas a partir de condiciones simuladas de viento y servirían para encontrar el comportamiento aproximado del generador y del motor y por o tanto capaces de anticipar el comportamiento del conjunto bajo condiciones de viento simulado reales.

Para seguir validando las interesantes conclusiones a las que se llegaron con los experimentos realizados sobre un motor eléctrico, y con el objetivo de tener datos que abarquen un rango más amplio se recomienda realizar nuevas pruebas sobre motores en rangos de operación más amplios; Esto exige la construcción de un banco de pruebas nuevo en donde el sistema de freno no sea por medio de un motor eléctrico enfrentado si no por medios mecánicos como frenos de disco o frenos hidráulicos. Además donde el voltaje de entrada al motor se pueda subir sin limitaciones como lo sucedía con el variador de frecuencia utilizado.

## 10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] **GURÜ, S** Bhag & **HIZIROGLÜ R**. “Electric Machinery and transformers”. Tercera Edición, 2001, Oxford University Press.
- [2] **GRAUERS**, Anders. “Design of Direct-driven Permanent-magnet Generators for Wind Turbines”, Chalmers University of Technology, Göteborg Suecia, 1996.
- [3] **LAMPOLA**, Petri. “Directly Driven, Low-Speed Permanent-Magnet Generators for Wind Power Applications”, Helsinki University of Technology Laboratory of Electromechanics, Finland. 2000.
- [4] **DUBOIS**, Máxime. “ Review of Electromechanical Conversion in Wind Turbines”, TUDelft Faculty ITS Group Electrical Power Processing Nederland, 2000.
- [5] **BEATY**, W & **Kirtley J**. “Manual del motor eléctrico”, McGraw Hill 2000
- [6] **SIMOES**, G & **FARRET**, F. “Renew able Energy Systems”, CRCPress, 2004.
- [7] **WILKINSON**, K. “Rewinding Small Motors”, Newnes-Butterworths.
- [8] **OROZCO RAMÍREZ**, Rodrigo Enrique “Caracterización y optimización de un generador eléctrico de imanes permanentes y flujo radial para un sistema eólico de pequeña generación”, Universidad de los Andes, Bogotá D.C. 2002.
- [9] **SANTOS JAIMES**, Alfonso. “Adaptación de un generador eléctrico de imanes permanentes y flujo radial”, Universidad de los Andes, Bogotá D.C. 2004

[10] **OSORIO CORRALES**, Emmanuel N. “Análisis de acople de un rotor eólico a un generador de imanes permanentes para un prototipo preindustrial de aerogenerador de 300w” Universidad de los Andes, Bogotá D.C. 2004

[11] **MANRIQUE ALJURE**, José David “Diseño de generadores de imanes permanentes para turbinas eólicas a pequeña escala” , Universidad de los Andes, Bogotá D.C. 1999.

[12] **PIGGOT**, Hugh. “Brakedrum Windmill plans”, 2000 year edition, Copyright 1993, 1999 Scotland, UK.

[13] Catálogos obtenidos de <http://magnetsource.com>

[14] **General Electric CO**, “AC Motor selection and application Guide”. Año desconocido.