



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

" E SCIENTIA HOMINIS SALUS "

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE POTENCIA DE UN GENERADOR SINCRÓNICO

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

SCHUBERTH JOSÉ VILLACRESES CORAL
Villacoral2007@hotmail.com

DIRECTOR: DR. JESÚS JÁTIVA
jjativa@yahoo.com

Quito, abril 2012

DECLARACIÓN

Yo, Schuberth José Villacreses Coral, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la ley de Propiedad intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Schuberth José Villacreses Coral

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Schuberth José Villacreses Coral, bajo mi supervisión.

Jesús Játiva, Ph.D.
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por bendecirme con una familia que me apoyo en el largo camino de mi formación en la carrera de ingeniería eléctrica, de forma especial a mis padres, hermanos y maestros que han contribuido para que hoy termine esta fase de mi vida.

Agradezco de forma especial al Doctor Jesús Játiva, Director de proyecto, por brindarme su apoyo y enrumbar mis esfuerzos para elaborar este trabajo de la mejor forma.

Agradezco además a mis amigos y compañeros de aula que me han acompañado en este proceso de formación y ha sido colaboradores incondicionales en las aulas.

DEDICATORIA

El presente trabajo va dirigido con una expresión de gratitud para mis padres y hermanos, quienes me han ayudado a superarme en mis estudios superiores.

Schuberth

CONTENIDO

| | |
|------------------------|------|
| DECLARACIÓN..... | II |
| CERTIFICADO..... | III |
| AGRADECIMIENTO..... | IV |
| DEDICATORIA..... | V |
| CONTENIDO..... | VI |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | IX |
| RESUMEN..... | XII |
| PRESENTACIÓN..... | XIII |

Capítulo I

| | |
|--|----|
| 1. Introducción..... | 1 |
| 1.1 Objetivos..... | 1 |
| 1.1.1 Objetivo General..... | 1 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos..... | 1 |
| 1.2 Alcance..... | 3 |
| 1.3 Justificación del proyecto..... | 4 |
| 1.4 La máquina sincrónica..... | 5 |
| 1.4.1 Descripción de la máquina sincrónica..... | 5 |
| 1.4.2 Onda de flujo y F.m.m. en el generador sincrónico..... | 6 |
| 1.4.2.1 Efecto de los polos salientes; Introducción a la teoría de eje en Cuadratura y directo..... | 9 |
| 1.4.3 Representación fasorial equivalente de la máquina sincrónica de polos salientes..... | 13 |
| 1.4.4 Característica en circuito abierto y en corto circuito..... | 16 |
| 1.4.4.1 Prueba de circuito abierto..... | 16 |
| 1.4.4.2 Prueba de corto circuito..... | 16 |
| 1.4.4.3 Determinación de la reactancia sincrónica de eje directo..... | 17 |
| 1.4.5 Prueba de deslizamiento..... | 20 |
| 1.4.5.1 Determinación de la reactancia sincrónica de eje en cuadratura... | 21 |

Capítulo II

| | |
|---|----|
| 2. Estabilidad del Ángulo del Rotor..... | 22 |
| 2.1 Relación Potencia-Ángulo..... | 23 |
| 2.2 Dinámica del rotor y Ecuación de Oscilación..... | 26 |
| 2.3 Estabilidad de Estado Estable-Pequeña Perturbación..... | 28 |
| 2.4 Estabilidad Transitoria..... | 36 |
| 2.4.1 Criterio de Áreas iguales..... | 37 |
| 2.4.1.1 Respuesta ante una falla..... | 39 |
| 2.4.2 Solución numérica de la Ecuación de Oscilación..... | 40 |
| 2.4.2.1 Método paso a paso..... | 41 |
| 2.4.2.2 Método de Euler o de las tangentes..... | 43 |
| 2.4.2.3 Método Runge-Kutta de cuarto orden..... | 44 |
| 2.5 Determinación de la constante de inercia H y el coeficiente de amortiguamiento D..... | 47 |
| 2.5.1 Prueba de rechazo de carga..... | 47 |
| 2.5.2 Constante de inercia H..... | 47 |
| 2.5.3 Pérdida de fuerza motriz en vacío..... | 48 |

Capítulo III

| | |
|--|----|
| 3. Medición del Ángulo de Potencia..... | 51 |
| 3.1 Metodología aplicada..... | 52 |
| 3.2 Diseño de un prototipo medidor del ángulo de potencia..... | 56 |
| 3.2.1 Detector de posición del rotor..... | 57 |
| 3.2.2 Detector de cruce por cero ascendente..... | 59 |
| 3.2.3 Tarjeta de adquisición de datos multifunción NI myDAQ..... | 60 |
| 3.2.3.1 Entradas analógicas (AI)..... | 61 |
| 3.2.3.2 Salidas analógicas (AO)..... | 61 |
| 3.2.3.3 Entradas y Salidas digitales (DIO)..... | 62 |
| 3.2.3.4 Fuentes de poder..... | 62 |
| 3.2.3.5 Multímetro digital (DMM)..... | 62 |
| 3.3 Programa computacional LabVIEW..... | 63 |
| 3.3.1.1 Flujos de datos y lenguaje de programación gráfico..... | 64 |
| 3.3.1.1.1 El panel frontal..... | 65 |

| | |
|---|----|
| 3.3.1.1.2 El diagrama de bloques (funciones)..... | 65 |
| 3.3.2 Aplicación desarrollada en LabVIEW..... | 66 |
| 3.3.2.1 Funcionamientos de la aplicación VI..... | 67 |
| 3.3.2.2 Controles e indicadores utilizados en la aplicación VI..... | 68 |
| 3.3.2.3 Funciones de LabVIEW utilizadas en la aplicación VI..... | 69 |

Capítulo IV

| | |
|---|----|
| 4. Análisis de Resultados..... | 72 |
| 4.1 Pruebas de estado estable en vacío y con carga..... | 78 |
| 4.1.1 Estado estable en vacío..... | 80 |
| 4.1.2 Estado estable con carga..... | 80 |
| 4.2 Aumento de carga hacia la barra infinita..... | 86 |
| 4.3 Disminución de carga hacia la barra infinita | 91 |
| 4.4 Variación de la corriente de campo..... | 94 |

Capítulo V

| | |
|--------------------------|-----|
| 5.1 Conclusiones..... | 97 |
| 5.2 Recomendaciones..... | 98 |
| Bibliografía..... | 100 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Tipos constructivos de máquinas síncronas..... | 6 |
| Figura 1.2 Campos magnéticos en el entrehierro de un generador síncrono.... | 7 |
| Figura 1.3 Representación vectorial de los campos en un generador..... | 8 |
| Figura 1.4 Generador de polos salientes, eje directo y de cuadratura..... | 9 |
| Figura 1.5 Flujos directos en el entrehierro de una máquina síncrona de polos Salientes..... | 10 |
| Figura 1.6 Flujos en cuadratura en el entrehierro de una máquina síncrona de polos salientes..... | 11 |
| Figura 1.7 Diagrama fasorial de un generador de polos salientes..... | 12 |
| Figura 1.8 Diagrama fasorial componentes de flujo y componentes de voltaje... | 13 |
| Figura 1.9 Diagrama fasorial de un generador síncrono de polos salientes.... | 14 |
| Figura 1.10 Relaciones entre las componentes de voltaje en el diagrama fasorial de un generador de polos salientes..... | 15 |
| Figura 1.11 Prueba de circuito abierto y característica de circuito abierto..... | 16 |
| Figura 1.12 Prueba de cortocircuito y característica de cortocircuito..... | 17 |
| Figura 1.13 Característica de circuito abierto y cortocircuito, para caculo de reactancia síncrona no saturada..... | 18 |
| Figura 1.14 Característica de circuito abierto y cortocircuito, para calculo de reactancia síncrona saturada..... | 19 |
| Figura 1.15 Prueba de deslizamiento, método para obtener x_q | 20 |
| Figura 1.16 Circuito para prueba de deslizamiento..... | 21 |
| Figura 2.1 Sistema generador barra infinita con sistema de transmisión..... | 23 |
| Figura 2.2 Diagrama fasorial sistema generador barra infinita..... | 24 |
| Figura 2.3 Grafica P vs δ | 25 |
| Figura 2.4 Sistema generador-barra infinita..... | 29 |
| Figura 2.5 (a) Criterio de aéreas iguales para incremento de potencia mecánica (b) Sistema generador barra infinita..... | 39 |
| Figura 2.6 Sistema doble circuito..... | 40 |
| Figura 2.7 Severidad de falla según el tipo..... | 40 |
| Figura 2.8 Método paso a paso..... | 41 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.9 Aproximación de Euler para la curva de oscilación ángulo δ | 44 |
| Figura 2.10 Método de Runge-Kutta para la curva de oscilación ángulo δ | 45 |
| Figura 2.11 Velocidad angular del rotor ante la pérdida de fuerza motriz | 49 |
| Figura 3.1 Ángulo de potencia..... | 51 |
| Figura 3.2 Formas de onda asociadas con la posición de rotor y el detector de cruce por cero ascendente..... | 54 |
| Figura 3.3 Explicación grafica de metodología aplicada (a) Funcionamiento en vacío (b) funcionamiento bajo carga..... | 54 |
| Figura 3.4 Diagrama de bloques de prototipo medidor ángulo de potencia. | 56 |
| Figura 3.5 Detector posición del rotor..... | 57 |
| Figura 3.6 Esquemático del circuito detector de posición del rotor..... | 58 |
| Figura 3.7 Señal proveniente del circuito detector de posición de rotor..... | 58 |
| Figura 3.8 Esquemático del circuito detector de cruce por cero ascendente..... | 59 |
| Figura 3.9 Señal obtenida del circuito detector de cruce por cero ascendente.... | 59 |
| Figura 3.10 NI myDAQ..... | 61 |
| Figura 3.11 NI myDAQ Diagrama de conexión y equipo..... | 63 |
| Figura 3.12 Panel frontal de LabVIEW y paleta de controles..... | 65 |
| Figura 3.13 Diagrama de bloques y paleta de funciones de programación gráfica..... | 66 |
| Figura 3.14 Diagrama de flujo aplicación desarrollada en LabVIEW para la medición de ángulo de potencia..... | 67 |
| Figura 3.15 Panel frontal “Medición de ángulo de potencia de un generador sincrónico”..... | 68 |
| Figura 3.16 Diagrama de bloque Programa “Medición de ángulo de potencia de un generador sincrónico”..... | 69 |
| Figura 4.1 Característica de circuito abierto generador mesa N° 4..... | 75 |
| Figura 4.2 Característica de corto circuito generador mesa N° 4..... | 75 |
| Figura 4.3 Variación de la frecuencia ante la pérdida de carga..... | 77 |
| Figura 4.4 Esquema del sistema físico utilizado en la medición del ángulo de Potencia para estado estable en vacío y con carga..... | 78 |
| Figura 4.5 Grupo Motor-Generador de la Mesa 4 del Laboratorio de Maquinas Eléctricas de la..... | 79 |
| Figura 4.6 Implementación del circuito medidor de ángulo de potencia..... | 79 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 4.7 | Comportamiento del ángulo de potencia en estado estable en vacío.. | 80 |
| Figura 4.8 | Comportamiento del ángulo de potencia en estado estable con carga para el primer paso de carga..... | 81 |
| Figura 4.9 | Curvas Potencia vs Ángulo en estado estable con carga..... | 84 |
| Figura 4.10 | Ángulo en estado estable en el plano P-Q..... | 85 |
| Figura 4.11 | Esquema del sistema físico utilizado en la medición del ángulo de potencia para aumento y disminución de carga hacia la barra infinita. | 86 |
| Figura 4.12 | Ángulo de potencia frente al aumento de carga..... | 88 |
| Figura 4.13 | Comportamiento del ángulo de potencia para el segundo aumento de carga..... | 89 |
| Figura 4.14 | Simulación del segundo aumento de carga..... | 90 |
| Figura 4.15 | Ángulo de potencia frente a la disminución de carga..... | 92 |
| Figura 4.16 | Comportamiento del ángulo de potencia para la primera disminución de carga..... | 93 |
| Figura 4.17 | Simulación de a primera disminución de carga..... | 94 |
| Figura 4.18 | Ángulo de potencia en el plano P-Q, para variación de campo. | 96 |

RESUMEN

La cuantificación del ángulo de potencia constituye un tema fundamental en el estudio de sistemas eléctricos de potencia, ya sea para conocer el estado del generador en el sistema o para estudios de estabilidad de ángulo de rotor. Es necesario cuantificar e inclusive simular el comportamiento de dicho ángulo mediante la resolución numérica de las ecuaciones que describen la dinámica del ángulo del rotor y la relación potencia ángulo.

La definición del ángulo de potencia, así como las relaciones entre la velocidad mecánica de giro y la frecuencia de la señal de voltaje terminal permiten la aplicación de una metodología de medición que en la práctica se la realiza mediante la determinación del ajuste de la posición del rotor hacia una nueva, siguiendo el cambio de carga.

De esta manera en este proyecto de titulación se realiza la medición del ángulo de potencia de un generador sincrónico del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la FIEE. Esta medición se hace a través de la comparación de las señales correspondientes al voltaje terminal del generador y la posición del rotor.

La medición debe tomar en cuenta la variación del ángulo de acuerdo a la condición de operación en vacío y con carga del generador. La medición del ángulo de potencia es presentada en una grafica mediante una aplicación desarrollada en LabVIEW.

PRESENTACIÓN

Este documento presenta la medición del ángulo de potencia de un generador sincrónico del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la FIEE. Para alcanzar dicho objetivo el proyecto de titulación es desarrollado en cinco capítulos descritos a continuación.

El Capítulo I es la introducción, abarca los objetivos generales, específicos, el alcance, justificación del presente proyecto, también una breve descripción de la máquina sincrónica.

En el Capítulo II se realiza un resumen teórico acerca de la Estabilidad de ángulo de rotor, los diferentes factores que envuelven la estabilidad transitoria y de pequeña señal, como son la ecuación de movimiento y la relación potencia ángulo. Además se realiza una revisión acerca de las herramientas numéricas empleadas para los estudios de estabilidad de ángulo de rotor como son el análisis modal en el caso de estabilidad de pequeña señal y los métodos de resolución numérica para ecuaciones diferenciales ordinarias en el caso de estabilidad transitoria.

En el Capítulo III se desarrolla la medición del ángulo de potencia, planteando la metodología aplicada, la descripción de los circuitos y elementos utilizados en la medición, así como la descripción de la aplicación desarrollada en LabVIEW para despliegue y medición del ángulo de potencia del generador.

En el Capítulo IV se muestra los resultados obtenidos en las pruebas realizadas al generador ante las condiciones operativas de estado estable en vacío y con carga, aumento, disminución de carga, para finalmente presentar la variación de la corriente de campo.

El Capítulo V contiene las conclusiones y recomendaciones de este proyecto.

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de dispositivos de adquisición de datos y software dedicados han facilitado la implementación de sistemas de monitoreo y medición de las variables del sistema eléctrico de potencia como: voltaje, corriente, potencia y velocidad de giro de las máquinas, entre otras.

Es así que el ángulo de potencia definido como la separación angular entre el voltaje interno y el voltaje terminal de un generador, constituye una variable a monitorear. El ángulo de potencia provee información acerca del punto de operación del generador en relación a su límite de operación, su estabilidad en estado estable y dinámico. La medición del ángulo de potencia en el presente proyecto se plantea mediante la determinación del desfase temporal existente entre una fase del voltaje terminal y la posición del rotor.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

Este trabajo tiene por objetivo general el medir y visualizar el comportamiento del ángulo de potencia de un generador sincrónico frente a diferentes escenarios de operación, a través de la comparación de las señales correspondientes al voltaje terminal de la máquina y a la posición relativa del rotor.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar los conocimientos adquiridos en la Carrera de Ingeniería Eléctrica para el diseño e implementación de circuitos, tales como son: un sensor de posición del eje del generador y un detector del cruce por cero ascendente para la señal de voltaje terminal del generador.
- Utilizar el paquete computacional LabVIEW para desarrollar la medición y tratamiento de las señales adquiridas por la tarjeta.
- Utilizar una herramienta que permita cuantificar el desfase entre las dos señales de rotor y estator para determinar el ángulo de potencia.

- Desarrollar una aplicación en LabVIEW para despliegue y medición del ángulo de potencia del generador.

1.2 ALCANCE

Se mide y visualiza el ángulo de potencia de un generador sincrónico del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la FIEE con el fin de analizar su comportamiento ante las siguientes condiciones operativas: estado estable en vacío y con carga, aumento y disminución de carga y finalmente la variación de la corriente de campo.

La medición del ángulo de potencia se realiza mediante la determinación del desfase de tiempo existente entre la subida de la señal de voltaje terminal de una fase del generador y la posición de un punto específico del eje del rotor de la máquina.

La detección del punto del eje de la máquina se realiza mediante un sensor óptico el cual genera un pulso positivo en cada giro completo del rotor, así mismo la detección del cruce por cero ascendentes de la señal de voltaje terminal se realiza a través de un circuito detector de cruce por cero ascendente.

Las señales procedentes de los circuitos mencionados son muestreadas para su ingreso al computador por medio de una tarjeta de adquisición de datos. Por medio de una aplicación de software implementado en LabVIEW se calcula el desfase y mediante un algoritmo se determina el ángulo de potencia para cada condición de carga del generador.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

- El estudio de estabilidad de un sistema eléctrico de potencia se compone de un gran número de variables, de las cuales se tiene el ángulo de potencia como la más relevante. La cuantificación del ángulo de potencia permite conocer la situación de un generador frente a otros y de esta manera su nivel de estabilidad en estado estable y su evolución cuando se produzcan perturbaciones en el sistema eléctrico.
- El desarrollo de metodologías para el monitoreo y análisis del comportamiento del ángulo es uno de los campos de investigación en el área de sistemas eléctricos de potencia. Hasta hace varios años se disponía únicamente de métodos computacionales, basados en la resolución de ecuaciones diferenciales por métodos numéricos, sin embargo, gracias al desarrollo de equipos de adquisición de datos y de paquetes computacionales especializados se puede visualizar en tiempo real el comportamiento de variables, en particular del ángulo de potencia de las máquinas sincrónicas.
- La estabilidad transitoria de un SEP se evalúa a través del comportamiento del ángulo de potencia de los generadores sincrónicos. Una vez que se pueda medir el ángulo del rotor de un generador, se podrá extender el análisis hacia un sistema multimáquina y de esta forma apreciar físicamente la separación angular de varios generadores en un sistema eléctrico de potencia.

1.4 LA MÁQUINA SINCRÓNICA [8][9]

La máquina síncrona es un dispositivo de conversión de energía basado en la Ley de Faraday de inducción electromagnética. El término síncrono se refiere al hecho que la velocidad de operación de este tipo de máquinas es proporcional a la frecuencia de las señales voltaje y corriente presentes en los devanados de armadura bajo condiciones de operación estable. Las máquinas síncronas son igualmente capaces de operar como generador para lo cual debe ser impulsada por una turbina para convertir energía mecánica en energía eléctrica; y, trabajar como motor convirtiendo energía eléctrica en energía mecánica.

1.4.1 DESCRIPCIÓN DE LA MÁQUINA SINCRÓNICA

La máquina síncrona está compuesta por dos estructuras ferromagnéticas con sus respectivos devanados. Durante el funcionamiento de la máquina ya sea como motor o generador estas dos estructuras se encuentran en rotación relativa una respecto de la otra.

La estructura fija llamada estator o armadura constituye un cilindro hueco con ranuras que albergan los devanados trifásicos y uniformemente distribuidos en la periferia interior, por los que circula corriente alterna ya sea de carga (funcionamiento como generador) o de alimentación (funcionamiento como motor).

La estructura móvil rotatoria denominada rotor se encuentra montada sobre el eje de la máquina girando en el interior del cilindro. El devanado dentro del rotor se llama devanado de campo y es alimentado por corriente continua y es fabricado en dos formas distintas, ya sea en forma de polos salientes o en forma de polos lisos o rotor cilíndrico, ver Figura 1.1. En el primer caso, los devanados de los polos son concentrados, mientras que para el rotor cilíndrico el devanado está distribuido en ranuras, cubriendo una parte de la circunferencia del rotor.

La corriente de campo es suministrada por una excitatriz que puede ser un generador de corriente continua, generador de corriente alterna o directamente desde los terminales del generador, más un rectificador AC/DC.

El campo magnético producido por la circulación de corriente continua en el devanado de campo sumado al giro del rotor produce un campo giratorio que enlaza a las bobinas del estator induciendo voltajes en la medida que gira.

Si la máquina funciona como generador el movimiento del rotor es producido por una turbina de vapor o hidráulica acoplada al eje.

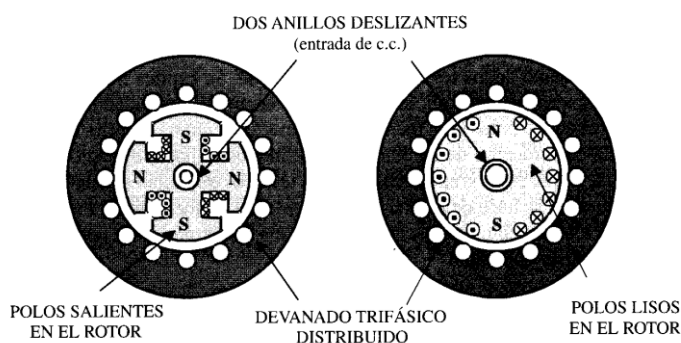


Figura 1.1 Tipos constructivos de máquinas síncronas [9]

Cuando el generador abastece una carga se produce un par electromagnético generado por la circulación de las corrientes en los devanados de armadura, este par electromagnético es contrario a la dirección de rotación de la fuente de energía mecánica; en tanto que, en un motor el par electromagnético desarrollado impulsa a la carga acoplada al eje.

1.4.2 ONDA DE FLUJO Y F.M.M. EN EL GENERADOR SINCRÓNICO [8]

El campo magnético en el entrehierro de una máquina eléctrica es el resultado de la combinación de las fuerzas magneto motrices f.m.m. producidas por los devanados de inductor e inducido que actúan en esa región.

En principio el devanado de campo produce la densidad de flujo en el entrehierro, induciendo una fuerza electro motriz f.e.m. en los devanados del estator, al cerrar el circuito a los terminales del generador se producirá la circulación de corrientes en dicho devanado, creando una f.m.m. de reacción que al combinarse con la f.m.m. de campo origina una densidad de flujo resultante en el entrehierro del generador.

En la figura 1.2 se presenta lo expuesto en el párrafo anterior. Se desarrolla de manera parcial los devanados de inducido e inductor de un generador síncrono,

el devanado de inducido es trifásico, la gráfica solamente muestra el devanado de la fase a para efecto de análisis.

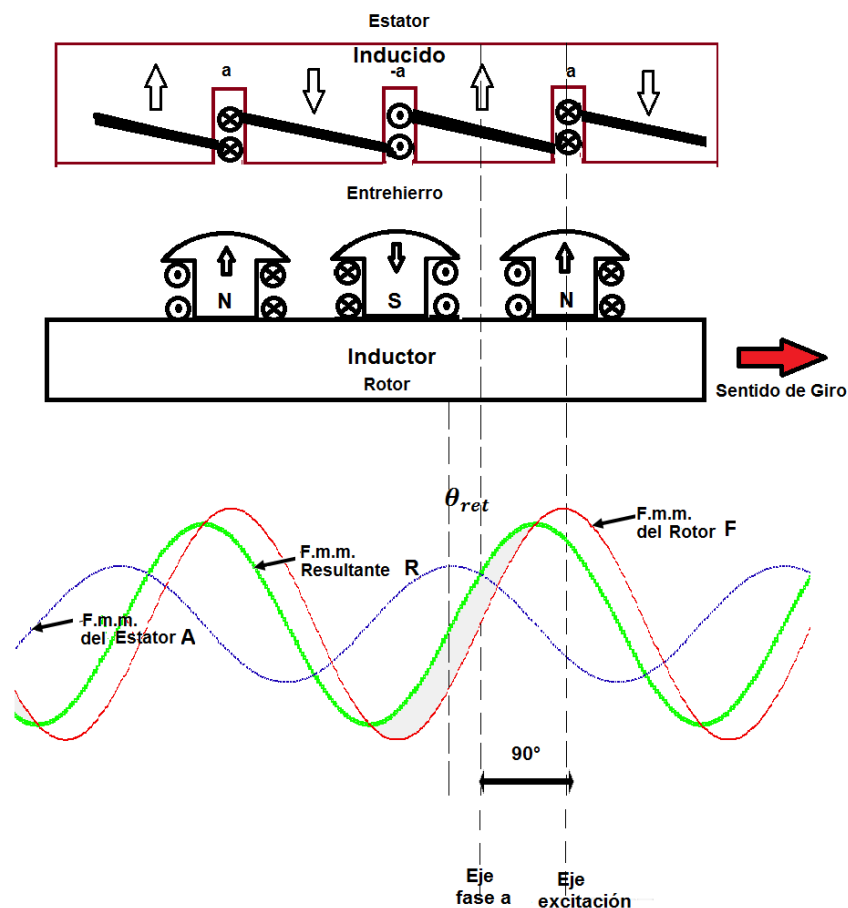


Figura 1.2 Campos magnéticos en el entrehierro de un generador síncrono [8]

La f.m.m. fundamental creada por el devanado del rotor, está representada por la sinusoide en color rojo, estando su eje adelantado 90° respecto al eje de la fase a . La corriente trifásica equilibrada circulante en el devanado de armadura crea una onda de f.m.m. cuya componente fundamental gira en el espacio a la velocidad de sincronismo, en color azul. Esta onda es llamada reacción de armadura, debe observarse que para este análisis se asumió el caso de que la corriente está desfasada en θ_{ret} respecto al voltaje inducido por el campo, por eso se observa que la f.m.m. de reacción de armadura está retrasada $90^\circ + \theta_{ret}$ respecto a la f.m.m. del rotor. Si no hay saturación, la onda de densidad de flujo de reacción B_{ar} es proporcional a la fuerza magnetomotriz de reacción A , de igual manera la densidad de flujo del rotor B_{af} es proporcional a la f.m.m. de rotor F .

La f.m.m. resultante R y su densidad de flujo resultante B_r en la máquina resulta ser la suma de las dos componentes creadas respectivamente por la corriente de campo y por la reacción del inducido, en color verde.

Puesto que las ondas de rotor y de reacción son de carácter sinusoidal pueden representarse fasorialmente, la figura 1.3 muestra el resultado de la suma de las dos ondas que actúan en el entrehierro, y esto es presentado con el diagrama fasorial en el cual se han señalado los flujos fundamentales Φ_{ar} , Φ_{af} , Φ_r producidos por sus respectivas f.m.m. A , F , R , y que son proporcionales a ellas si el entrehierro es uniforme y no existe saturación.

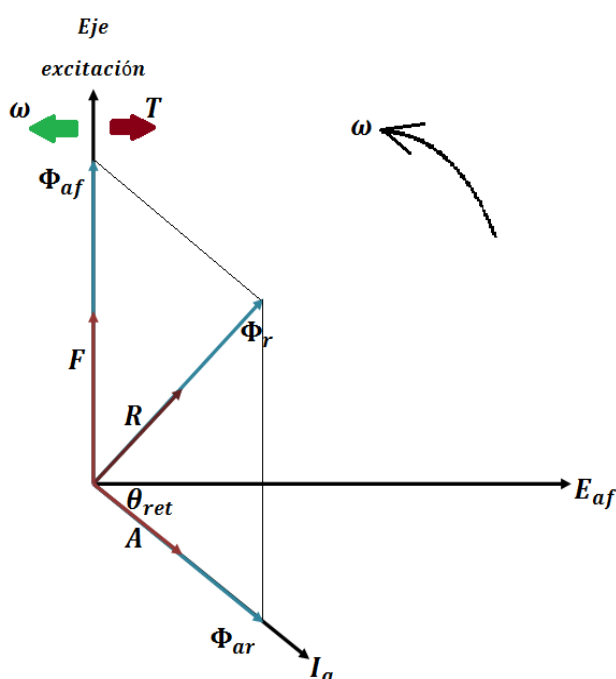


Figura 1.3 Representación vectorial de los campos en un generador

El par electromagnético actúa sobre el rotor en el sentido que tiende a alinear sus polos con el flujo resultante en el entrehierro, como se señala con la flecha T , figura 1.3, donde se puede concluir que los polos del campo son arrastrados por delante de la onda de flujo resultante en el entrehierro en virtud del par mecánico suministrado por el motor primario. El par electromagnético actúa sobre el rotor en sentido opuesto al del movimiento, es decir la máquina trabaja como generador. Es así que el par puede expresarse en función del flujo resultante por

polo en el entrehierro y el valor máximo de la f.m.m. de rotor como la ecuación (11).

$$T = \frac{\pi}{2} \left(\frac{\text{polos}}{2} \right)^2 \cdot \Phi_r \cdot F \cdot \text{sen}(\delta) \quad (1.1)$$

Siendo δ , en grados eléctricos, el desfase existente entre las ondas del flujo resultante y la f.m.m. del rotor.

1.4.2.1 Efecto de los polos salientes; Introducción a la teoría de eje en cuadratura y directo[8]

El flujo producido por la onda de f.m.m. en una máquina de entrehierro uniforme es independiente de la posición espacial de la onda respecto a los polos del campo inductor. En una máquina de polos salientes como la mostrada en la figura 1.4 la dirección de magnetización preferente está determinada por las protuberancias polares del rotor. La permeancia es apreciablemente mayor en el sentido del eje polar o directo que en del espacio entre polos o eje en cuadratura.

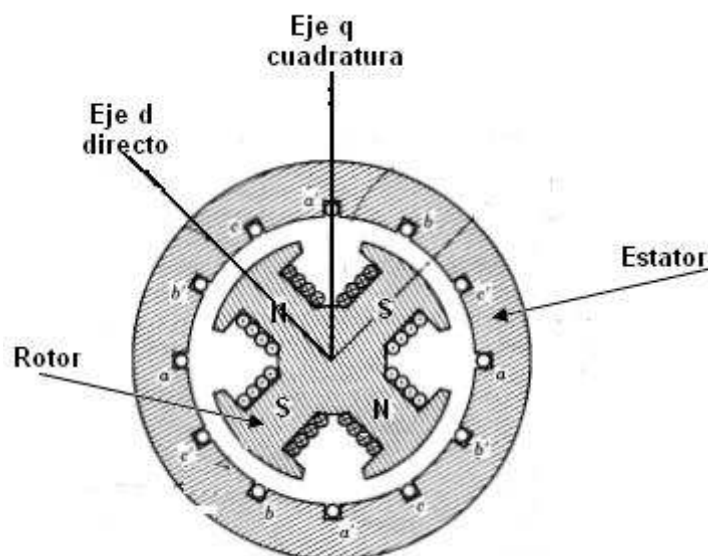


Figura 1.4 Generador de polos salientes eje directo y de cuadratura

Como se indicó en el apartado 1.4.2 el devanado de campo produce una onda de densidad de flujo la cual está orientada a lo largo del eje directo del rotor. Así al dibujar el diagrama fasorial, la f.m.m. del devanado de campo y su correspondiente flujo Φ_{af} están fundadas a lo largo del eje directo del rotor, puesto que el voltaje interno E_{af} es proporcional a la derivada temporal del flujo de campo es posible dibujar el diagrama fasorial en el cual E_{af} adelanta en 90° a

Φ_{af} . Por convención el eje de cuadratura adelanta en 90° al eje directo, de donde se puede decir que el fasor de voltaje interno generado E_{af} se encuentra alineado con el eje en cuadratura q .

Es así que una punto clave en el análisis de máquinas síncronas es el diagrama fasorial y la localización del fasor E_{af} , la localización de ambos el ejes, directo y de cuadratura es determinada de manera instantánea al determinar la posición del fasor E_{af} .

Esto forma la base para el análisis de máquinas de polos salientes en la cual todos los voltajes y corrientes en la máquina pueden ser descompuestos en componentes de eje directo y cuadratura.

La onda de flujo de reacción de armadura Φ_{ar} retrasa la onda de flujo de campo por un espacio angular de $90 + \theta_{ret}$ donde θ_{ret} es el retraso de la corriente respecto al voltaje interno generado. Si la corriente de armadura I_a retrasa al voltaje interno E_{af} en 90° , la reacción de armadura es directamente opuesta al polo de campo y en la dirección opuesta al flujo de campo Φ_{af} , como se muestra en la figura 1.5 (a).

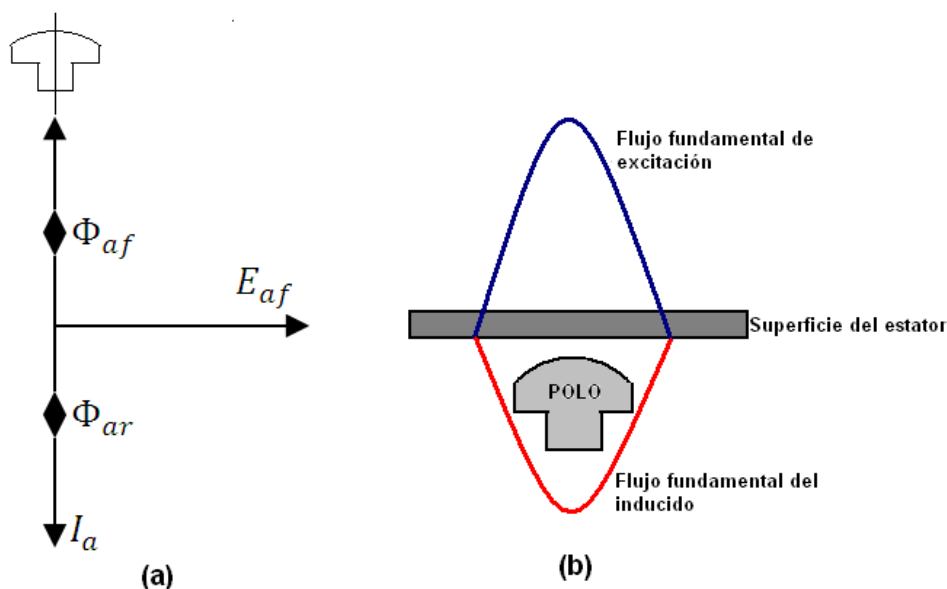


Figura 1.5 Flujos directos en el entrehierro de una máquina síncrona de polos salientes

En la figura 1.5 (b) se muestra la onda de densidad de flujo de campo en la superficie de la armadura, así como la f.m.m. de reacción de armadura, en la figura no se ha tomado en cuenta el efecto de ranuras y armónicos.

Cuando la corriente de armadura está en fase con el voltaje interno, como se ilustra en el diagrama fasorial de la figura 1.6 (a), las condiciones son muy diferentes, el eje de la onda de reacción de armadura está situado en el espacio interpolar, tal como se muestra en la figura 1.6 (b) en color azul.

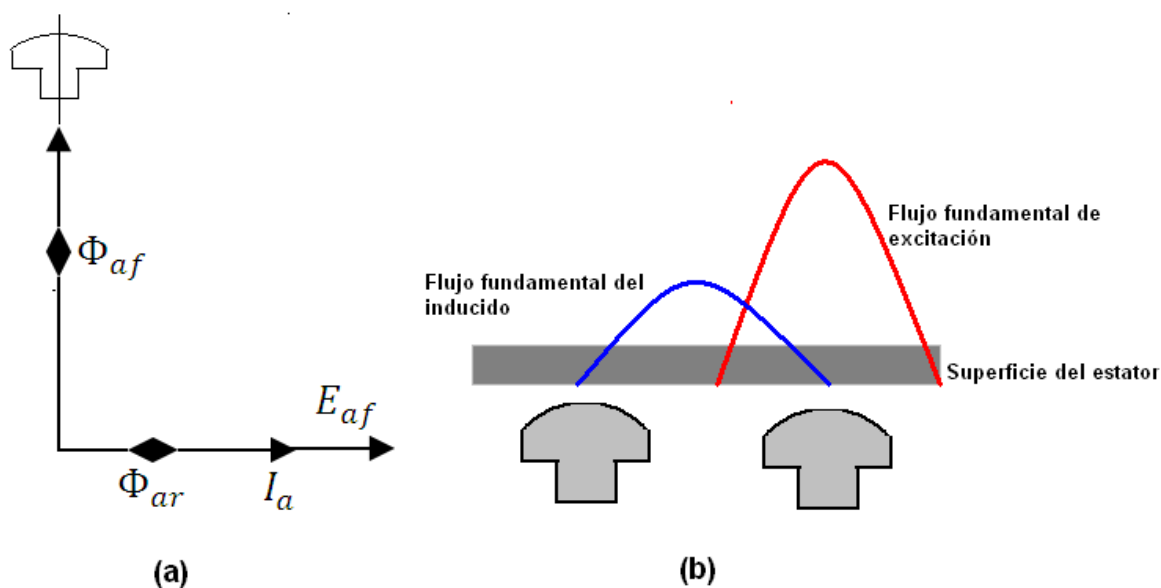


Figura 1.6 Flujos en cuadratura en el entrehierro de la máquina de polos salientes. Debido a la gran longitud del entrehierro en el espacio interpolar y su correspondiente gran reluctancia, el flujo fundamental de reacción de armadura es menor cuando está en cuadratura con el eje de los polos, que lo que sería si estuviera en oposición al eje directo, esto comparando el efecto para el caso de que la corriente en el inducido sea la misma en ambos casos.

En consecuencia se puede decir que la reactancia de magnetización del eje en cuadratura es menor que su contraparte del eje directo. Enfocando nuestra atención sobre la componente fundamental del flujo en el entrehierro y la f.m.m., el efecto de la saliencia de los polos puede ser tomado en cuenta descomponiendo la corriente de armadura I_a en dos componentes, una a lo largo del eje directo I_d y otra a lo largo del eje en cuadratura I_q , como se observa en el diagrama fasorial de la figura 1.7.

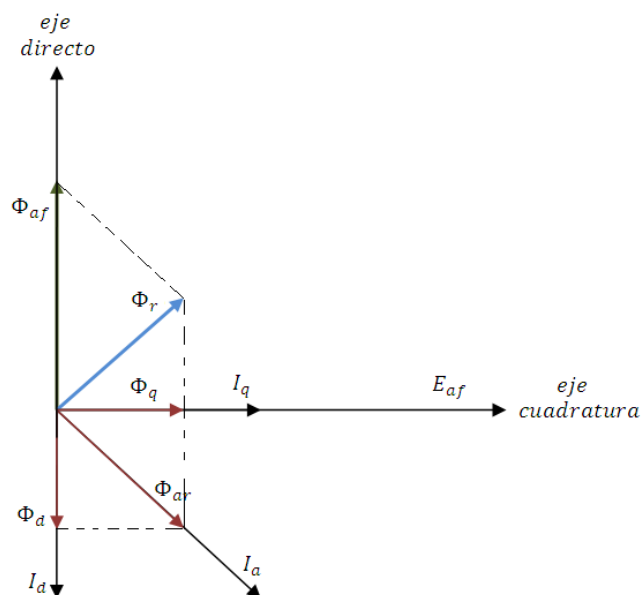


Figura 1.7 Diagrama fasorial de un generador de polos salientes

La componente de eje directo I_d está en cuadratura con el voltaje interno generado E_{af} , la otra componente de eje en cuadratura I_q está en fase con el mismo E_{af} , tal como se muestra en el diagrama fasorial de la figura 1.7 que corresponde a un factor de potencia en retraso.

Cada una de las componentes de la corriente de armadura crea su respectivo flujo de reacción, es así que la componente en eje directo genera el flujo de reacción Φ_d en la misma dirección del eje polar, de la misma forma la componente de eje en cuadratura genera el flujo de reacción Φ_q en cuadratura con eje polar.

El subíndice d (eje directo) y q (eje cuadratura) en los flujos de reacción de armadura se refiere a la fase y no al tiempo de fase de las componentes de corriente que los producen.

Es así las cantidades de eje directo son aquellas cuyos efectos magnéticos actúan alineados con el eje de los polos de campo; de igual manera las cantidades de eje en cuadratura son aquellas cuyos efectos magnéticos actúan sobre el espacio interpolar. Para una máquina no saturada el flujo de reacción total Φ_{ar} resulta ser la suma de sus componentes Φ_d y Φ_q .

1.4.3 REPRESENTACIÓN FASORIAL EQUIVALENTE DE LA MÁQUINA SINCRÓNICA DE POLOS SALIENTES[8]

Los efectos de la reacción de inducido pueden ser representados por una reactancia inductiva, de esta manera es posible obtener una diagrama fasorial equivalente útil para la representación de una máquina síncrona de polos salientes funcionando en régimen permanente en un sistema trifásico equilibrado.

El flujo resultante en el entrehierro de máquina Φ_r puede considerarse como la suma vectorial de las componentes de flujo debidas a las f.m.m. del inductor o circuito de campo y del inducido o devanado trifásico.

Estos flujos son representados por los fasores Φ_{af} y Φ_{ar} , respectivamente, como se observa en la figura 1.8.

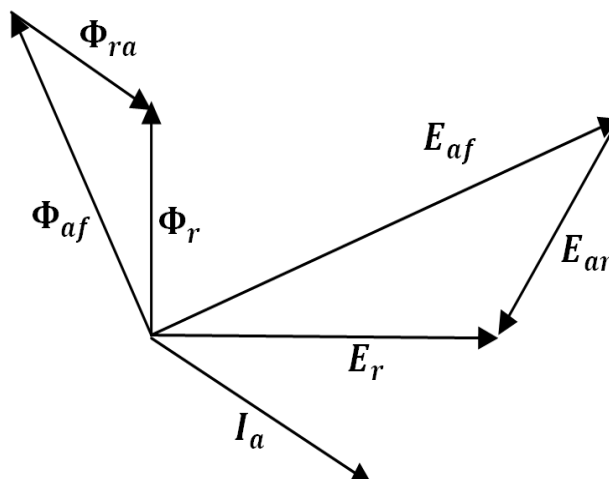


Figura 1.8 Diagrama fasorial componentes de flujo y componentes de voltaje [8]

En los devanados del inducido, estos flujos se manifiestan como f.e.m. inducidas, es así que el voltaje resultante E_r puede considerarse como la suma de estos voltajes E_{af} y E_{ar} , inducidos por el rotor y estator; estas componentes son proporcionales a las corrientes circulantes en el rotor y estator.

Puesto que la corriente que circula por el inducido I_a puede ser descompuesta en el eje directo y en el eje de cuadratura, cada una de estas componentes I_d e I_q llevan efectos inductivos asociados con las ondas de flujo de reacción de armadura en el eje directo y en el de cuadratura, que son representados por las reactancias de magnetización $x_{\phi d}$ y $x_{\phi q}$ en cada eje respectivamente.

Cada una de las componentes de la corriente de armadura, es decir I_d e I_q lleva aparejada una componente de reactancia sincrónica que produce la caída de voltaje en $j \cdot x_d I_d$ y $j \cdot x_q I_q$ respectivamente. Las reactancias x_d y x_q son reactancias sincrónicas directas y en cuadratura, éstas dan cuenta de los efectos inductivos, incluyendo los de dispersión y de reacción, estas son:

$$\begin{aligned} x_d &= x_l + x_{\varphi d} \\ x_q &= x_l + x_{\varphi q} \end{aligned} \quad (1.2)$$

El voltaje E_r difiere del voltaje en bornes en la máquina en la cuantía correspondiente a la caída de voltaje en la resistencia del inducido r_a y en la reactancia de dispersión del estator x_l que se asume es la misma para el eje en cuadratura y el eje directo. Esto se muestra en la figura 1.9, en donde el diagrama fasorial del generador de polos salientes expresa el voltaje interno E_{af} como la suma del voltaje en bornes V_t , la caída en la resistencia del devanado $r_a \cdot I_a$ y las componentes de caída de voltaje en las reactancias sincrónicas $j \cdot x_d I_d$ y $j \cdot x_q I_q$ tal como se indica en la ecuación 1.3.

$$E_{af} = V_t + r_a \cdot I_a + j \cdot x_d I_d + j \cdot x_q I_q \quad (1.3)$$

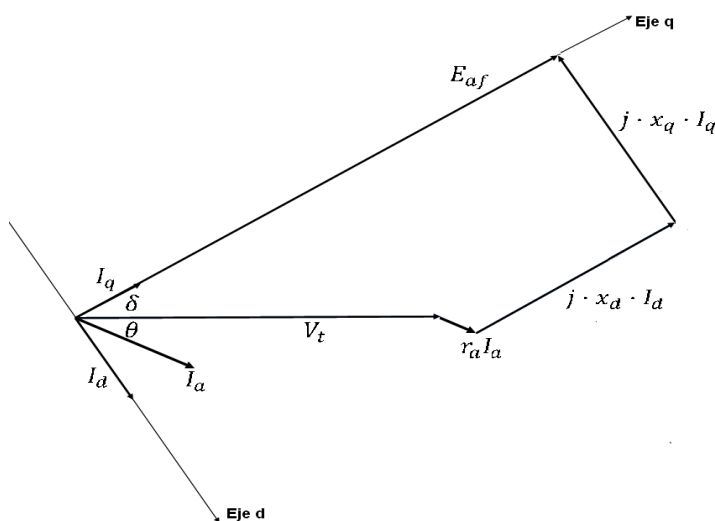


Figura 1.9 Diagrama fasorial de un generador sincrónico de polos salientes

En el diagrama fasorial de la figura 1.9 se realiza la descomposición de la corriente de armadura en sus dos componentes d y q presuponiendo el conocimiento del desfase entre voltaje interno y la corriente armadura $\theta + \delta$. Sin embargo por lo general en la práctica solo se tiene conocimiento del ángulo de

factor de potencia θ , de donde es necesario localizar el eje en cuadratura para determinar el ángulo δ esto es posible con la construcción del diagrama de la figura 1.10.

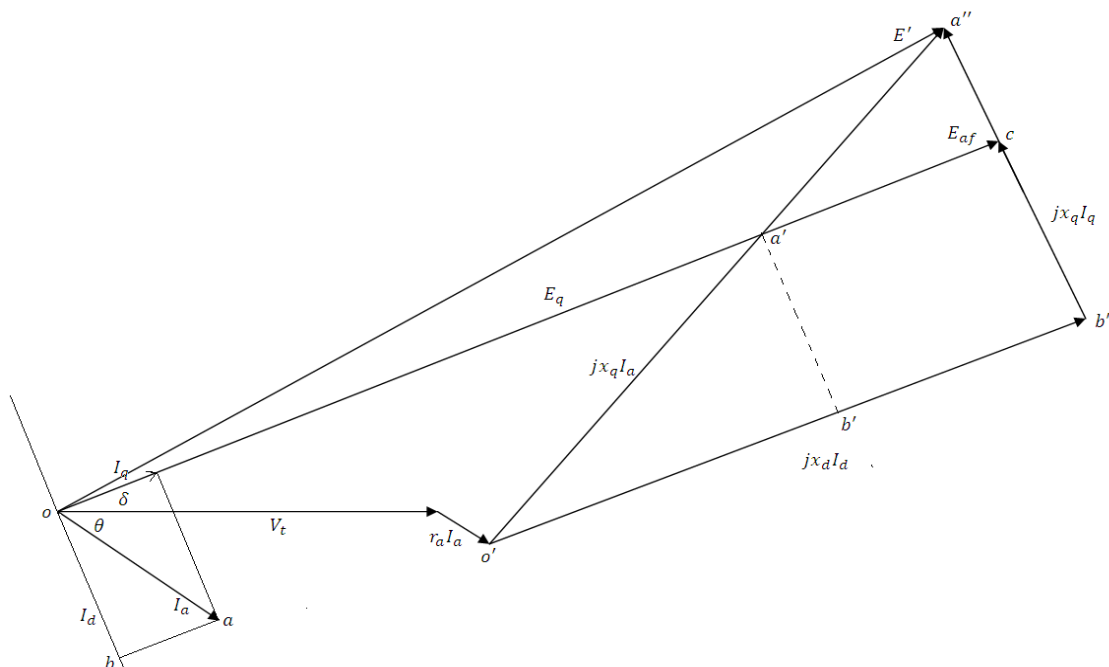


Figura 1.10 Relaciones entre las componentes de voltaje en el diagrama fasorial de un generador de polos salientes [8]

$$\begin{aligned} o'a' &= jx_q I_a & o'b'' &= jx_d I_d \\ b'a' &= b''c = jx_q I_q & o'a'' &= jx_d I_a \\ o'b' &= jx_q I_d & a'c &= j(x_d - x_q) I_d \end{aligned}$$

En el diagrama de la figura 1.10 se observa que la relación $jx_q I_a$ es perpendicular a I_a , resultado demostrado geoméricamente por semejanza entre los triángulos oab y $o'a'b'$, por tener sus respectivos lados perpendiculares entre sí, de donde:

$$\begin{aligned} \frac{o'a'}{oa} &= \frac{b'a'}{ba} \\ o'a' &= \frac{b'a'}{ba} \cdot oa = jx_q I_a \end{aligned} \quad (1.4)$$

El fasor suma $V_t + r_a I_a + jx_q I_a$ fija la posición angular el voltaje interno E_{af} y por consiguiente la de los eje d y q .

$$E_{af} \angle \delta^\circ = V_t + r_a I_a + jx_q I_a \quad (1.5)$$

1.4.4 CARACTERÍSTICA EN CIRCUITO ABIERTO Y EN CORTOCIRCUITO [8]

1.4.4.1 Prueba de circuito abierto

La prueba de circuito abierto es realizada con el rotor del generador girando a velocidad sincrónica, los terminales del generador en vacío, es decir con la corriente de inducido cero. Bajo estas condiciones se procede a medir el voltaje en bornes para una serie de valores de corriente de excitación hasta llegar al valor de voltaje nominal del generador, obteniéndose de esta manera una curva llamada característica de circuito abierto, la cual expresa el voltaje terminal del generador en circuito abierto en función de la corriente de excitación.

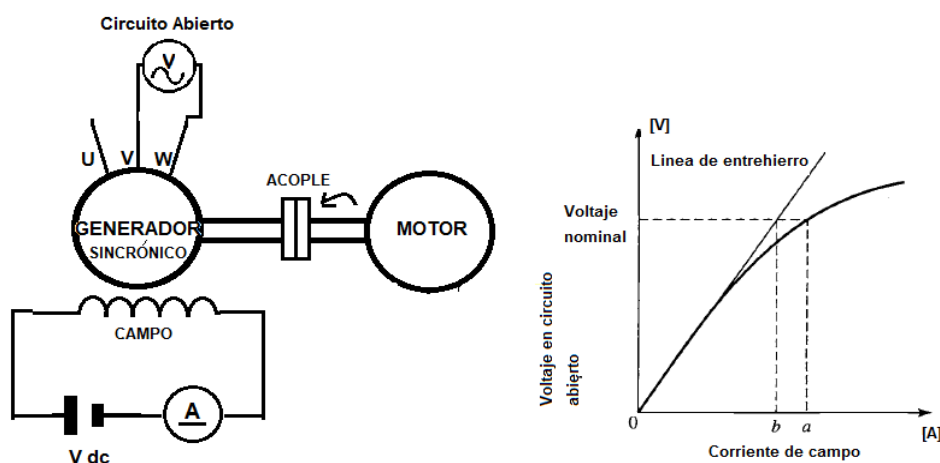


Figura 1.11 Prueba de circuito abierto y característica de circuito abierto

La característica de circuito abierto representa la relación entre la componente fundamental del flujo en el entrehierro y la f.e.m. en el circuito magnético de estator cuando ésta procede únicamente del devanado inductor, la figura 1.11 muestra la curva característica de circuito abierto, la línea de entrehierro que es la proyección del voltaje terminal considerando que no existe el efecto de la saturación magnética.

1.4.4.2 Prueba de corto circuito

La prueba es realizada con el rotor del generador girando a velocidad sincrónica, los tres terminales de la armadura del generador son cortocircuitados entre sí y se monitorea la corriente que circula entre ellos. Bajo estas condiciones se procede a medir la corriente de inducido para una serie de valores de corriente de excitación hasta llegar a la corriente de inducido nominal del generador,

obteniéndose de esta manera la característica de cortocircuito, que expresa la corriente circulante por el inducido en cortocircuito, en función de la corriente de excitación.

La característica de cortocircuito tiene un comportamiento lineal, debido a que las f.m.m. de campo y de reacción están prácticamente opuestos entre sí lo cual produce una f.m.m. resultante en el entrehierro pequeña e igual al consumo por la resistencia de armadura y la reactancia de dispersión, de donde se concluye que el efecto de la saturación es pequeño, provocando la relación lineal entre la corriente de cortocircuito y de campo.

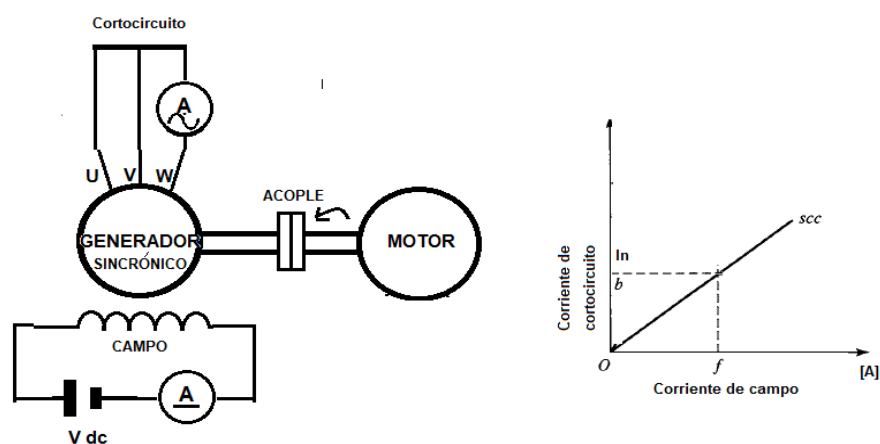


Figura 1.12 Prueba de cortocircuito y característica de cortocircuito

1.4.4.3 Determinación de la reactancia sincrónica de eje directo x_d

La reactancia sincrónica de eje directo de un generador en estado estable puede calcularse a partir de las características de corto circuito y de circuito abierto. Los datos obtenidos en las pruebas son empleados para la determinación de las rectas de regresión para cada una de las características. En el caso de la regresión para la característica de circuito abierto se determina la línea de entrehierro. La figura (1.13) muestra las características de cortocircuito y circuito abierto de un generador, las cuales permiten la determinación de la reactancia sincrónica de eje directo.

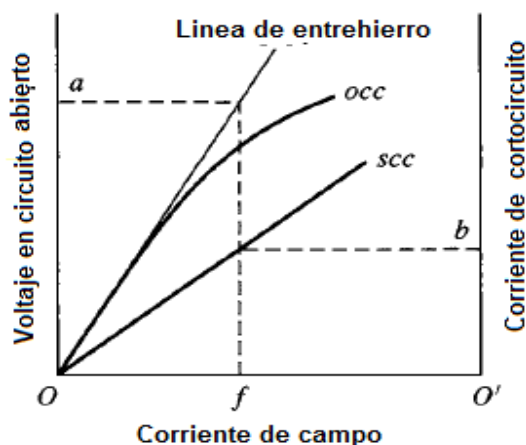


Figura 1.13 Características de circuito abierto y cortocircuito, para cálculo de reactancia sincrónica no saturada [8]

La reactancia sincrónica no saturada puede deducirse de la figura 1.13 tomando la corriente de cortocircuito y el voltaje inducido sobre la recta de entrehierro para la corriente de excitación de cortocircuito, esto es mostrado en la ecuación (1.6).

$$x_{d(ns)} = \frac{Oa}{O'b} = \frac{V_{a(le)}}{I_{a(sc)}} \quad (1.6)$$

Donde:

$x_{d(ns)}$: Reactancia sincrónica de eje directo no saturada

$V_{a(le)}$: Voltaje fase neutro de la línea de entrehierro

$I_{a(sc)}$: Corriente de cortocircuito nominal

La reactancia sincrónica saturada puede calcularse de la figura 1.14 tomando la corriente de campo para voltaje nominal de vacío y la corriente de cortocircuito para dicha corriente. La figura 1.14 muestra las características de circuito abierto y cortocircuito, para cálculo de reactancia sincrónica saturada.

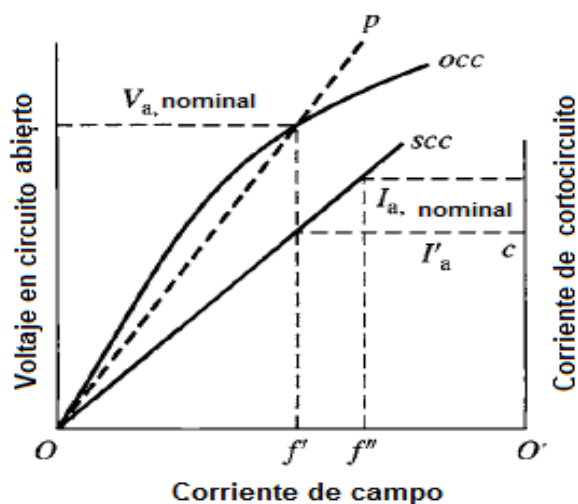


Figura 1.14 Características de circuito abierto y cortocircuito, para cálculo de reactancia sincrónica saturada [8]

$$x_d = \frac{Oa}{O'c} = \frac{V_a}{I'_{a(sc)}} \quad (1.7)$$

Donde:

x_d : Reactancia sincrónica de eje directo saturada

V_a : Voltaje fase neutro nominal de la característica de circuito abierto

$I'_{a(sc)}$: Corriente de cortocircuito para voltaje nominal de vacío

La relación de cortocircuito definida como la división entre las corrientes de excitación necesaria para obtener el voltaje terminal nominal en circuito abierto (*OCC*) y la corriente de inducido nominal en cortocircuito (*SCC*) es utilizada para el cálculo del valor en por unidad de la reactancia sincrónica saturada.

$$SCR = \frac{OCC}{SCC} \quad (1.8)$$

$$x_d [pu] = \frac{1}{SCR} \quad (1.9)$$

1.4.5 PRUEBA DE DESLIZAMIENTO^[14]

La prueba es realizada con el rotor del generador girando a una velocidad muy cercana a la velocidad sincrónica, es decir con un pequeño deslizamiento, el devanado campo en circuito abierto y la armadura energizada por una fuente trifásica a frecuencia nominal de secuencia positiva, de un voltaje inferior al nominal (inferior al 50%). Bajo estas condiciones se toman medidas de la corriente de armadura, voltaje terminal y voltaje sobre el devano de campo en circuito abierto; es preferible, registrar oscilogramas de cada una de estas variables, la figura 1.15 ilustra este método, donde se puede apreciar la oscilación de los valores de voltaje y corriente.

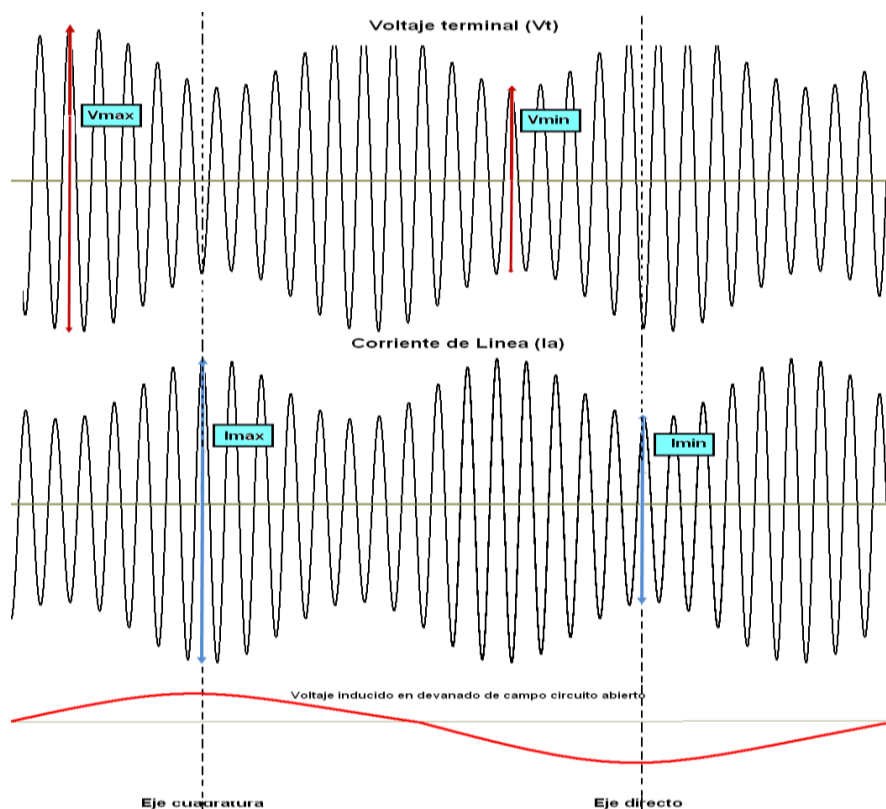


Figura 1.15 Prueba de deslizamiento, método para obtener x_q

El deslizamiento se puede determinar como la relación de la frecuencia del voltaje inducido en el campo a la frecuencia del voltaje aplicado, es a veces difícil mantener la velocidad constante cuando el deslizamiento es suficientemente bajo para una determinación exacta de la reactancia y las corrientes inducidas en la bobina de amortiguamiento producen un torque pulsante.

El voltaje inducido en el circuito de campo abierto puede alcanzar valores peligrosos cuando el deslizamiento es grande, es decir cercano al 5%. Debido a la dificultad encontrada con frecuencia en mantener el deslizamiento constante deseado durante la prueba, es necesario observar continuamente el voltaje de campo y estar preparado para cortocircuitar el campo precisamente para evitar el incremento peligroso del voltaje a través de los instrumentos. El circuito utilizado para ejecutar la prueba de deslizamiento está en la figura 1.16

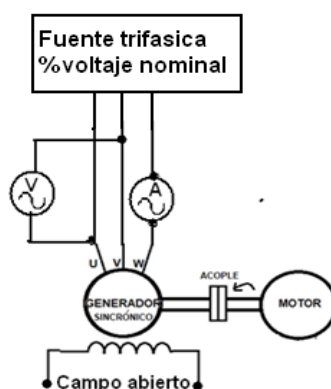


Figura 1.16 Circuito para prueba de deslizamiento

1.4.5.1 Determinación de la reactancia sincrónica de eje en cuadratura x_q [14]

Los valores mínimos y máximos del voltaje y corriente de armadura obtenidos durante la prueba de deslizamiento son utilizados para determinar de manera aproximada los valores de reactancia en eje directo y en cuadratura, mediante la aplicación de las ecuaciones (1.10 y 1.11), para mejorar el valor obtenido de x_q , es posible aplicar la ecuación (1.12) donde la x_d ha sido determinada por la características de circuito abierto y corto circuito. En la figura 1.15 se observa que la mínima relación (ecuación (1.10)) ocurre cuando el voltaje inducido en el devanado de campo es máximo, mientras que la relación máxima (ecuación (1.11)) ocurre cuando el voltaje pasa a través del cero.

$$x_q = \frac{Vt_{min}}{I_{max}} [pu] \quad (1.10)$$

$$x_d = \frac{Vt_{max}}{I_{min}} [pu] \quad (1.11)$$

$$x_q = x_d \cdot \frac{Vt_{min}}{Vt_{max}} \cdot \frac{I_{min}}{I_{max}} [pu] \quad (1.12)$$

CAPÍTULO II

2 ESTABILIDAD DE ÁNGULO DEL ROTOR [1] [2]

En un sistema eléctrico de potencia la generación de energía eléctrica depende del sincronismo de las máquinas: Puesto que todos los voltajes y corrientes que circulan por el sistema deben tener la misma frecuencia (la cual está directamente relacionada con la velocidad mecánica de rotación de rotor), se debe prestar atención a la operación sincrónica, la cual está influenciada por la dinámica del ángulo de rotor del generador y la relación potencia-ángulo.

Es así que la estabilidad de ángulo se refiere a la capacidad de las máquinas sincrónicas interconectadas en un sistema para permanecer en sincronismo tanto bajo condiciones normales de operación y después de haber sido sometidas a una perturbación. Esto depende de la capacidad de mantener y regresar al equilibrio entre el torque electromagnético y el torque mecánico de cada máquina sincrónica en el sistema.

La estabilidad de ángulo del rotor envuelve el estudio de oscilaciones electromecánicas en el sistema de potencia, así como la manera en la que la potencia de salida del generador sincrónico varía con el cambio del ángulo del rotor.

Al presentarse una perturbación en el sistema, la inestabilidad se manifiesta en forma de oscilaciones angulares crecientes, lo cual produce aceleración o desaceleración de los rotores de las máquinas de acuerdo a la ley de movimiento de un cuerpo rotativo, produciendo la pérdida de sincronismo de un generador o de grupos de generadores, respecto al resto del sistema.

Bajo condiciones de estado estable, hay un equilibrio entre la entrada mecánica y la salida eléctrica de cada generador. El campo producido en el rotor y el campo giratorio resultante en el entrehierro poseen la misma velocidad, sin embargo existe una separación angular entre ellos denominada ángulo de potencia δ , relacionado con la potencia eléctrica que el generador entrega al sistema.

Si después de una perturbación el rotor se mantiene alrededor de la velocidad sincrónica, el generador puede mantener su estabilidad. Si la perturbación no implica ningún cambio de potencia en la red, el rotor retornará a su posición original o muy cercana a la misma, caso contrario si la perturbación provoca cambio en generación, carga, o condiciones de la red, el rotor buscará un nuevo ángulo de potencia.

2.1 RELACIÓN POTENCIA-ÁNGULO [8]

La relación entre la potencia y la posición angular de los rotores de los generadores sincrónicos es un concepto fundamental en los estudios de estabilidad de ángulo del rotor, dicha relación es de naturaleza no lineal.

Para un análisis explicativo se considera un generador entregando potencia a un sistema representado por una barra infinita. El sistema de transmisión está conformado por componentes pasivos lineales, las resistencias no se toman en cuenta y el generador es de polos salientes.

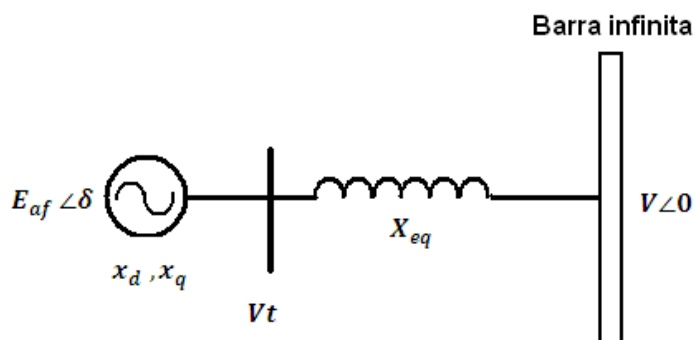


Figura 2.1 Sistema generador barra infinita con sistema de trasmisión

El sistema de la figura 2.1 muestra el voltaje interno del generador E_{af} con sus respectivas reactancias sincrónicas x_d y x_q , el voltaje de la barra infinita V y el sistema de transmisión representado por su reactancia equivalente X_{eq} . El ángulo de rotor es representado por la letra δ , representa la separación angular entre el voltaje interno de la máquina y el voltaje de la barra infinita.

Si el sistema es representado en su diagrama fasorial y la caída de voltaje en el sistema de transmisión es resuelta en componentes de eje directo y eje en cuadratura, el análisis se reduce al adicionar el efecto de la reactancia externa al de las reactancias directa y de cuadratura de la máquina, de donde el valor total

de las reactancias entre el voltaje interno E_{af} y el de la barra infinita de acuerdo al diagrama fasorial de la figura 2.2 son:

$$\begin{aligned} X_{Td} &= x_d + X_{eq} \\ X_{Tq} &= x_q + X_{eq} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Si el voltaje de la barra infinita es descompuesto en el eje directo y el de cuadratura es posible determinar la potencia mediante las relaciones obtenidas del análisis del diagrama fasorial de la figura 2.2.

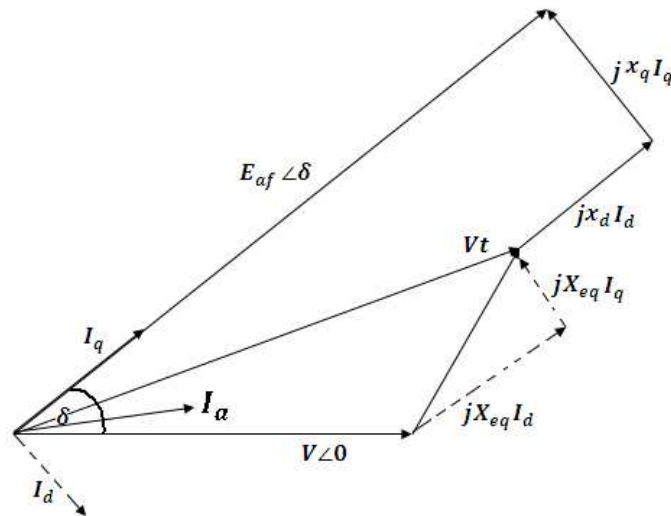


Figura 2.2 Diagrama fasorial sistema generador barra infinita

De donde se determina que la relación potencia-ángulo cumple con la ecuación (2.2).

$$Pe = I_d \cdot V_d + I_q \cdot V_q = I_d \cdot V \cdot \text{sen}(\delta) + I_q \cdot V \cdot \text{cos}(\delta) \quad (2.2)$$

Del diagrama también se cumple que:

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{E_{af} - V \cdot \text{cos}(\delta)}{X_{Td}} \\ I_q &= \frac{V \cdot \text{sen}(\delta)}{X_{Tq}} \end{aligned}$$

Realizando los remplazos correspondiente en la ecuación (2.2) se obtiene:

$$Pe = \frac{E_{af} - V \cdot \text{cos}(\delta)}{X_{Td}} \cdot V \cdot \text{sen}(\delta) + \frac{V \cdot \text{sen}(\delta)}{X_{Tq}} \cdot V \cdot \text{cos}(\delta)$$

$$P_e = \frac{E_{af} \cdot V}{X_{Td}} \cdot \text{sen}(\delta) + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_{Tq}} - \frac{1}{X_{Td}} \right) \cdot \text{sen}(2\delta) \quad (2.3)$$

La gráfica de la ecuación (2.3) asume voltajes e impedancias constantes, se observa que la relación entre P_e y el ángulo δ no es sinusoidal pura, ésta se ve distorsionada por el segundo término de la ecuación el cual corresponde a la componente que incluye el efecto de los polos salientes. Este término corresponde a la potencia de reluctancia, debe notarse que esta componente es independiente de la excitación del campo.

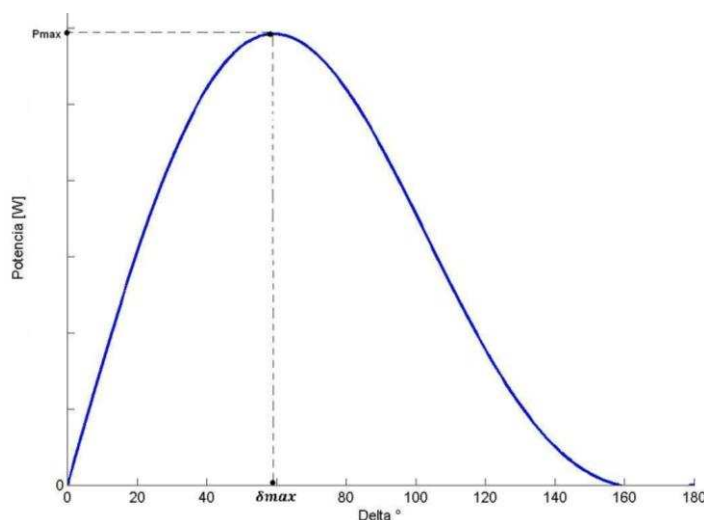


Figura 2.3 Grafica P vs δ

Cuando el ángulo es cero, la potencia transferida es nula, con el aumento del ángulo δ se incrementa la potencia transferida. El ángulo de máxima transferencia para análisis que toman en consideración el efecto de polos salientes es inferior a los 90° , un aumento posterior a este ángulo resulta en un decremento de la potencia transferida y la subsecuente inestabilidad.

Para la determinación de la relación $Q - \delta$ el procedimiento es similar, de donde puede demostrarse que la relación cumple con la ecuación (2.4).

$$Q = \frac{E_{af} \cdot V}{X_{Td}} \cdot \cos(\delta) - \frac{V^2}{X_{Tq}} \cdot \text{sen}^2(\delta) - \frac{V^2}{X_{Td}} \cdot \cos^2(\delta) \quad (2.4)$$

Para el análisis de máquinas de rotor cilíndrico solo es necesario reemplazar en la ecuación (2.3) y (2.4) $x_d = x_q$, para obtener las relaciones potencia ángulo, para dicho tipo de máquina.

2.2 DINÁMICA DEL ROTOR Y ECUACIÓN DE OSCILACIÓN [3]

La relación que describe el movimiento relativo entre el rotor y el campo giratorio resultante en el entrehierro es la ecuación de oscilación. Ésta vincula las variables físicas del movimiento del rotor, como son la inercia y la velocidad mecánica, con la potencia eléctrica generada.

La ecuación considera un generador en estado estable girando a una velocidad mecánica sincrónica ω_{sm} , al existir un equilibrio entre el torque eléctrico T_e y el torque mecánico T_m , sin considerar las pérdidas se cumple:

$$T_e = T_m$$

Una desviación del estado estable debido a una perturbación resulta en una aceleración ($T_e < T_m$) o una desaceleración ($T_e > T_m$). Definiéndose como el torque de aceleración a la diferencia entre el torque mecánico y el torque eléctrico.

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.5)$$

Se define a J como el momento de inercia de la máquina motriz y el generador combinados, sin tomar en cuenta la fricción y el torque de amortiguamiento, de acuerdo a la ley de la rotación se tiene:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a \quad (2.6)$$

Donde:

θ_m : es el desplazamiento angular del rotor con respecto al eje estacionario de referencia del estator.

Entonces si es de interés la velocidad relativa del rotor respecto a la velocidad sincrónica, la referencia angular es tomada relativa a la rotación sincrónica moviéndose a velocidad angular constante:

$$\theta_m = \omega_{sm} \cdot t + \delta_m \quad (2.7)$$

Donde:

δ_m : es la posición del rotor antes de producirse la perturbación, medida desde un marco de referencia que rota sincrónicamente.

Al derivar la expresión anterior se tiene:

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.8)$$

Al obtener la segunda derivada, se encuentra la aceleración del rotor:

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (2.9)$$

Para trabajar en términos de potencia se multiplica la ecuación de oscilación por la velocidad angular mecánica, obteniendo:

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad (2.10)$$

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.11)$$

Donde:

$J\omega_m$: es llamada constante de inercia y se la denota por la letra M

La relación entre la constante de inercia M y la energía cinética W_K de un cuerpo rotativo es:

$$M = \frac{2W_K}{\omega_m} \quad (2.12)$$

Recordando las siguientes relaciones es posible expresar la ecuación de oscilación en términos de ángulos eléctricos:

$$\delta = \frac{p}{2} \cdot \delta_m \quad y \quad \omega = \frac{p}{2} \cdot \omega_m \quad (2.13)$$

De donde la ecuación de oscilación en términos de ángulos eléctricos y energía cinética tiene la forma:

$$\frac{2}{p} \cdot \frac{2W_K}{\omega_m} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.14)$$

Dividiendo esta expresión para la potencia base para dejar todo en por unidad se tiene:

$$\frac{2}{p} \cdot \frac{2W_K}{\omega_m S_B} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_m}{S_B} - \frac{P_e}{S_B} \quad (2.15)$$

Sabiendo que $H = \frac{W_K}{S_B}$ constate de inercia en por unidad.

Se tiene la expresión de oscilación en función de las velocidades sincrónicas eléctricas y ángulos eléctricos.

$$\frac{2H}{\omega_s} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{m[pu]} - P_{e[pu]} \quad (2.16)$$

La ecuación (2.16) puede ser expresada tanto en radianes como en grados.

$$\frac{H}{\pi f_0} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad [\text{radianes electricos}] \quad (2.17)$$

$$\frac{H}{180 f_0} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad [\text{grados electricos}] \quad (2.18)$$

2.3 ESTABILIDAD DE ESTADO ESTABLE-PEQUEÑA PERTURBACIÓN [3]

La estabilidad de estado estable es definida como la capacidad del sistema de potencia para permanecer en sincronismo cuando es sujeto a una pequeña perturbación, una perturbación es considerada pequeña si las ecuaciones que describen la respuesta del sistema ante ésta pueden ser linealizadas alrededor de un punto de operación para su análisis. Las pequeñas perturbaciones se presentan continuamente durante la operación normal de un sistema de potencia, ejemplos de éstas son los cambios en la carga demandada por el sistema, cambios programados en la topología de la red, y ajustes en controles de los generadores. Estas pequeñas perturbaciones se presentan en forma de oscilaciones de potencia activa intercambiada entre máquinas de una misma área del sistema o entre máquinas de diferentes áreas del sistema, estas oscilaciones de potencia se presentan en frecuencias en el rango de 0.1 a 3 Hz.

Un estudio de estabilidad de pequeña señal analiza periodos de diez a veinte segundos posteriores a la perturbación, y emplea técnicas de análisis lineal para proporcionar información acerca de las características dinámicas del sistema analizado, para efecto de análisis es conveniente asumir que la causa de la perturbación desaparece, bajo esta condición el movimiento del sistema es libre y la estabilidad es asegurada si el sistema retorna a su estado original.

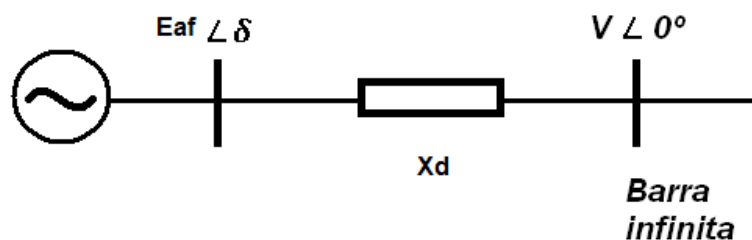


Figura 2.4 Sistema generador-barra infinita

El análisis desarrollado es efectuado en un sistema lineal por medio de la examinación de la ecuación de oscilación del sistema, para un análisis inicial se asume que los controles automáticos de voltaje y los gobernadores de velocidad no se encuentran activos, es decir no son tomados en cuenta. Para ilustrar la estabilidad de estado estable, se desarrolla el análisis a una máquina no regulada conectada una barra infinita tal como se muestra en la figura 2.4.

La sustitución de la ecuación de potencia eléctrica en la ecuación de oscilación de la máquina resulta ser:

$$\frac{H}{\pi f_0} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_{max} \text{sen}(\delta) \quad (2.19)$$

La ecuación de oscilación es una función no lineal de la potencia y el ángulo; sin embargo para pequeñas perturbaciones, puede ser linealizada con una pequeña pérdida de precisión. La linealización del modelo del SEP es realizada alrededor de un punto de equilibrio representado por una condición de estado estable en la operación del sistema, al considerar un pequeño cambio en el ángulo de potencia $\Delta\delta$ desde el punto inicial de operación δ_0 se tiene:

$$\delta = \delta_0 + \Delta\delta$$

El nuevo ángulo debe satisfacer a la ecuación de oscilación y al ser sustituido se obtiene:

$$\frac{H}{\pi f_0} \cdot \frac{d^2(\delta_0 + \Delta\delta)}{dt^2} = P_m - P_{max} \cdot \text{sen}(\delta_0 + \Delta\delta) \quad (2.20)$$

Al desarrollar el seno en el lado derecho de la ecuación se obtiene:

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta_0}{dt^2} + \frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = P_m - P_{max} \cdot [\text{sen}(\delta_0) \cdot \text{cos}(\Delta \delta) + \text{cos}(\delta_0) \cdot \text{sen}(\Delta \delta)] \quad (2.21)$$

Debido a que $\Delta \delta$ es pequeño, se puede asumir que el $\text{cos}(\Delta \delta) \cong 1$ y $\text{sen}(\Delta \delta) \cong \Delta \delta$, de donde al realizar los correspondientes remplazos se tiene:

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta_0}{dt^2} + \frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = P_m - P_{max} \cdot \text{sen}(\delta_0) - P_{max} \cdot \text{cos}(\delta_0) \cdot \Delta \delta \quad (2.22)$$

De donde se reduce a una ecuación linealizada en términos del cambio de ángulo de potencia:

$$\frac{H}{\pi f_0} \cdot \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + P_{max} \cdot \text{cos}(\delta_0) \cdot \Delta \delta = 0 \quad (2.23)$$

$$P_{max} \cdot \text{cos}(\delta_0) = P_s$$

Donde:

P_s , es llamado coeficiente sincronizante de potencia y representa un valor importante en la determinación de la estabilidad del sistema, éste es determinado al evaluar el ángulo de potencia del punto inicial de operación en la derivada angular de la ecuación de potencia de un generador, esto se cumple para cualquier tipo de máquina:

$$P_s = \left. \frac{dP_e}{d\delta} \right|_{\delta_0} \quad (2.24)$$

Al sustituirlo en la ecuación (2.23) se tiene:

$$\frac{H}{\pi f_0} \cdot \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + P_s \cdot \Delta \delta = 0 \quad (2.25)$$

Al aplicar la transformada de Laplace a la ecuación (2.25) se obtiene la ecuación característica del sistema, de donde es posible demostrar que las raíces están dadas por:

$$\frac{H}{\pi f_0} \cdot s^2 + P_s = 0$$

$$s^2 = -\frac{\pi f_0}{H} \cdot P_s \quad (2.26)$$

Cuando el coeficiente de sincronización es negativo produce raíces en el semiplano derecho del plano s , la respuesta es un incremento exponencial y la pérdida de estabilidad. Cuando el coeficiente de sincronización es positivo se tiene raíces en el eje imaginario del plano s , produciendo un movimiento oscilatorio no amortiguado y el sistema es marginalmente estable con una frecuencia natural de oscilación ω_n dada por la expresión.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\pi f_0}{H} \cdot P_s} \quad (2.27)$$

Como resultado de la diferencia de velocidad entre la velocidad del rotor y la velocidad del campo giratorio en el entrehierro de la máquina, se presenta una acción del tipo motor de inducción, produciéndose un torque que tiende a minimizar la diferencia entre las dos velocidades angulares, por lo que es conocido como torque de amortiguamiento. Expresado como potencia de amortiguamiento es aproximadamente proporcional a la variación de la velocidad, de tal manera que:

$$P_d = D \cdot \frac{d\delta}{dt} \quad (2.28)$$

El coeficiente de amortiguamiento D puede ser determinado por datos de diseño o por pruebas de laboratorio. El amortiguamiento tiene componentes de otros torques, como los causados por la fricción de rodamientos, ventilación, circuitos RLC de la red, característica velocidad/torque de la máquina motriz y respuesta dinámica de la carga a cambios de frecuencia.

De lo descrito hasta el momento se puede notar que la inestabilidad se puede presentar en dos formas:

- Incremento continuo del ángulo del rotor debido a la ausencia de suficiente torque sincronizante.
- Oscilaciones del ángulo del rotor, de amplitud creciente debido a la ausencia de suficiente torque amortiguador.

La estabilidad se alcanza cuando el coeficiente sincronizante es positivo y la potencia de amortiguamiento causa una disminución en la magnitud de las oscilaciones, hasta llegar a un nuevo punto de equilibrio en el ángulo de potencia.

La ecuación linealizada que toma en cuenta el coeficiente de amortiguamiento está expresada de la siguiente manera.

$$\frac{H}{\pi f_0} \cdot \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + D \cdot \frac{d \Delta \delta}{dt} + P_s \cdot \Delta \delta = 0 \quad (2.29)$$

Expresado de otra manera se tiene:

$$\frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + \frac{\pi f_0}{H} \cdot D \cdot \frac{d \Delta \delta}{dt} + \frac{\pi f_0}{H} P_s \cdot \Delta \delta = 0 \quad (2.30)$$

La relación de amortiguamiento está dada por:

$$\xi = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\pi f_0}{H P_s}} \quad (2.31)$$

En términos de la frecuencia natural de oscilación ω_n y la relación de amortiguamiento ξ se establece la ecuación diferencial de segundo orden:

$$\frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + 2\xi \omega_n \frac{d \Delta \delta}{dt} + \omega_n^2 \Delta \delta = 0 \quad (2.32)$$

Al aplicar la transformada de Laplace y formando la ecuación característica se obtiene:

$$s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (2.33)$$

Para condiciones normales de operación $\xi < 1$, y las raíces de la ecuación característica son complejas.

$$s_1 = -\xi \omega_n + j \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (2.34)$$

$$s_2 = -\xi \omega_n - j \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (2.35)$$

Donde se puede definir la frecuencia de amortiguamiento como:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (2.36)$$

Al representar el sistema en variables de estado se obtiene las siguientes relaciones.

$$\begin{aligned} x_1 &= \Delta \delta & x_2 &= \Delta \dot{\delta} \\ \dot{x}_1 &= x_2 & \dot{x}_2 &= -\omega_n^2 x_1 - 2\xi \omega_n x_2 \end{aligned} \quad (2.37)$$

Las mismas que expresadas en forma matricial dan:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

y en forma compacta:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) \quad (2.39)$$

Donde:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n \end{bmatrix}$$

La expresión (2.39) es la llamada ecuación del sistema en variables de estado no forzada u homogénea. Si las variables de estado son x_1 y x_2 , la respuesta se expresada en función de ellas por medio del vector $y(t)$ definido como:

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

$$y(t) = C \cdot x(t) \quad (2.40)$$

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación (2.39) se tiene

$$sX(s) - x(0) = A \cdot X(s) \quad (2.41)$$

De la cual se obtiene el vector de estado $X(s)$:

$$X(s) = (sI - A)^{-1}x(0) \quad (2.42)$$

Donde:

$$(sI - A) = \begin{bmatrix} s & -1 \\ \omega_n^2 & s + 2\xi\omega_n \end{bmatrix}$$

Realizando la sustitución por $(sI - A)^{-1}$, se obtiene:

$$X(s) = \frac{\begin{bmatrix} s+2\xi\omega_n & 1 \\ -\omega_n^2 & s \end{bmatrix}x(0)}{s^2+2\xi\omega_n s+\omega_n^2} \quad (2.43)$$

Cuando el rotor es repentinamente perturbado por un pequeño cambio en el ángulo $\Delta\delta_0$, $x_1(0) = \Delta\delta_0$ y $x_2(0) = \Delta\omega_0 = 0$ se obtiene:

$$\Delta\delta(s) = \frac{(s+2\xi\omega_n)\Delta\delta_0}{s^2+2\xi\omega_n s+\omega_n^2} \quad (2.44)$$

$$\Delta\omega(s) = \frac{\omega_n^2 \Delta\delta_0}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.45)$$

Al aplicar la inversa de Laplace se encuentra la respuesta ante la entrada cero:

$$\Delta\delta = \frac{\Delta\delta_0}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot e^{-\xi\omega_n t} \cdot \text{sen}(\omega_d t + \theta) \quad (2.46)$$

$$\Delta\omega = -\frac{\omega_n \Delta\delta_0}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot e^{-\xi\omega_n t} \cdot \text{sen}(\omega_d t) \quad (2.47)$$

Donde ω_d es la frecuencia de amortiguamiento de oscilación, y θ esta dado por:

$$\theta = \cos^{-1}(\xi)$$

De esta manera el movimiento de rotor relativo al campo sincrónico giratorio es:

$$\delta = \delta_0 + \Delta\delta \quad (2.48)$$

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega \quad (2.49)$$

A continuación se muestra la respuesta del sistema a un pequeño impacto de potencia. Para lo cual se supone que la potencia de entrada al generador se incrementa en ΔP , la ecuación de oscilación linealizada es la siguiente.

$$\frac{H}{\pi f_0} \cdot \frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} + D \cdot \frac{d\Delta\delta}{dt} + P_s \cdot \Delta\delta = \Delta P \quad (2.50)$$

$$\frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} + \frac{\pi f_0}{H} D \frac{d\Delta\delta}{dt} + \frac{\pi f_0}{H} P_s \cdot \Delta\delta = \frac{\pi f_0}{H} \Delta P \quad (2.51)$$

Que en términos de la frecuencia y la relación oscilación se tiene:

$$\frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} + 2\xi\omega_n \frac{d\Delta\delta}{dt} + \omega_n^2 \Delta\delta = \Delta u \quad (2.52)$$

Donde:

$$\Delta u = \frac{\pi f_0}{H} \cdot \Delta P \quad (2.53)$$

ξ y ω_n dados por la ecuaciones (2.31) y (2.27) respectivamente. Al aplicar la transformada de Laplace y expresarla en variables de estado tenemos

$$\begin{aligned} x_1 &= \Delta\delta & x_2 &= \Delta\omega = \dot{\Delta\delta} \\ \dot{x}_1 &= x_2 & \dot{x}_2 &= -\omega_n^2 x_1 - 2\xi\omega_n x_2 \end{aligned}$$

Las expresiones anteriores expresadas en su forma matricial tienen la forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\xi\omega_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \Delta u \quad (2.54)$$

Que es lo mismo que:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot \Delta u(t) \quad (2.55)$$

La ecuación anterior es llamada ecuación del sistema forzado, donde x_1 y x_2 son respuesta deseada, el vector salida $y(t)$ es dado por la ecuación (2.39).

Aplicando a transformada de Laplace a la ecuación en variables de estado resulta:

$$sX(s) = A \cdot X(s) + B \cdot \Delta U(s)$$

$$X(s) = (sI - A)^{-1} \cdot B \cdot \Delta U(s)$$

$$\Delta U(s) = \frac{\Delta u}{s}$$

Realizando la correspondiente sustitución $(sI - A)^{-1}$ se tiene:

$$X(s) = \frac{\begin{bmatrix} s + 2\xi\omega_n & 1 \\ -\omega_n^2 & s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \frac{\Delta u}{s}}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

$$\Delta\delta(s) = \frac{\Delta u}{s(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)}$$

$$\Delta\omega(s) = \frac{\Delta u}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

Tomado la transformada inversa de Laplace de las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$\Delta\delta = \frac{\Delta u}{\omega_n^2} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \text{sen}(\omega_d t + \theta) \right]$$

$$\Delta\omega = -\frac{\Delta u}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \text{sen}(\omega_d t)$$

Realizando las correspondientes sustituciones, el comportamiento en función del tiempo del ángulo de potencia y la velocidad angular para un pequeño aumento de potencia en el generador está dado por las ecuaciones (2.56) y (2.57):

$$\delta = \delta_0 + \frac{\pi f_0 \Delta P}{H \omega_n^2} \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot e^{-\xi \omega_n t} \cdot \text{sen}(\omega_d t + \theta) \right] \quad (2.56)$$

$$\omega = \omega_0 + \frac{\pi f_0 \Delta P}{H \omega_n \sqrt{1-\xi^2}} \cdot e^{-\xi \omega_n t} \cdot \text{sen}(\omega_d t) \quad (2.57)$$

2.4 ESTABILIDAD TRANSITORIA [2] [6] [12]

La estabilidad transitoria se refiere a la capacidad de un sistema de potencia de mantener el sincronismo cuando es afectado por una perturbación severa, como un cambio súbito y grande de la carga demandada, pérdida de generación o una falla en elementos del sistema (sistema de transmisión o transformación).

Los estudios de la estabilidad transitoria comprenden los primeros tres segundos después de producida la perturbación. Durante este rango de tiempo el comportamiento del rotor de las máquinas está fuera de todo posible control, produciendo variación de los ángulos de los generadores y grandes oscilaciones de los flujos de potencia, voltajes y otras variables del sistema.

La estabilidad transitoria depende tanto de la operación inicial del sistema, la severidad de la perturbación y de las acciones externas, como la actuación de los interruptores, ya sea para desconectar automáticamente los elementos fallados, o conectar automáticamente elementos auxiliares o para reconectar los elementos una vez extinto el arco. Si la separación angular entre generadores permanece acotada, el sistema mantiene la operación sincrónica y su estabilidad.

El estado de operación posterior a la ocurrencia de una perturbación severa puede ser diferente del estado previo a la perturbación.

La inestabilidad se presenta en la forma de desviación aperiódica debido al insuficiente torque sincronizante, y esto se refiere como la estabilidad de primera oscilación.

Para el estudio de estabilidad transitoria se observan los tres periodos siguientes:

- a).-**Período prefalla:** Es el período de tiempo en el cual el sistema opera bajo condiciones normales, sin ninguna perturbación.
- b).-**Período en falla:** Es el período de tiempo que va desde el inicio de la falla hasta su despeje o eliminación por actuación de las protecciones.
- c).-**Período posfalla:** Es el período de tiempo que va desde que se ha despejado la falla hasta que se logra estabilizar el sistema. Puede ocurrir también que el sistema no logra alcanzar un régimen permanente y pierda sincronismo, en este período se llevan a cabo acciones de restauración de la red, tales como reconexión del elemento fallado, seccionamiento de carga o acciones coordinadas de desconexión simultánea de cargas y generadores.

La experiencia demuestra que es impracticable y no económico diseñar un sistema que no sea capaz de sostenerse frente a cualquier posible perturbación, motivo por lo cual los sistemas eléctricos de potencia deben ser diseñados en base a la probabilidad de ocurrencia de perturbaciones severas.

2.4.1 CRITERIO DE ÁREAS IGUALES [5] [6] [11]

El análisis de estabilidad transitoria en sistemas sencillos puede ser realizado por la aplicación del criterio de áreas iguales. Este método de análisis se utiliza para una rápida predicción de máximas excursiones angulares y límite de estabilidad de un sistema máquina barra infinita, o un sistema conformado por dos máquinas.

El criterio de áreas iguales se basa en la interpretación gráfica de la energía almacenada en las masas rotativas del generador como una ayuda para determinar si la máquina mantiene su estabilidad después de una perturbación.

La ecuación de oscilación para un sistema generador conectado a barra infinita sin considerar el amortiguamiento es.

$$\frac{2H}{\omega_0} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e = P_a \quad (2.58)$$

Donde P_a es la potencia de aceleración, despejando la aceleración angular se tiene:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{2H} \cdot (P_m - P_e) \quad (2.59)$$

Multiplicando la ecuación (2.59) por $2 \left(\frac{d\delta}{dt}\right)$, se tiene:

$$2 \cdot \frac{d\delta}{dt} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = 2 \frac{d\delta}{dt} \cdot \frac{\omega_0}{2H} \cdot (P_m - P_e) \quad (2.60)$$

$$\frac{d}{dt} \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = \frac{d\delta}{dt} \cdot \frac{\omega_0}{H} P_a$$

$$d \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = d\delta \cdot \frac{\omega_0}{H} P_a$$

Integrando ambos lados de la ecuación:

$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{\frac{\omega_0}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} P_a d\delta} \quad (2.61)$$

Al observar la ecuación (2.61) se puede concluir que bajo condiciones de operación en estado estable la potencia de aceleración es cero y en consecuencia la variación del ángulo δ también será cero, al producirse una perturbación, la potencia de aceleración tendrá un valor distinto de cero dando origen a variación en el ángulo δ , lo anterior implica que un sistema estable cumple con la condición.

$$\int_{\delta_0}^{\delta} P_a d\delta = 0 \quad (2.62)$$

En la figura 2.5 se presenta una aplicación práctica del criterio de igualdad de áreas. Se muestra la curva potencia-ángulo de un generador conectado a una barra infinita a través de una reactancia. La potencia mecánica suministrada al generador sufre un paso de incremento de $P_{m1} > P_{m2}$ provocando un desbalance entre las potencias eléctrica y mecánica, causando de esta manera una aceleración del rotor y en consecuencia un incremento del ángulo δ .

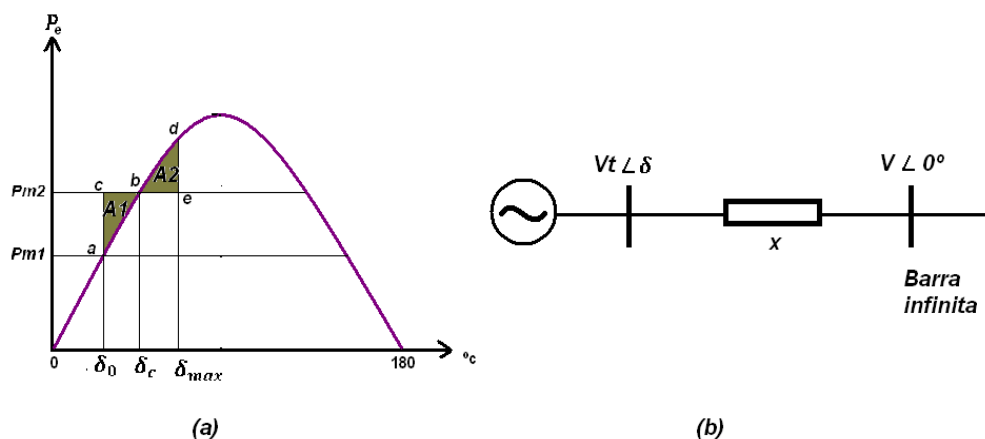


Figura 2.5 (a) Criterio de áreas iguales para incremento de potencia mecánica (b) Sistema generador barra infinita

La energía almacenada en el rotor durante la aceleración inicial es directamente proporcional al A1.

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_{m2} - P_e) d\delta = \text{areaabc} = A1 \quad (2.63)$$

Con el incremento de δ , la potencia eléctrica también aumenta, cuando llega al valor de δ_c la potencia eléctrica iguala la nueva entrada de potencia mecánica P_{m2} , pero debido a la energía almacenada en el rotor la potencia eléctrica P_e continua incrementándose, en este punto la $P_e > P_{m2}$ causando una desaceleración hasta la velocidad sincrónica en la cual $\delta = \delta_{max}$. La energía causante de que el rotor desacelere es proporcional al área A2 sobre la energía mecánica P_{m2} .

$$\int_{\delta_c}^{\delta_{max}} (P_e - P_{m2}) d\delta = \text{areabde} = A2 \quad (2.64)$$

El resultado de esto es que el rotor oscila hasta alcanzar el punto de equilibrio b, en el cual se cumple el valor absoluto de las dos áreas son iguales.

$$|A1| = |A2| \quad (2.65)$$

2.4.1.1 Respuesta ante una falla [6]

Para analizar la respuesta ante una falla de cortocircuito, en general es necesario considerar algunos aspectos tales como el estado de operación del sistema previo a la falla, tipo de falla, tiempo de despeje de falla, acciones de restauración de la red, configuración de la red de transmisión, entre otros.

La severidad de la falla viene dada por el tipo y localización de la misma, es así que la potencia eléctrica transmitida durante el período de falla tendrá un valor relacionado con estos dos aspectos, de igual forma la potencia eléctrica transmitida durante el período pos-falla dependerá de la configuración de la red y las acciones de restauración del sistema. En la figura 2.6 se muestra un sistema de doble circuito de transmisión, y en la figura 2.7 el grado de severidad de diferentes tipos de fallas para dicho sistema.

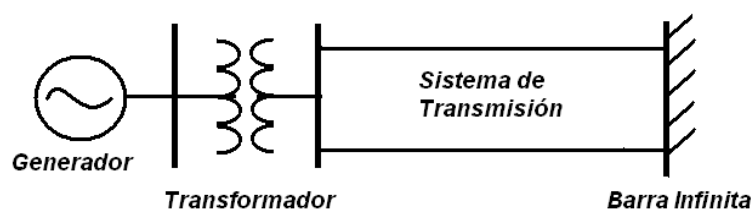


Figura 2.6 Sistema doble circuito

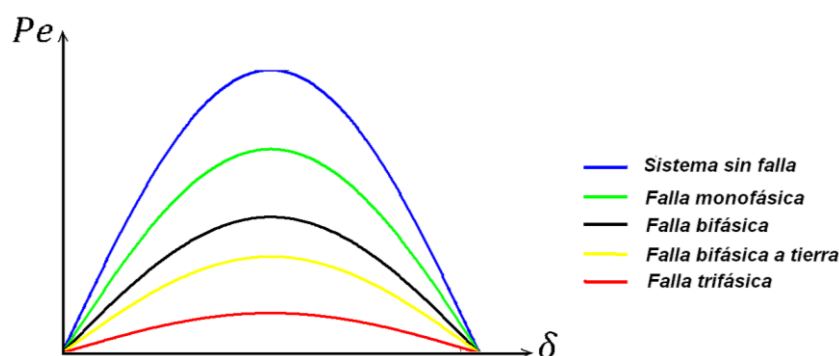


Figura 2.7 Severidad de falla según el tipo

2.4.2 SOLUCIÓN NUMÉRICA DE LA ECUACIÓN DE OSCILACIÓN [4]

El análisis de estabilidad transitoria en un sistema eléctrico de potencia se realiza mediante la solución de las ecuaciones de oscilación de las máquinas del sistema. Debido a la no linealidad de dicho conjunto de ecuaciones diferenciales, resulta imposible una solución cerrada, por lo cual se han aplicado métodos numéricos de predicción, algunos de los cuales se describen brevemente a continuación.

2.4.2.1 Método paso a paso [4] [6]

El método paso a paso fue desarrollado para aplicarlo en un Analizador de Redes y cálculos a mano, es mucho más simple que alguno de los métodos utilizados para cálculos en computadora, como los métodos de Euler o Runge-Kutta. En este método el cambio en la posición angular del rotor durante un corto intervalo de tiempo se calcula bajo las siguientes suposiciones:

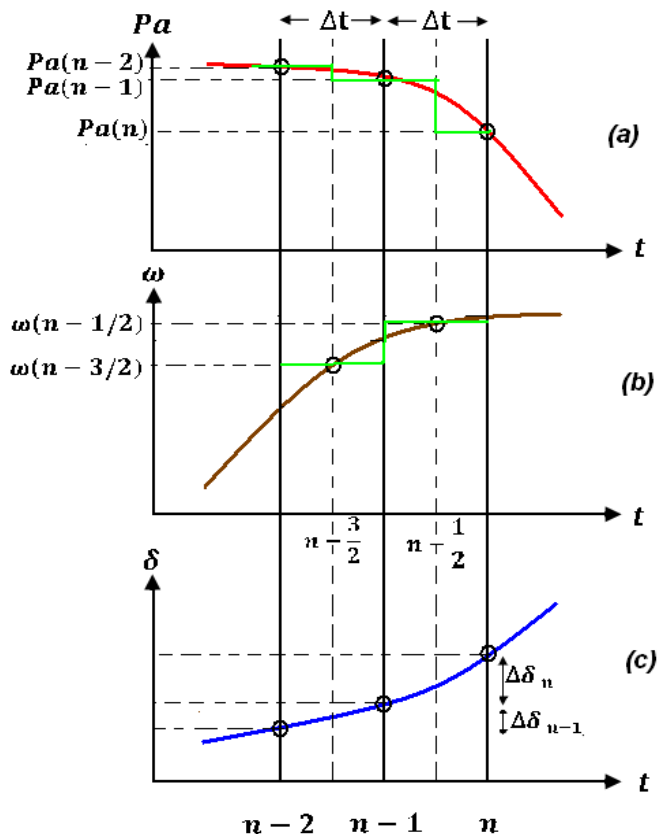


Figura 2.8 Método paso a paso

1. La potencia de aceleración Pa calculada al principio de un intervalo, es constante desde la mitad del intervalo que le precede hasta la mitad del intervalo considerado.
2. A lo largo de cualquier intervalo, la velocidad angular es constante e igual al valor calculado en la mitad del intervalo.

La figura (2.8) ayuda a visualizar estas suposiciones y determina el procedimiento para calcular el valor del ángulo δ en cada intervalo.

Las consideraciones realizadas asumen un movimiento circular uniformemente variado (MCUV) en donde:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \text{constante} \quad (2.66)$$

De la figura 2.7 (b) se escribe la aceleración angular α en términos de las velocidades angulares evaluadas en la mitad de los intervalos:

$$\frac{\omega_{n-1/2} - \omega_{n-3/2}}{\Delta t} = \frac{d^2\delta}{dt^2} = \alpha \quad (2.67)$$

De la figura (c), haciendo uso de la relación entre la variación del ángulo δ y la velocidad angular ω en el movimiento circular uniforme (MCU), se escriben las siguientes relaciones.

$$\omega_{n-\frac{3}{2}} = \frac{\delta_{n-1} - \delta_{n-2}}{\Delta t} = \frac{\Delta\delta_{n-1}}{\Delta t}$$

$$\omega_{n-\frac{1}{2}} = \frac{\delta_n - \delta_{n-1}}{\Delta t} = \frac{\Delta\delta_n}{\Delta t}$$

Al despejar las variaciones angulares y realizar la operación $\Delta\delta_n - \Delta\delta_{n-1}$ se tiene la siguiente ecuación:

$$\Delta\delta_n - \Delta\delta_{n-1} = \left(\omega_{n-\frac{1}{2}} - \omega_{n-\frac{3}{2}} \right) \cdot \Delta t \quad (2.68)$$

De la cual, despejando $\Delta\delta_n$ se obtiene:

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + \left(\omega_{n-\frac{1}{2}} - \omega_{n-\frac{3}{2}} \right) \cdot \Delta t$$

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + \frac{d^2\delta}{dt^2} \cdot \Delta t^2 \quad (2.69)$$

De la ecuación de oscilación se tiene que:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2H} Pa$$

Remplazando esto en la ecuación se obtiene:

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + \frac{\omega_s}{2H} \cdot Pa_{n-1} \cdot \Delta t^2 \quad (2.70)$$

$$k = \frac{\omega_s}{2H} \cdot \Delta t^2 \quad (2.71)$$

Para expresar el ángulo δ en grados eléctricos se tiene que $k = \frac{180f}{H} \cdot \Delta t^2$

Finalmente, las ecuaciones que permite calcular el valor de δ_n en un intervalo son:

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + k \cdot Pa_{n-1} \quad (2.72)$$

$$\delta_n = \delta_{n-1} + \Delta\delta_n \quad (2.73)$$

La variación continua del ángulo δ genera también cambios en Pa y ω puesto que son funciones δ , en consecuencia ninguna de estas suposiciones es verdadera; sin embargo, a medida que Δt es más pequeño la respuesta de δ se aproxima a su curva real.

2.4.2.2 Método de Euler o de las Tangentes [2]

Constituye un algoritmo relativamente sencillo y didáctico aunque poco preciso, se basa en el uso de la derivada de una función evaluada en un punto de operación.

La ecuación de oscilación expresada como dos ecuaciones diferenciales de primer orden se representa por (2.74) y (2.75):

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_s}{2H} (Pm - Pe(\delta)) \quad (2.74)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (2.75)$$

De donde es posible linealizar el recorrido de la curva por medio de intervalos de tiempo Δt pequeños de tal manera que pueda asumirse que:

$$\frac{d\omega}{dt} \approx \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad \text{y} \quad \frac{d\delta}{dt} \approx \frac{\Delta\delta}{\Delta t}$$

$$\Delta\omega = \left[\frac{\omega_s}{2H} (Pm - Pe(\delta)) \right] \cdot \Delta t = \frac{d\omega}{dt} \cdot \Delta t \quad (2.76)$$

$$\Delta\delta = (\omega - \omega_s) \cdot \Delta t = \frac{d\delta}{dt} \cdot \Delta t \quad (2.77)$$

La determinación del valor de las variables δ , ω , Pe se consigue al recorrer una distancia corta (Δt) por la línea tangente, obteniendo de esta manera un punto cercano de la curva de solución de cada una de las variables. El proceso es repetido en el nuevo punto, el subíndice j indica el número de intervalos Δt calculados, de esta manera las fórmulas para las iteraciones son:

$$\omega_{j+1} = \omega_j + \Delta\omega_j = \omega_j + \frac{\omega_s}{2H} Pa_j \cdot \Delta t \quad (2.78)$$

$$\delta_{j+1} = \delta_j + \Delta\delta_j = \delta_j + (\omega_j - \omega_s) \cdot \Delta t \quad (2.79)$$

$$Pa_{j+1} = Pm - Pe(\delta_{j+1}) \quad (2.80)$$

El hecho de calcular δ , ω y Pe al final del intervalo en función de la derivada al comienzo del mismo hace que el método sea poco preciso, cuando $\frac{d\omega}{dt}$ y $\frac{d\delta}{dt}$ cambian con rapidez dentro del intervalo, como se aprecia en la figura (2.8).

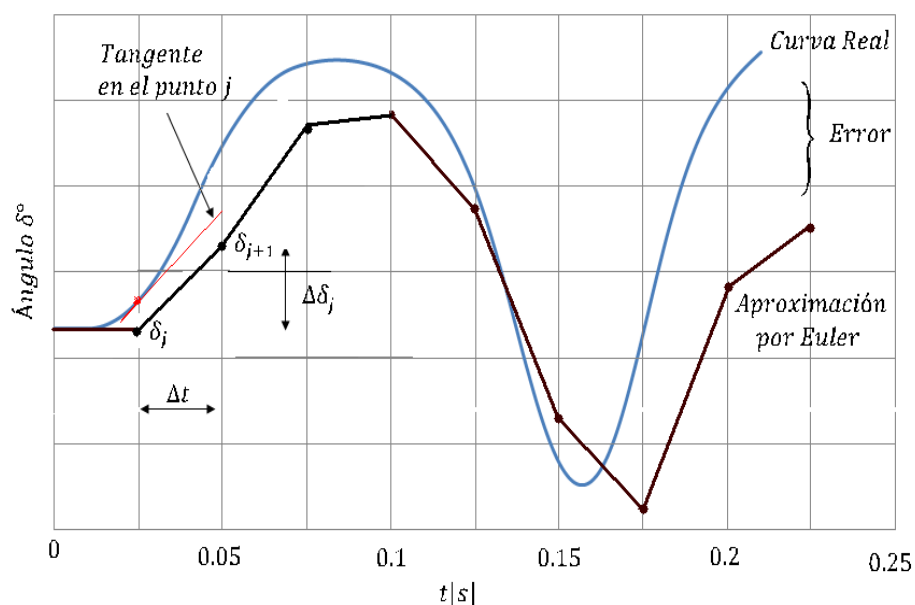


Figura 2.9 Aproximación de Euler para la curva de oscilación ángulo δ

2.4.2.3 Método Runge-Kutta de Cuarto Orden [2] [6]

Este método es uno de los más difundidos y a la vez más exactos en la solución de ecuaciones diferenciales no lineales. El método calcula el valor de la variable al final del intervalo en función del valor conocido al inicio del mismo, y de un promedio ponderado entre dicho valor y algunas estimaciones para puntos intermedios, suposición que mejora bastante la precisión, permitiendo alargar el intervalo de integración Δt con lo cual se reduce el número de veces que hay que resolver las ecuaciones eléctricas algebraicas del sistema.

El método de Runge-Kutta se apoya en la simplificación del desarrollo en serie de Taylor, motivo por el cual es posible considerarlo como un promedio ponderado de cuatro pendientes por cada intervalo Δt y cada variable, en este caso δ , Pe y ω . La figura 2.10 aclara y explica el método.

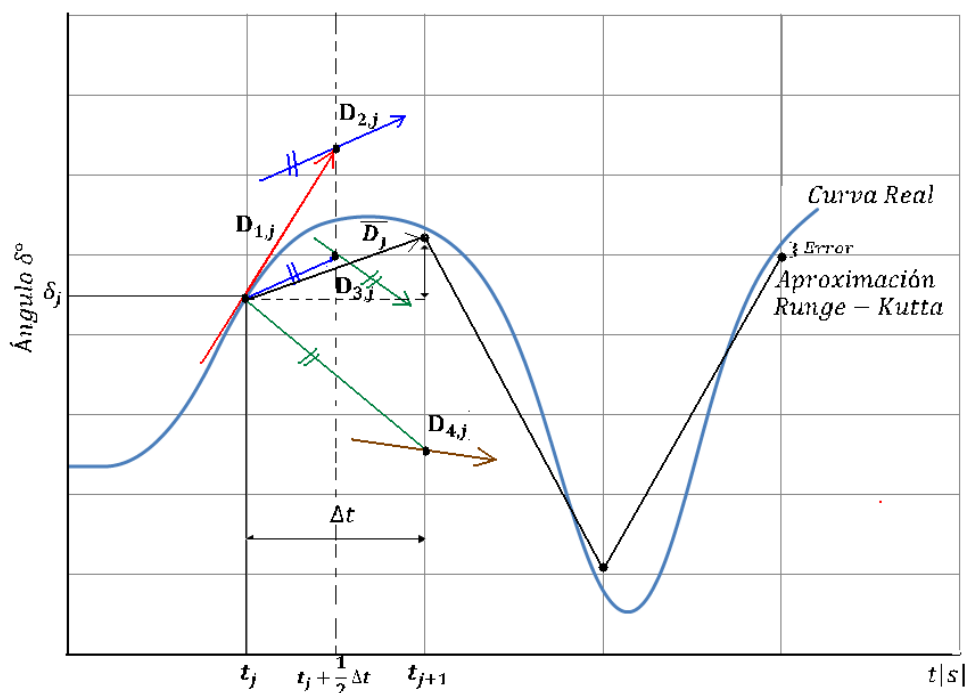


Figura 2.10 Método de Runge-Kutta para la Curva de Oscilación del Ángulo δ

El cálculo de los promedios de las pendientes es realizado por las siguientes ecuaciones:

$$\omega_{j+1} = \omega_j + \frac{1}{6} (W_{1,j} + 2W_{2,j} + 2W_{3,j} + W_{4,j}) \cdot \Delta t \quad (2.81)$$

$$\delta_{j+1} = \delta_j + \frac{1}{6} (D_{1,j} + 2D_{2,j} + 2D_{3,j} + D_{4,j}) \cdot \Delta t \quad (2.82)$$

$$\bar{W}_j = \frac{1}{6} (W_{1,j} + 2W_{2,j} + 2W_{3,j} + W_{4,j}) \quad (2.83)$$

$$\bar{D}_j = \frac{1}{6} (D_{1,j} + 2D_{2,j} + 2D_{3,j} + D_{4,j}) \quad (2.84)$$

Las pendientes D y W son calculadas de la siguiente manera:

$$D_{1,j} = \omega_j - \omega_s \quad (2.85)$$

$$W_{1,j} = \frac{\omega_s}{2H} (Pm - Pe(\delta_j)) \quad (2.86)$$

$$D_{2,j} = \left(\omega_j + \frac{1}{2} \Delta t \cdot W_{1,j} - \omega_s \right) \quad (2.87)$$

$$W_{2,j} = \frac{\omega_s}{2H} \cdot (Pm - Pe(\delta_j + \frac{1}{2} \Delta t \cdot D_{1,j})) \quad (2.88)$$

$$D_{3,j} = \left(\omega_j + \frac{1}{2} \Delta t \cdot W_{2,j} - \omega_s \right) \quad (2.89)$$

$$W_{3,j} = \frac{\omega_s}{2H} \cdot (Pm - Pe(\delta_j + \frac{1}{2} \Delta t \cdot D_{2,j})) \quad (2.90)$$

$$D_{4,j} = \left(\omega_j + \Delta t \cdot W_{3,j} - \omega_s \right) \quad (2.91)$$

$$W_{4,j} = \frac{\omega_s}{2H} \cdot (Pm - Pe(\delta_j + \Delta t \cdot D_{3,j})) \quad (2.92)$$

En donde:

$D_{1,j}$: Pendiente de la curva δ vs t al inicio del intervalo j .

$W_{1,j}$: Pendiente de la curva ω vs t al inicio del intervalo j .

$D_{2,j}$: Pendiente de la curva δ vs t en la mitad del intervalo j , utilizando $W_{1,j}$ para determinar el valor de δ en la mitad del intervalo.

$W_{2,j}$: Pendiente de la curva ω vs t en la mitad del intervalo j , utilizando $D_{1,j}$ para determinar el valor de ω en la mitad del intervalo.

$D_{3,j}$: Pendiente de la curva δ vs t en la mitad del intervalo utilizando $W_{2,j}$ para determinar el valor de δ en la mitad el intervalo.

$W_{3,j}$: Pendiente de la curva ω vs t en la mitad del intervalo j , utilizando $D_{1,j}$ para determinar el valor de ω en la mitad del intervalo.

$D_{4,j}$: Pendiente de la curva δ vs t en el final del intervalo j , utilizando $W_{3,j}$ para determinar el valor de δ en el final del intervalo.

$W_{4,j}$: Pendiente de la curva ω vs t en el final del intervalo j , utilizando $D_{3,j}$ para determinar el valor de ω en el final del intervalo.

j : Intervalo en la secuencia de cálculo.

2.5 DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE DE INERCIA H Y EL COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO D

2.5.1 PRUEBA DE RECHAZO DE CARGA [14]

Las condiciones para realizar la prueba de rechazo de carga son: el generador debe operar con carga a 100% y con excitación nominal. Al momento de la desconexión de la carga la frecuencia se incrementa hasta que los elementos de control de la fuente de energía mecánica reaccionen y regresen la velocidad de la máquina a un valor sobre la nominal y pueda ser llevada al reposo. En esta prueba se toman registros de frecuencia y voltaje de armadura.

2.5.2 CONSTANTE DE INERCIA H [14]

Como se indicó en apartados anteriores el rotor de la máquina síncrona se encuentra en rotación relativa al estator durante su operación, es así que de acuerdo a las leyes del movimiento este cuerpo giratorio presentará una oposición al cambio de su velocidad de rotación, representada por la constante de inercia.

La constante de inercia es la relación entre la energía cinética de todas las partes rotativas dividida para la potencia aparente nominal de la máquina, como lo indica la ecuación (2.93).

$$H = \frac{\frac{1}{2}J \omega_m^2}{S_n} \quad (2.93)$$

Donde:

J es el momento de inercia en $kg \cdot m^2$

ω_m es la velocidad angular mecánica en rad/s

S_n es la potencia nominal aparente en VA

La constante de inercia se determina experimentalmente a partir de los registros de frecuencia de una prueba de rechazo de carga, con aplicación de la ecuación de oscilación del generador expresada como la derivada de la velocidad angular, tal como en la ecuación (2.94).

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_s}{2 \cdot H} (P_m - P_e) \quad (2.94)$$

$$\frac{d(2\pi \cdot f)}{dt} = \frac{2\pi \cdot f_0}{2H} (P_m - P_e)$$

Realizando las simplificaciones correspondientes y despejando la constante de inercia se obtiene la relación.

$$H = \frac{f_0}{2 \cdot \frac{df}{dt}} (P_m - P_e)$$

Si se aproxima la derivada de la frecuencia respecto al tiempo a una variación de frecuencia sobre una variación de tiempo se obtiene la ecuación (2.95).

$$\frac{df}{dt} \approx \frac{\Delta f}{\Delta t}$$

$$H = \frac{\Delta t \cdot f_0}{2 \cdot \Delta f} (P_m - P_e) \quad (2.95)$$

Donde:

H es la constante de inercia, en segundos

P_m es la potencia mecánica en el momento de la desconexión en por unidad

P_e es la potencia eléctrica en el momento de la desconexión en por unidad

f_0 es la frecuencia sincrónica de la máquina en Hz

Δf es la variación de la frecuencia durante la perturbación (prueba) en Hz

Δt es el lapso de tiempo que demora en cambiar la frecuencia durante la perturbación (prueba) en Hz.

2.5.3 PÉRDIDA DE FUERZA MOTRIZ EN VACÍO [6]

La prueba de pérdida de fuerza motriz se realiza con el generador rotando en vacío a voltaje y frecuencia nominales. Ante la desconexión de la alimentación de la fuerza motriz, se produce la reducción paulatina de la velocidad. Durante la prueba se toma el tiempo desde el instante de la desconexión hasta cuando la velocidad del rotor es reducida al 5% de la velocidad sincrónica, como se muestra en la figura (2.11).

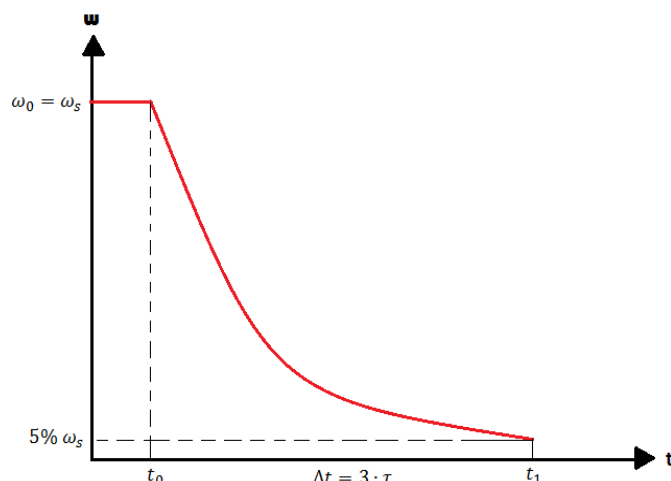


Figura 2.11 Velocidad angular del rotor ante la pérdida de fuerza motriz

El coeficiente de amortiguamiento puede ser determinado partiendo de la ecuación de oscilación, incluyendo el efecto del amortiguamiento.

$$\frac{2 \cdot H}{\omega_s} \cdot \frac{d\omega}{dt} + D\omega = (P_m - P_e) \quad (2.96)$$

Puesto que el generador opera en vacío y la fuerza mecánica se pierde la ecuación resulta:

$$\frac{2 \cdot H}{\omega_s} \cdot \frac{d\omega}{dt} + D\omega = 0 \quad (2.97)$$

Despejando la componente del amortiguamiento al lado derecho de la ecuación e integrando respecto al tiempo se obtiene:

$$\int \frac{d\omega}{\omega} = - \int \frac{\omega_s}{2H} D \cdot dt$$

$$\ln(\omega) \Big|_{\omega_0}^{\omega_1} = - \frac{\omega_s}{2H} \cdot D \cdot t \Big|_0^t$$

$$\omega_1 = \omega_0 \cdot e^{-\frac{\omega_s \cdot D \cdot t}{2H}}$$

$$\omega_1 = \omega_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} ; \tau = \frac{2 \cdot H}{\omega_s D} \quad (2.98)$$

Si la velocidad ω_1 es el 5% de la inicial ω_0 resulta que $\Delta t = 3 \cdot \tau$ llegando a la ecuación 2.99.

$$D = \frac{6 \cdot H}{\Delta t} \quad (2.99)$$

Donde

D es el coeficiente de amortiguamiento en $[pu W] / [pu \frac{rad}{s}]$

H es la constante de inercia, en segundos

ω_s es la velocidad angular sincrónica en por unidad que resulta ser 1

ω_1 es la velocidad angular al instante t_1

ω_0 es la velocidad angular inicial al instante t_0

Δt es el período de tiempo entre t_0 y t_1 en segundos

CAPÍTULO III

3 MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE POTENCIA

El estudio de estabilidad de un sistema eléctrico de potencia se compone de un gran número de variables, entre las cuales se tiene el ángulo de potencia.

El estado o punto de operación del generador sincrónico queda definido al conocer el valor del ángulo de potencia, además la cuantificación del mismo permite conocer la situación del generador frente a otros y de esta manera su nivel de estabilidad en estado estable y su evolución cuando se produzcan perturbaciones en el sistema eléctrico.

El ángulo de potencia δ de la máquina representa la diferencia de fase entre la fuerza magnetomotriz producida por la circulación de corriente directa en el devanado de campo y el flujo resultante en el entrehierro (es decir la combinación de la fuerza magneto motriz del campo y la fuerza magneto motriz de reacción de armadura), como se ilustra en la figura 3.1. Es así que el cambio de carga en un sistema multimáquina implica un reajuste del ángulo δ , éste es un proceso dinámico que va acompañado de un cambio transitorio de la velocidad de giro y de una serie de oscilaciones mecánicas amortiguadas alrededor de su nueva posición, movimiento que se denomina oscilación pendular.

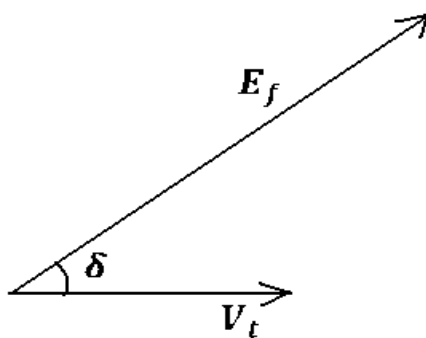


Figura 3.1 Ángulo de potencia

La fuerza magneto motriz de campo se manifiesta como un voltaje inducido en los devanados de estator (voltaje interno E_f) cuando el generador opera en vacío, de igual manera el flujo resultante en el entrehierro se manifiesta como un voltaje inducido en los devanados de estator al operar bajo carga. En condiciones

normales de operación, asumiendo la caída de voltaje en la resistencia del devanado de estator como despreciable y considerando el flujo de dispersión en el inducido como pequeño frente al flujo resultante en el entrehierro, es posible asumir el voltaje inducido por estos campos como igual al voltaje en bornes del generador V_t bajo las condiciones de operación en vacío y bajo carga respectivamente. Lo descrito en el párrafo superior permite definir el ángulo de potencia como la diferencia angular entre dos voltajes: el voltaje interno de la máquina E_{af} y el voltaje en sus terminales V_t .

3.1 METODOLOGÍA APLICADA

La diferencia angular δ entre la fuerza magnetomotriz que produce el flujo del campo y el flujo resultante en el entrehierro, puede ser medida gracias a que la fase de la fuerza magnetomotriz de campo está determinada por la posición del rotor y la fase del flujo resultante está determinada por la onda de voltaje en los terminales del generador.

En la máquina sincrónica la frecuencia de las señales de voltaje y corriente presentes en los devanados de estator está determinada por el número de polos magnéticos de la máquina y la velocidad mecánica de giro del rotor, dicha relación es mostrada en las ecuaciones (3.1) y (3.2).

$$f = \frac{P \cdot \omega_m}{120} \text{ Hz} \quad (3.1)$$

$$\omega_s = \frac{P}{2} \omega_m \quad (3.2)$$

Donde:

ω_s : Velocidad de sincronismo a la cual gira el flujo en el entrehierro en RPM

ω_m : Velocidad mecánica de sincronismo en RPM

P : Número de polos del generador

f : Frecuencia eléctrica de las señales de voltaje y corriente circulantes en los devanados de armadura en Hz

Las relaciones mencionadas en (3.1) y (3.2) así como la definición del ángulo de potencia permiten aplicar una metodología de medición que en la práctica se la realiza mediante la determinación del ajuste o cambio de la posición angular de la

señal de voltaje respecto a la posición del rotor, siguiendo el cambio de carga abastecida por el generador. Este método es conocido como técnica estroboscópica de medición del ángulo de potencia y consiste en la determinación del desfase de tiempo existente entre la detección de la posición de un punto específico del eje de la máquina y el cruce por cero en la subida de la señal de voltaje terminal del generador, tomando como referencia la posición de la señal de voltaje respecto a la posición del rotor en condiciones de carga nula.

Para el desarrollo e implementación de la metodología es necesario considerar los siguientes aspectos:

- El número de pares de polos de la máquina indica el número de ciclos de la señal de voltaje terminal por cada revolución del rotor.
- Cuando la carga del generador es nula, el ángulo δ es cero. El incremento de la carga abastecida por el generador aumenta la magnitud de las corrientes en los devanados del estator y en consecuencia el ángulo δ busca una nueva posición acorde a la potencia generada.

Es así que la implementación del presente proyecto se la realiza en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la FIEE. El generador sincrónico utilizado es de cuatro polos, lo cual implica que por cada giro del rotor se presentan dos ciclos de la señal de voltaje terminal.

La detección del punto en el eje de la máquina se la realiza mediante un sensor óptico, el cual genera una señal eléctrica positiva por cada giro completo del rotor. Asimismo la detección del cruce por cero ascendente de la señal de voltaje terminal es realizada mediante un circuito detector de cruce por cero ascendente, el cual genera un pulso positivo en el instante de detectar el cruce por cero del semi-ciclo positivo de la señal de voltaje, produciendo de esta manera dos pulsos positivos por cada giro del rotor. La forma y ubicación de dichas señales se ilustran en la figura (3.2).

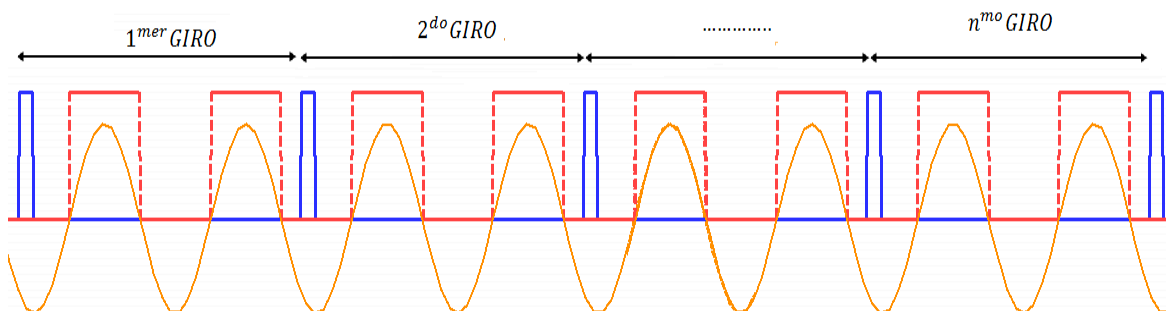


Figura 3.2 Formas de onda asociadas con la posición de rotor (azul) y el detector de cruce por cero ascendentes (rojos)

Lo descrito en los párrafos anteriores implica el acondicionamiento de la señal del estator obtenida del voltaje terminal del generador a la misma frecuencia del rotor, lo cual se logra mediante un divisor de frecuencia en el circuito. La figura 3.3 muestra el principio de medición del ángulo de potencia de manera gráfica, considerando las señales acondicionadas.

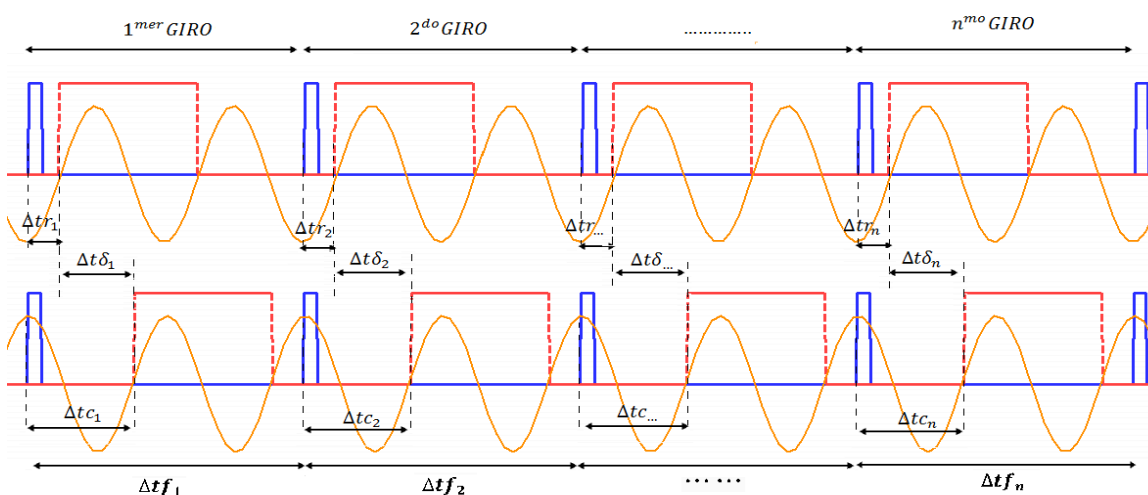


Figura 3.3 Explicación gráfica de la metodología aplicada (a) Funcionamiento en vacío (b) Funcionamiento bajo carga

La aplicación de la metodología consiste en detectar en cada una de las señales los cambios de nivel de voltaje de 0 a 1 "lógicos" y determinar el desfase temporal existente entre la señal de rotor y el estator.

En la figura 3.3 se observa con líneas entrecortadas de color rojo la señal proveniente del circuito detector de cruce por cero ascendente de la señal de voltaje terminal V_{UV} . La señal proveniente del sensor óptico de posición del rotor está representada por la línea continua de color azul. La figura 3.3 (a) representa

la condición de operación en vacío del generador, existe un desfase inicial de tiempo entre ambas señales al operar el generador en vacío, este desfase es tomado como referencia de vacío es decir representa el ángulo $\delta = 0$, a partir de éste se mide el ángulo de potencia bajo condiciones de carga. La figura 3.3 (b) representa la condición de operación bajo carga del generador, es resultado de la nueva posición a la que llega la onda de voltaje respecto a la posición del rotor al producirse un aumento de carga en el generador.

El principio aplicado para la medición del ángulo de potencia mostrado en la figura 3.3, identifica las variables necesarias para la determinación del ángulo de potencia. Es indispensable recordar que los tiempos de las señales utilizadas están medidos a velocidad mecánica, de donde es necesario multiplicar por dos (por ser un generador de cuatro polos) para llevarlos a valores eléctricos. Las siguientes relaciones permiten el cálculo:

$$\Delta t\delta_i = \Delta tc_i - \Delta tr_i \quad (3.3)$$

$$\begin{array}{ccc} 2 \cdot \Delta tf_i & \dots & 2 \cdot 360^\circ \\ \vdots & \nearrow & \vdots \\ 2 \cdot \Delta t\delta_i & \dots & ? \delta \text{ eléctricos} \end{array}$$

$$\delta_i = 360 \cdot \frac{4 \cdot \Delta t\delta_i}{2 \cdot \Delta tf_i} [^\circ] \quad (3.4)$$

$$\delta_i = 360 \cdot 2 \cdot \frac{\Delta t\delta_i}{\Delta tf_i} [^\circ] \quad (3.5)$$

Donde:

δ_i : Es el ángulo de potencia para operación bajo carga.

Δtr_i : Tiempo de referencia, es el desfase temporal entre la señal de posición del rotor y el cruce por cero ascendente de la señal de voltaje, tomado en operación en vacío estable, este representa la referencia para $\delta = 0$.

Δtc_i : Tiempo de carga, es el desfase temporal entre la señal de posición del rotor y el cruce por cero ascendente de la señal de voltaje, tomado en operación bajo carga.

Δtf_i : Tiempo de frecuencia, es el tiempo que demora el rotor en dar una vuelta.

$\Delta t\delta_i$: Tiempo de ángulo de potencia, es la diferencia entre el tiempo de carga y el tiempo de referencia.

La ecuación (3.5) permite determinar el ángulo de potencia para un instante de tiempo. Si los cálculos son realizados de manera continua para cada ciclo de la señal de voltaje terminal del generador es posible monitorear el comportamiento del ángulo de potencia en tiempos discretos dados por la relación $n \cdot \Delta t_f$.

3.2 DISEÑO DE UN PROTOTIPO MEDIDOR DEL ÁNGULO DE POTENCIA

La medición del ángulo de potencia en este proyecto es realizada mediante la implementación de dos circuitos detectores, un dispositivo de adquisición de datos y una aplicación desarrollada en LabVIEW.

Los circuitos utilizados generan señales eléctricas que permiten determinar la posición del rotor y la fase del voltaje terminal del generador. Estas señales eléctricas son asociadas con la fuerza magneto motriz y flujo entre las cuales se presenta el ángulo de potencia mediante la metodología planteada en el apartado anterior. Las señales son muestreadas para la determinación del desfase entre ellas y su ingreso al computador por medio de una tarjeta de adquisición de datos. Las señales adquiridas son procesadas mediante herramientas propias de LabVIEW, para finalmente desplegar la medición efectuada en una interface de la aplicación desarrollada.

El proceso llevado a cabo por el prototipo medidor del ángulo de potencia es mostrada mediante el diagrama de bloque en la figura 3.4. La descripción de cada uno de los componentes utilizados en el prototipo medidor de ángulo es desarrollado a continuación.

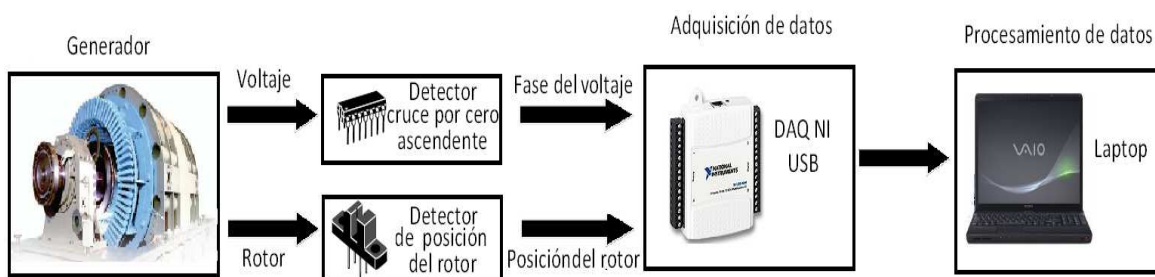


Figura 3.4 Diagrama de bloques de prototipo medidor ángulo de potencia

3.2.1 DETECTOR DE POSICIÓN DEL ROTOR

Este dispositivo permite obtener una señal eléctrica asociada con la posición del rotor, dicha señal es tomada como la onda de fuerza magneto motriz generada por el devanado de campo de la máquina.

El movimiento de dicha onda, determinado por la posición del rotor, es producido mediante un sensor óptico de rayos infrarrojos por reflexión ubicado en la parte inferior del acople generador-motor y una marca reflejante de color blanco adherida en dicho acople, de tal manera que esta marca gira conjuntamente con el rotor.

La operación del dispositivo consiste en detectar la marca y utilizarla como referencia, de tal manera que cuando el generador se encuentra operando la detección realizada por el sensor óptico produce un tren de pulsos cuya frecuencia dependerá de la velocidad mecánica de rotación. Esta señal es asociada con la f.m.m. de campo permitiendo de esta manera tener una señal asociada a la posición del campo giratorio del rotor. La configuración de este dispositivo es ilustrada en la figura 3.5.

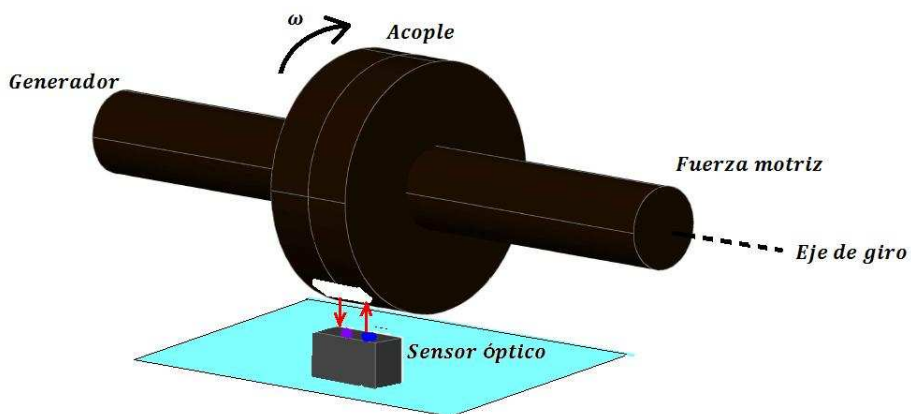


Figura 3.5 Detector posición del rotor

La figura 3.6 muestra el esquemático del circuito implementado para la detección de posición del rotor.

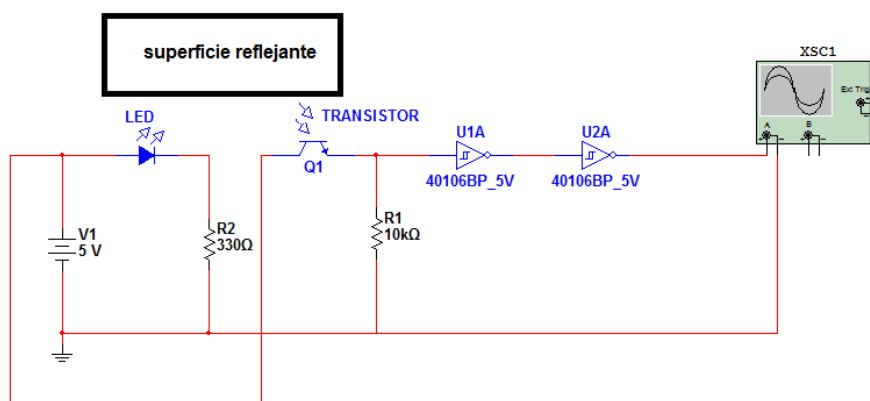


Figura 3.6 Esquemático del circuito detector de posición del rotor

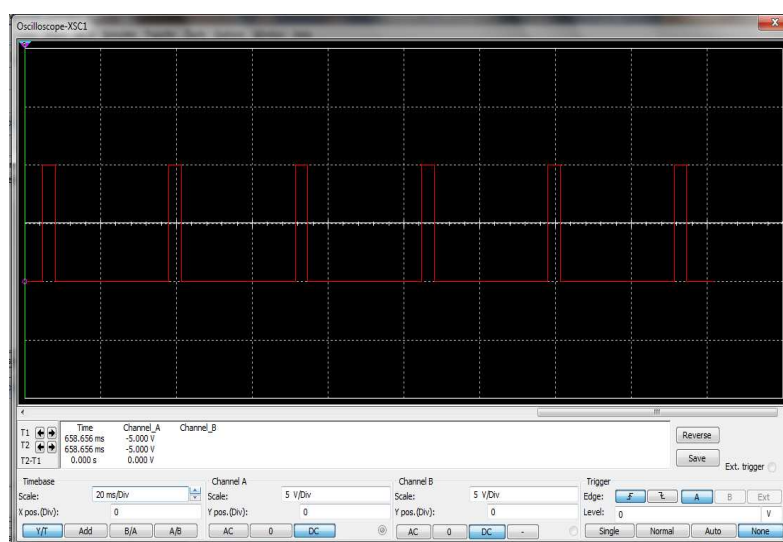


Figura 3.7 Señal proveniente del circuito detector de posición del rotor

El circuito utiliza un Optosensor por reflexión CNY70, el cual cuenta con un diodo emisor de rayos infrarrojos y con un fototransistor receptor, ubicados en paralelo de tal manera que cuando un cuerpo reflejante se ubica delante del par emisor-receptor produce la reflexión de rayos infrarrojos hacia el receptor, haciendo que el fototransistor conduzca. Su utilidad radica en detectar el paso de un cuerpo, en este caso un punto del acople entre el generador y motor, permitiendo la obtención de la posición del rotor. El integrado 40106 es un inversor Schmitt triggers, utilizado para el acondicionamiento de la señal proveniente del sensor óptico a una forma cuadrada con flancos definidos y así obtener una señal a nivel TTL. La figura 3.7 muestra el tren de pulsos provenientes del circuito detector de posición del rotor.

3.2.2 DETECTOR DE CRUCE POR CERO ASCENDENTE

Este dispositivo permite obtener una señal eléctrica asociada con la posición de la fuerza magneto motriz resultante en el entrehierro bajo la operación en vacío y con carga del generador. Consiste en la generación de un pulso positivo cuando la señal de voltaje entre dos de los terminales del generador cambia de niveles de voltaje negativos a positivos en cada uno de los ciclos, es así que la señal obtenida de este circuito constituye un tren de pulsos asociados con la señal de voltaje terminal del semi-ciclo positivo. La figura 3.8 muestra el esquemático del circuito implementado para la detección del cruce por cero ascendente de la señal de voltaje terminal del generador. La figura 3.9 muestra el resultado del circuito detector de cruce por cero ascendente. Se observa que la detección del cruce por cero produce un pulso cuadrado en fase con el semi-ciclo positivo de la señal de voltaje de la máquina.

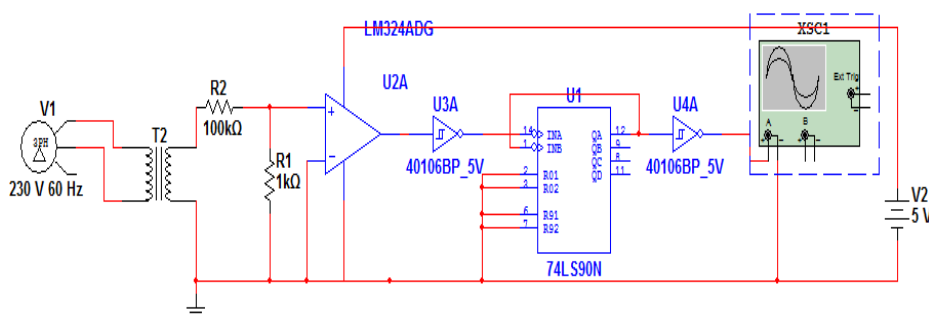


Figura 3.8 Esquemático del circuito detector de cruce por cero ascendente

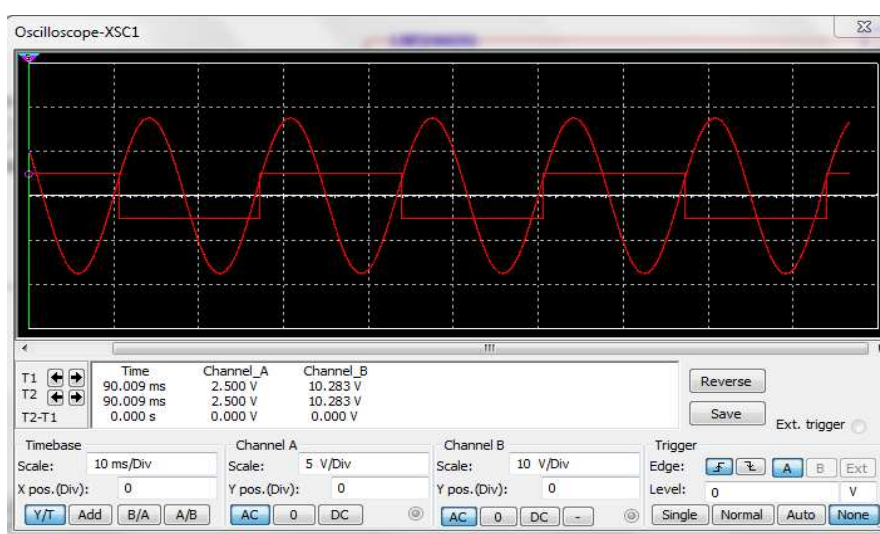


Figura 3.9 Señal obtenida del circuito detector de cruce por cero ascendente

La señal de voltaje terminal es tomada por el transformador reductor de relación 220/12 V, proporcionando una señal de +12/-12 V al circuito detector de cruce por cero. Esta señal pasa por el divisor de voltaje resistivo obteniéndose un voltaje en el orden de mV, el cual es apto para ser comparado mediante el amplificador operacional LM324, produciendo un pulso positivo por cada semi-ciclo positivo de la onda de voltaje, mediante la compuerta BD40106 se invierte la señal para su ingreso al divisor de frecuencia (contador binario 74LS90), para finalmente obtener una señal de la misma frecuencia que la señal asociada con la posición del rotor. Esta señal es acondicionada por el integrado 40106 inversor Schmitt trigger para obtener una señal a nivel TTL. La forma de onda obtenida en la simulación es mostrada en la figura 3.9, se puede apreciar que la generación de pulsos por el circuito cubre el tiempo de un ciclo de la señal de voltaje terminal.

3.2.3 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS MULTIFUNCIÓN NI myDAQ

El presente proyecto tiene como uno de sus objetivos específicos la utilización de un dispositivo de adquisición de datos para señales analógicas. Teniendo en cuenta este requerimiento se ha seleccionado la tarjeta de adquisición myDAQ de National Instruments, la cual por sus características y facilidad de transporte presenta una solución óptima para la adquisición de señales, referirse a la figura 3.10.

NI-myDAQ es un dispositivo de adquisición de datos que usa NI-LabVIEW como instrumento de software, permite medir y analizar señales analógicas y digitales. NI-myDAQ es ideal para monitoreo de circuitos electrónicos y toma de medidas en sensores. Al combinar este dispositivo con una aplicación de LabVIEW se puede analizar y procesar señales adquiridas, además permite controlar procesos simples en cualquier lugar.

NI-myDAQ es una potente herramienta para uso en investigación, puesto que provee entradas analógicas (AI), salidas analógicas (AO), entradas y salidas digitales (DIO), entrada/salida de audio, fuentes de alimentación y multímetro digital (DMM) en un solo dispositivo compacto tipo USB.

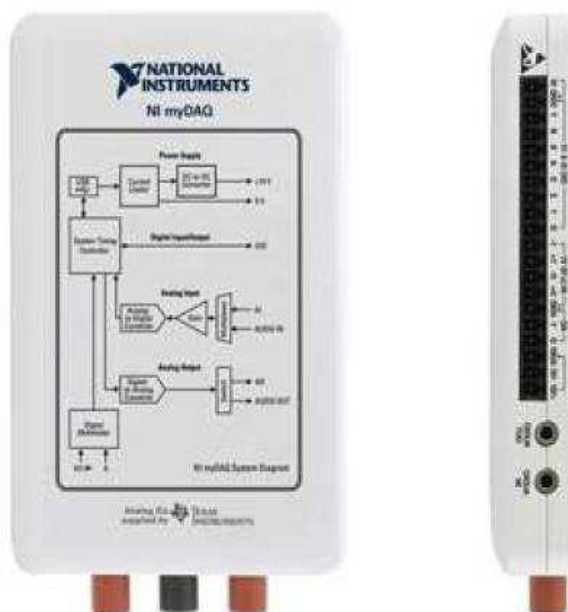


Figura 3.10 NI myDAQ

3.2.3.1 Entradas analógicas (AI)

NI myDAQ cuenta con dos entradas analógicas, estos canales pueden ser configurados para propósitos generales como entrada de voltaje o como entradas de audio.

Las entradas analógicas son multiplexadas, lo cual quiere decir que se usa un solo convertidor análogo-digital para los dos canales. En modo de propósito general, se pueden realizar mediciones en el rango de ± 10 V de las señales. En modo de audio, los dos canales representan la entrada derecha e izquierda de estéreo.

Las entradas analógicas pueden realizar mediciones de 200kS/s por canal, para la adquisición de formas de onda. Estas entradas analógicas son usadas en los NI ELVISmx Oscilloscope, Dynamic Signal Analyzer, y Bode analizar instruments, las cuales son herramientas tipo Express de LabVIEW para el desarrollo de aplicaciones de acceso rápido.

3.2.3.2 Salidas analógicas (AO)

NI myDAQ cuenta con dos salidas analógicas, estos canales pueden ser configurados para propósitos generales o salidas de audio. Ambos canales tienen un convertidor analógico-digital dedicado, por lo cual pueden ser utilizados

simultáneamente. El modo de propósito general permite generar señales en el rango de $\pm 10V$. El modo de audio presenta salidas de estéreo derecha e izquierda.

Las salidas analógicas pueden ser generadas hasta 200kS/s por canal, produciendo de esta manera una excelente forma de onda de la señal generada.

3.2.3.3 Entradas y salidas digitales (DIO)

NI myDAQ cuenta con ocho entradas y salidas digitales, cada línea es una función programable de interface, esto significa que puede ser configurado como una salida o entrada de propósito general o puede actuar como contadores digitales.

3.2.3.4 Fuentes de poder

NI myDAQ cuenta con tres fuentes, las dos primeras son de $+15V$, $-15V$ respectivamente, éstas pueden ser usadas para alimentar componentes como amplificadores operacionales. La tercera fuente es de $+5V$ puede ser usada para alimentación de componentes digitales como compuertas lógicas. La potencia suministrable por las fuentes esta en el rango de 100 a 500 mW.

3.2.3.5 Multímetro digital (DMM)

La NI myDAQ DMM provee las funciones de medición de voltaje DC y AC, corriente DC y AC, resistencia, y voltaje de ruptura de un diodo. Las mediciones del DMM son cronometradas por software, los valores son muestreados y cargados al computador por medio de la conexión USB.

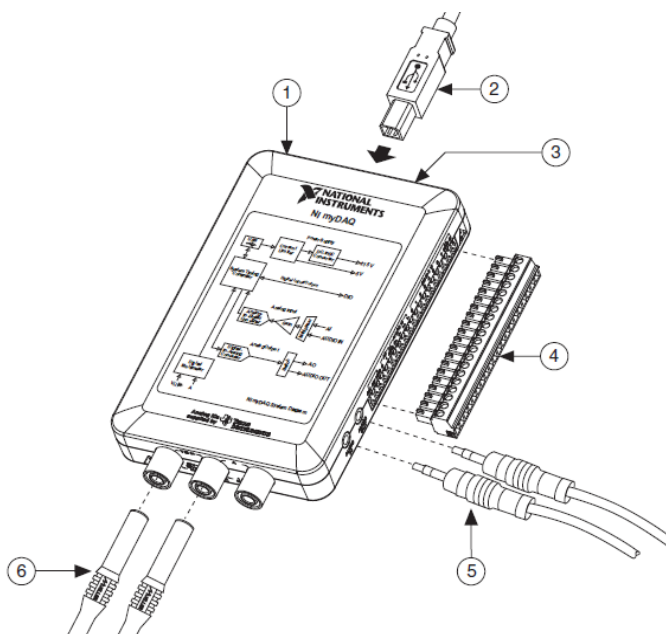


Figura 3.11 NI myDAQ Diagrama de conexión y equipo

- 1.- NI my DAQ
- 2.- Cable de conexión USB
- 3.- Indicador luminoso LED
- 4.- Terminales de conexión
- 5.- Cables de Audio
- 6.- Cables de Multímetro digital (DMM)

3.3 PROGRAMA COMPUTACIONAL LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) es un lenguaje de programación gráfico desarrollado por National Instruments, similar a lenguajes tradicionales como C, C++ o Visual Basic; sin embargo, la diferencia entre LabVIEW y éstos radica en el tipo de lenguaje de programación, los lenguajes tradicionales basan la programación en comandos de texto para crear líneas código, mientras que LabVIEW usa una programación gráfica basada en lenguaje G para crear programas en forma de diagramas de bloque.

LabVIEW constituye una herramienta de propósito general, que permite diseñar interfaces de usuario mediante una consola interactiva basada en software, además cuenta con una extensa cantidad de bibliotecas para cualquier tarea de programación, incluyendo adquisición de datos (DAQ), análisis y presentación de datos, almacenamiento de datos, buses de interface de propósito general (GPIB), y control serial de instrumentos.

LabVIEW es a la vez compatible con herramientas de desarrollo similares y puede trabajar con programas de otras áreas de aplicación. Tiene la ventaja de que permite una fácil integración con todo tipo de hardware, específicamente con tarjetas de medición, adquisición y procesamiento de datos (incluyendo adquisición de imágenes), razón por la cual una de sus principales aplicaciones es en sistemas de medición, monitoreo y control de procesos.

3.3.1.1 Flujos de datos y Lenguaje de programación gráfico

La programación gráfica elimina una gran cantidad de detalles sintácticos asociados con los lenguajes basados en texto, de esta manera el desarrollo de un programa se concentra en el flujo de datos dentro de la aplicación. Debido a la simplicidad de la sintaxis gráfica, es posible visualizar que hace el programa durante su ejecución. La ejecución está basada en el principio de flujo de datos en la cual la función se ejecuta solamente después de recibir los datos necesarios.

LabVIEW usa terminología, iconos e ideas familiares con científicos e ingenieros, representados en símbolos gráficos, iconos equivalentes a un comando o acción dentro del programa.

Los programas en LabVIEW son llamados instrumentos virtuales VI's debido a su apariencia y operación la cual imita a los instrumentos reales, sin embargo VI's son similares a las funciones de lenguajes de programación convencionales. LabVIEW permite una programación modular, esto quiere decir que se puede dividir una aplicación en una serie de tareas que pueden ser divididas hasta que una aplicación complicada llega a ser una serie de simples sub-tareas (SubVI).

Cada VI de LabVIEW cuenta con dos interfaces: panel frontal y diagrama de bloques, que tienen paletas con los objetos necesarios para implementar tareas.

3.3.1.1.1 El panel frontal

El panel frontal es el entorno donde se diseña la interfaz de usuario de un VI, es llamado de esta manera debido a su similitud con el panel frontal de un instrumento real. El panel frontal puede contener controles usados como entradas e indicadores utilizados como salidas, en el programa se puede ingresar datos usando el mouse o el teclado, realizar acciones mediante botones de presión o deslizantes, visualizar de forma gráfica el comportamiento de varias mediciones, ver y guardar resultados.

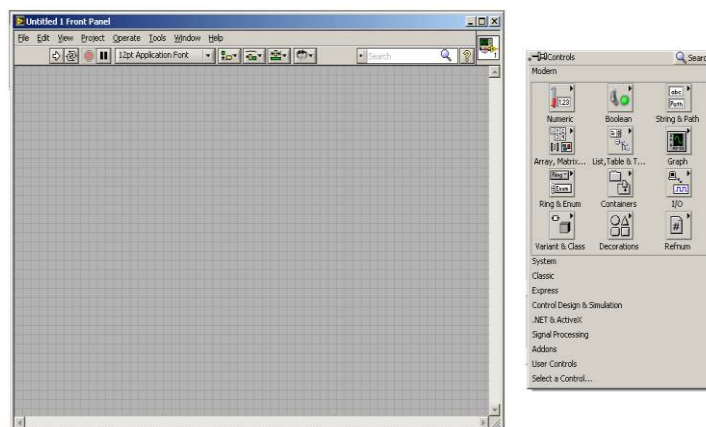


Figura 3.12 Panel frontal de LabVIEW y paleta de controles

3.3.1.1.2 El diagrama de bloques (funciones)

El diagrama de bloques es el código fuente del programa, es el algoritmo que ilustra la solución a un problema de programación. El diagrama de bloques se construye en lenguaje G, uniendo los objetos, funciones, constantes y controles de ejecución de programa, por medio de líneas para definir el flujo de datos entre ellos. Los objetos del panel frontal tienen su correspondiente terminal en el diagrama de bloques para permitir el paso de datos entre el programa y el usuario.

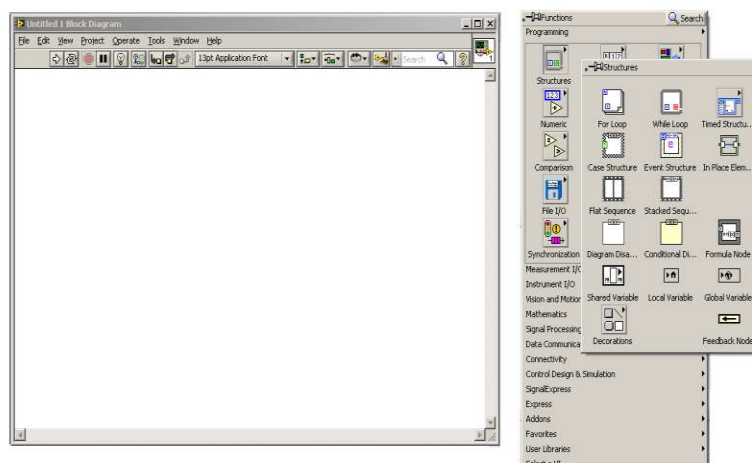


Figura 3.13 Diagrama de bloques y paleta de funciones de programación gráfica

3.3.2 APLICACIÓN DESARROLLADA EN LabVIEW

El desarrollo y diseño de la aplicación de adquisición y procesamiento de datos para la medición del ángulo de potencia están basados completamente en el lenguaje de programación gráfico de LabVIEW. La medición y presentación de dicho ángulo toma en cuenta la metodología explicada en el apartado 3.1, es decir permite la medición del ángulo mediante la determinación del desfase temporal existente entre las señales provenientes de los circuitos detectores de posición de rotor y detector de cruce por cero ascendentes. Estas señales son muestreadas e ingresadas al computador por medio de la tarjeta de adquisición de datos tipo USB.

Previo al desarrollo de la aplicación es necesaria la configuración y verificación de la instalación del hardware, proceso realizado mediante el software NI-MAX que es una parte de LabVIEW. Una vez realizada la instalación y reconocimiento del hardware (DAQ), puede ser utilizado en cualquier aplicación desarrollada en LabVIEW. A continuación se describe el funcionamiento de la aplicación, los controles e indicadores empleados para la medición del ángulo en software.

3.3.2.1 Funcionamiento de la aplicación VI

La figura 3.14 muestra el diagrama de flujo de la aplicación desarrollada en LabVIEW para la medición del ángulo de potencia.

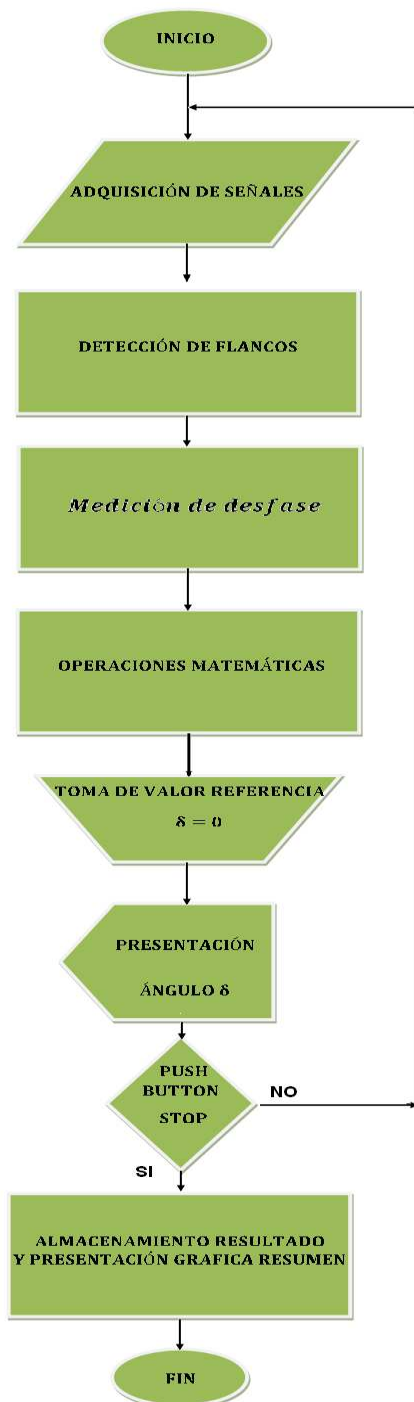


Figura 3.14 Diagrama de flujo aplicación desarrollada en LabVIEW para la medición de ángulo de potencia

Al ejecutar la aplicación se inicia la adquisición de las dos señales, mediante una herramienta propia de myDAQ y LabVIEW se detecta en cada una de éstas el cambio de nivel de voltaje desde el 0 a 1 “lógicos”, es decir los flanco positivos para determinar la diferencia de tiempo entre estos flancos, obteniendo así el desfase temporal entre la señal de rotor y estator. Luego se determina el período de la señal proveniente del circuito detector de cruce por cero ascendentes de la señal de voltaje terminal. Obtenidos estos valores se aplica la ecuación (3.5). que permiten la determinación del ángulo δ en grados eléctricos.

Al aplicar la metodología es necesario tomar la referencia de vacío para $\delta=0$, a partir de la cual se realiza la medición y finalmente puesto que el proceso debe ser repetido para cada ciclo de la señal de voltaje se utiliza un lazo de repetición While, el cual se ejecuta hasta que la condición de parada se cumpla.

3.3.2.2 Controles e indicadores utilizados en la aplicación VI

El panel frontal permite la visualización en tiempo real del ángulo δ , desplegado en una gráfica de forma de onda y mediante un indicador de aguja es posible observar el valor medido.

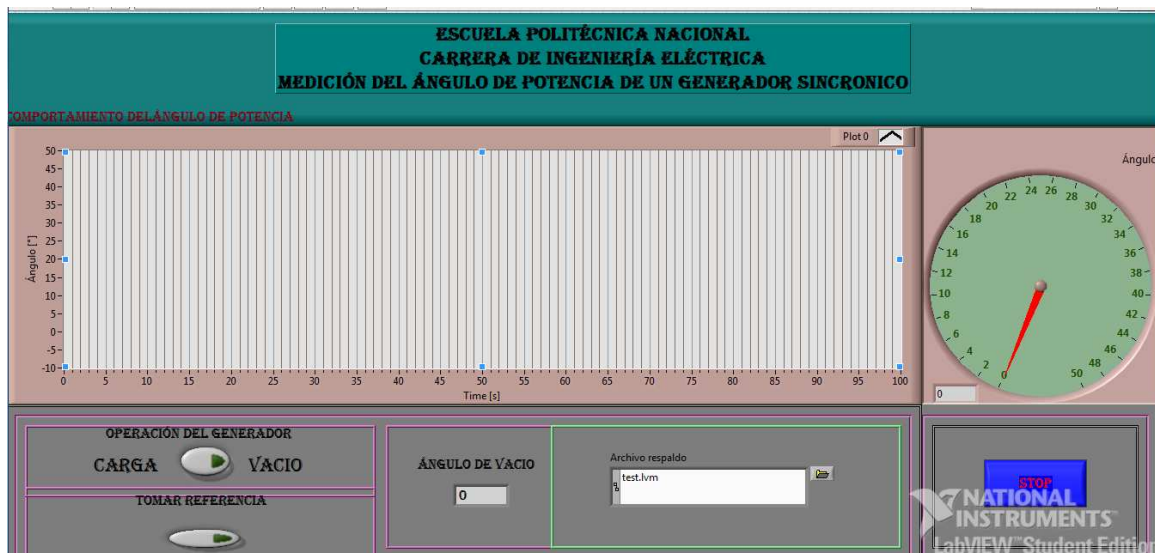


Figura 3.15 Panel frontal Programa “Medición de ángulo de potencia de un generador sincrónico”

La captura del valor referencia de funcionamiento en vacío se realiza mediante dos botones el de vacío, el cual indica que el generador opera sin carga y el de tomar referencia, el cual permite capturar el valor de referencia.

La ejecución de estos dos botones permite la captura y almacenamiento del valor de referencia a partir del cual se realiza la medición del ángulo bajo carga.

El panel frontal también cuenta con la dirección del archivo file-path, el cual permite especificar el nombre y ubicación del archivo de texto resumen, el cual es generado automáticamente al presionar el botón STOP, destinado a terminar la ejecución de la aplicación.

3.3.2.3 Funciones de LabVIEW utilizados en la aplicación VI

El diagrama de bloques mostrado utiliza herramientas propias de LabVIEW para el desarrollo de la medición. La medición se presenta en tiempos discretos de 1 segundo, debido a la utilización de la función de medición de tiempo que toma las muestras adquiridas por la tarjeta durante un segundo.

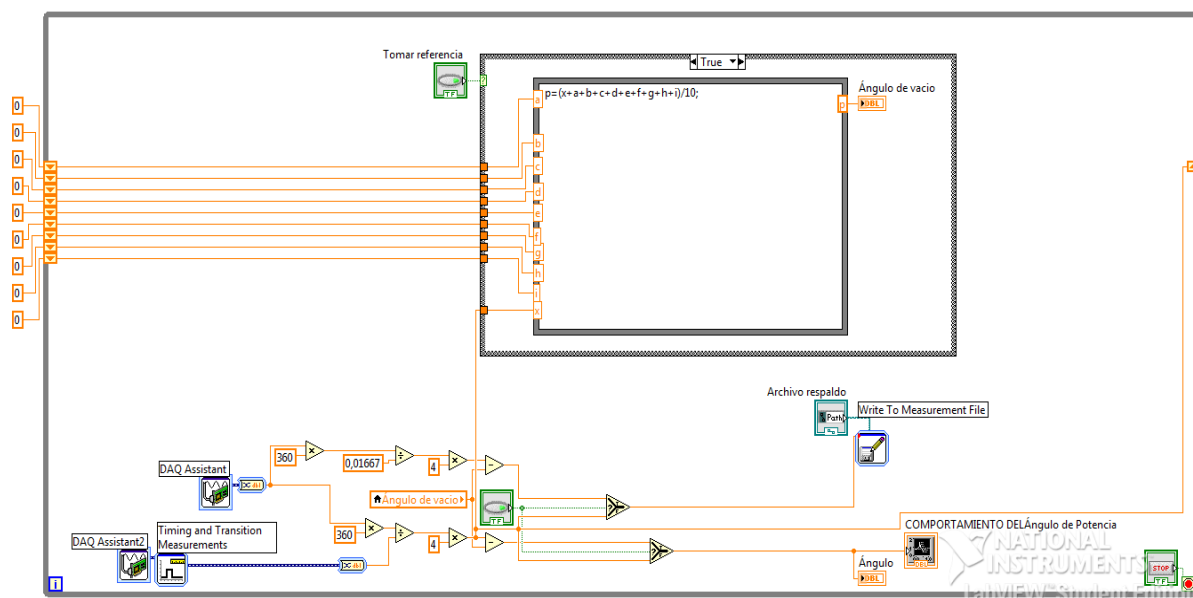

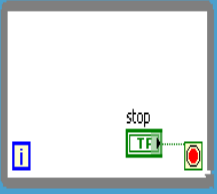
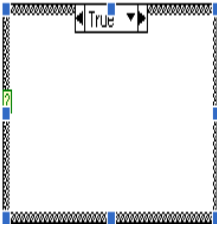

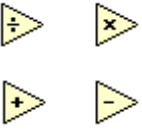






Figura 3.16 Diagrama de bloque Programa “Medición de ángulo de potencia de un generador sincrónico”

En la tabla 3.1 se presenta una breve descripción de las funciones utilizadas en la aplicación.

Tabla 3.1 Descripción de las funciones del VI

| Funciones de LabVIEW utilizados en el VI | |
|---|--|
| Función | Descripción |
|  | Función de Adquisición de datos Express: ésta permite la adquisición o generación de señales analógicas y digitales en una aplicación, mediante la previa configuración de la misma. |
|  | Estructura While Loop: es un ciclo de repetición repite las acciones que contiene en su interior hasta que una condición determinada se cumpla. |
|  | Estructura Case: posee varios subdiagramas denominados casos de los cuales sólo se ejecuta uno, esta estructura equivale a una función IF o SWITCH de los lenguajes convencionales. |
|  | Estructura Nodo de formula: es una caja donde se alojan formulas matemáticas y lógicas para su evaluación y ejecución, cuenta con terminales de entrada y salida que deben ser declarados en los lados de la caja. |
|  | Operaciones matemáticas: LabVIEW permite la aplicación de operaciones matemáticas a diferentes tipos de datos, esto se lo realiza mediante los iconos de suma, resta, multiplicación y división. |
|  | Nodos de conversión de datos dinámicos: permite la conversión de datos dinámicos hacia datos de doble precisión y viceversa. |
|  | Función de selección: permite la selección de entre dos datos colocados en su entradas T y F, dependiendo del valor de verdad en la entrada S. |

| | |
|---|---|
|  <p>Write To Measurement File Signals</p> | <p>Función de escritura en un archivo de medida: permite guardar datos obtenidos en una medición o proceso en un archivo de texto destinado por el usuario.</p> |
|  <p>Timing and Transition Measurements</p> | <p>Función de medición de tiempo y transición: permite realizar mediciones temporales en una señal tales como periodo, frecuencia, ancho de pulso.</p> |
| | |

CAPÍTULO IV

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo está dedicado a la presentación y análisis de los resultados obtenidos en la medición del ángulo de potencia utilizando el sistema descrito en el Capítulo 3. La medición es realizada para diferentes condiciones operativas, como son el estado estable en vacío y con carga, el aumento y la disminución de carga.

Con el propósito de validar las mediciones obtenidas para el estado estable, cada una es comparada con su respectivo valor calculado de ángulo de potencia para las condiciones especificadas.

Las pruebas de medición de ángulo de potencia se realizaron en el generador ubicado en la Mesa N°4 del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la FIEE. En la tabla 4.1 se anota algunas de las características eléctricas de dicho generador.

Tabla 4.1 Generador Mesa N°4

| | | | |
|-----------------|-----|------------------|------|
| Voltaje [V ~] | 230 | Corriente [A ~] | 8,7 |
| Potencia [kVA] | 3,5 | Cos (θ) | 0,8 |
| Frecuencia [Hz] | 60 | Velocidad [RPM] | 1800 |

Los valores de voltaje, corriente y potencia fueron tomados de la placa del generador y son usados como valores base para todos los cálculos realizados en por unidad. La reactancia de eje directo del generador y la reactancia de eje en cuadratura necesaria para los cálculos de validación de resultados, es determinada a partir de la prueba de deslizamiento. La constante de inercia y el coeficiente de amortiguamiento son determinados a partir de pruebas de rechazo de carga y pérdida de fuerza motriz en vacío, respectivamente.

a) *Prueba de circuito abierto*

La prueba de circuito abierto se realiza bajo las especificaciones detalladas en el apartado 1.4.4.1 del Capítulo I, obteniéndose los resultados indicados en la tabla 4.2, a partir de los cuales se determina la característica de circuito abierto y la recta de regresión para la línea de entrehierro.

Tabla 4.2 Característica de circuito abierto

| Voltaje terminal V_t [V_{ac}] | Corriente de campo I_f [A_{dc}] |
|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 5,2 | 0 |
| 68,5 | 0,22 |
| 80,1 | 0,28 |
| 100,6 | 0,34 |
| 120,8 | 0,42 |
| 134 | 0,46 |
| 140,4 | 0,48 |
| 149 | 0,52 |
| 160 | 0,57 |
| 170,2 | 0,58 |
| 180,4 | 0,63 |
| 182,8 | 0,64 |
| 190,4 | 0,68 |
| 194,3 | 0,69 |
| 201 | 0,73 |
| 210,1 | 0,78 |
| 220,2 | 0,81 |
| 230 | 0,86 |

| | |
|-------|------|
| 240,2 | 0,9 |
| 250 | 0,95 |
| 259,4 | 1 |

b) *Prueba de corto circuito*

La prueba de cortocircuito se realiza bajo las especificaciones detalladas en el apartado 1.4.4.2 del Capítulo I, obteniéndose los resultados indicados en la tabla 4.3, a partir de los cuales se determina la característica de cortocircuito y su recta de regresión.

Tabla 4.3 Característica de cortocircuito

| Corriente de cortocircuito I_a [A_{ac}] | Corriente de campo I_f [A_{dc}] |
|---|---------------------------------------|
| 2,6 | 0,16 |
| 3,1 | 0,2 |
| 3,4 | 0,22 |
| 4 | 0,26 |
| 4,6 | 0,3 |
| 5,1 | 0,33 |
| 5,2 | 0,35 |
| 5,9 | 0,38 |
| 6,9 | 0,45 |
| 7,4 | 0,5 |
| 7,9 | 0,52 |
| 8 | 0,55 |
| 8,7 | 0,59 |

De los resultados obtenidos en las pruebas se determina la recta de regresión para la línea de entrehierro y para la característica de cortocircuito, en las figuras 4.1 y 4.2 se presentan gráficamente los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en el generador, así como las rectas de regresión mencionadas.

Recta de entrehierro: $V_t = 4,92 + 279,86 I_f$

Característica de cortocircuito: $I_a = 0,081 + 15,21 I_f$

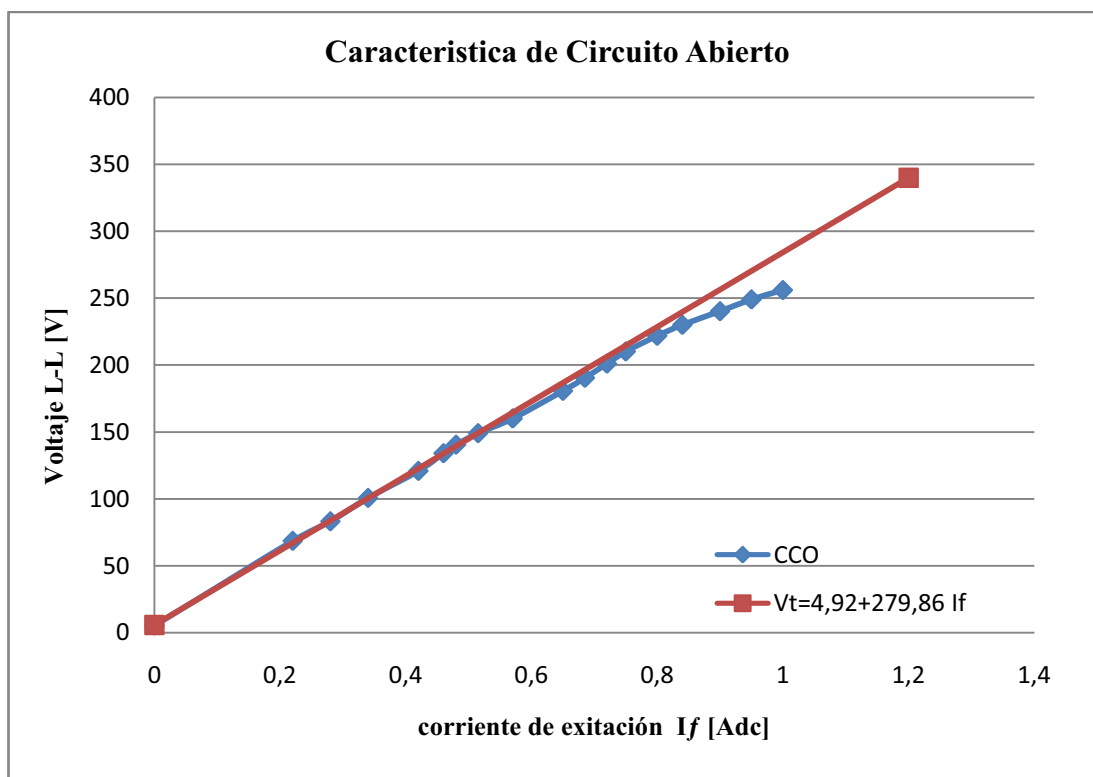


Figura 4.1 Característica de circuito abierto generador mesa N°4

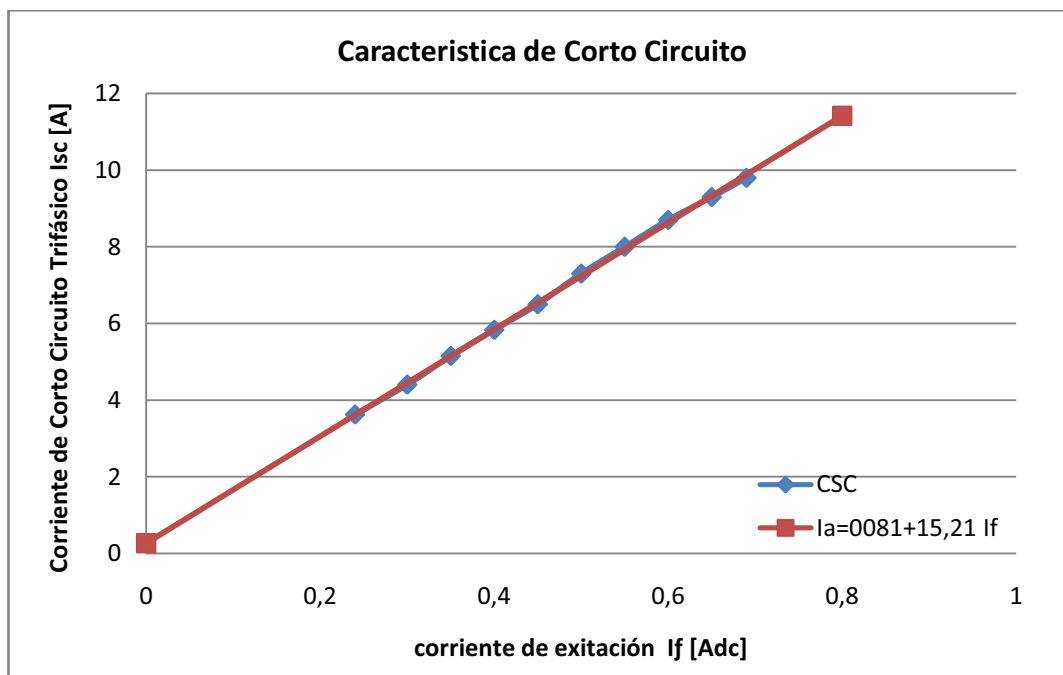


Figura 4.2 Característica de corto circuito generador mesa N°4

El valor calculado de la reactancia x_d saturada para un voltaje terminal de 210 voltios L-L, se la obtiene mediante la aplicación de la ecuación (1.7) del Capítulo I. En donde I'_a es la corriente de línea obtenida de la recta de regresión de la característica de corto circuito para el valor de I_f que corresponde a los 210 V, que es de $0,75 A_{dc}$.

Tabla 4.4 Bases para calculo en pu.

| | |
|-------|----------|
| V_B | 230 V |
| I_B | 8,7 A |
| S_B | 3500 kVA |
| r_a | 3,29 |

$$Z_b = \frac{V_B^2}{S_B} = \frac{230^2}{3500} \Omega = 15,1142 \Omega$$

$$x_d = \frac{V_a}{\sqrt{3}I'_a} = \frac{210,1}{\sqrt{3} \cdot 10,7215} = 11,31 \frac{\Omega}{\text{fase}}$$

La relación de cortocircuito definida como la división entre las corrientes de excitación necesaria para obtener el voltaje terminal nominal en circuito abierto y la corriente de inducido nominal en cortocircuito es utilizada para el cálculo del valor en por unidad de la reactancia sincrónica saturada. El cálculo de la reactancia sincrónica de eje directo en el valor de Ω/fase se muestra a continuación.

$$SCR = \frac{0,86}{0,59} = 1,4576 ; \quad x_d = 0,686 pu$$

$$x_d = \frac{1}{SCR} \cdot Z_b = \frac{1}{1,4576} \cdot 15,1142 \Omega$$

$$x_d = 10,36 \Omega/\text{fase}$$

Puesto que la reactancia obtenida mediante la relación de corto circuito corresponde al voltaje nominal de 230V, el cual no será utilizado en las pruebas planteadas por la limitación de que las cargas utilizadas y voltaje nominal del sistema son cercanos a 210V, para los cálculos se utiliza el valor de la reactancia de eje directo saturada calculada con las características de corto circuito y circuito abierto para 210 V.

c) Prueba de deslizamiento

La prueba de deslizamiento se realiza bajo las especificaciones detalladas en el apartado 1.4.5 del Capítulo I, obteniéndose los resultados indicados en la tabla 4.5, a partir de los cuales se determina la reactancia de eje en cuadratura aplicando la ecuación 1.12.

Tabla 4.5 Datos prueba de deslizamiento

| | V_t [V] | I_a [A] |
|--------|-----------|-----------|
| máximo | 126 | 8,1 |
| mínimo | 96 | 4,7 |

$$x_q = x_d \cdot \frac{V_{t_{min}}}{V_{t_{max}}} \cdot \frac{I_{min}}{I_{max}}$$

$$x_q = 11,31 \cdot \frac{96}{126} \cdot \frac{4,7}{8,1} = 5 \Omega/\text{fase}$$

d) Prueba de rechazo de carga y pérdida de fuerza motriz en vacío

Se presenta el cálculo de la constante de inercia H y el coeficiente de amortiguamiento D , en base a la prueba realizada en el laboratorio. En la prueba de pérdida de carga se mide una potencia de aceleración de 1820 W, en la prueba de pérdida de fuerza motriz en vacío se mide un tiempo de 38,18 s. Los datos de frecuencia y tiempo de aceleración se indican en la figura 4.3.

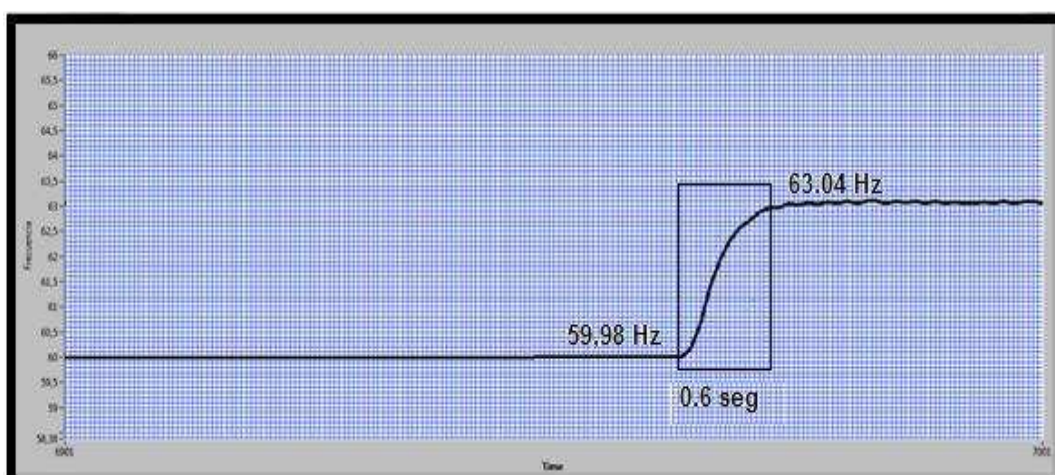


Figura 4.3 Variación de la frecuencia ante la pérdida de carga

Aplicando las ecuaciones (2.95) y (2.99) y reemplazando los valores obtenidos en las pruebas, se obtiene:

$$H = \frac{0,6 \cdot 60}{2 \cdot (63,04 - 59,98)} \cdot \left(\frac{1820}{3500}\right) = 3,0689 \text{ s}$$

$$D = \frac{6 \cdot H}{\Delta t} = \frac{6 \cdot 3,0689 \text{ s}}{38,18 \text{ s}} = 0,4825$$

4.1 PRUEBAS DE ESTADO ESTABLE EN VACÍO Y CON CARGA

La figura 4.4 muestra el esquema utilizado en la medición del ángulo de potencia, el mismo que está conformado por el generador trifásico de la Mesa N°4, un motor tipo Schrage de 4,1 kW, circuito de campo utilizado para el control del voltaje terminal del generador con una resistencia variables total de 430Ω, un banco trifásico resistivo en conexión delta utilizado como carga y el medidor de ángulo de potencia.

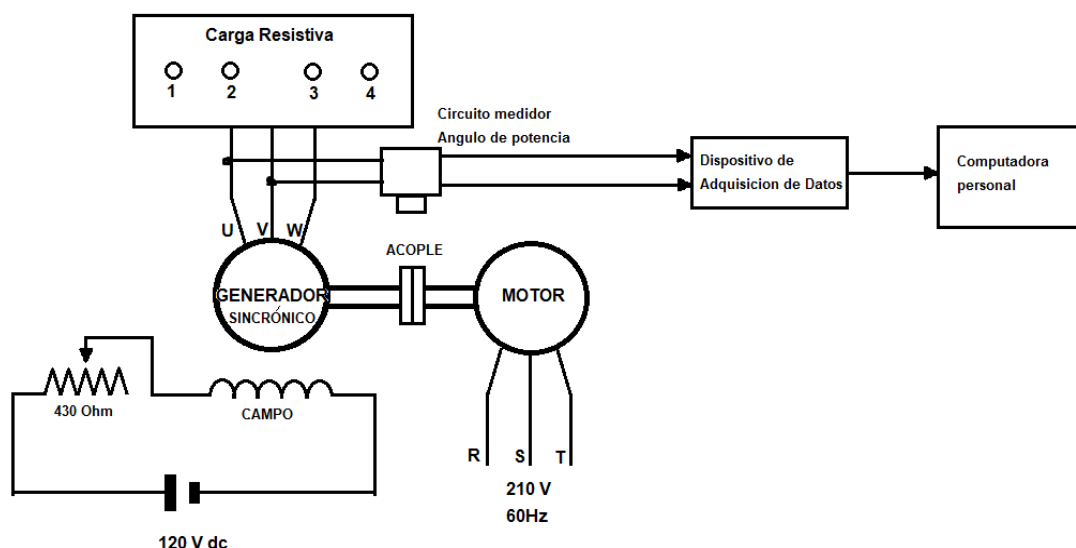


Figura 4.4 Esquema del sistema físico utilizado en la medición del ángulo de potencia para estado estable en vacío y con carga

Para la prueba de estado estable en vacío y con carga, se realiza la operación del generador de manera aislada, es decir sin conexión a la red de la Empresa Eléctrica Quito EEQ. El control de voltaje es efectuado de manera manual mediante la maniobra de la resistencia conectada en serie con el devanado de campo, de igual manera el control de velocidad y suministro de potencia mecánica es realizado mediante la perilla con la cuenta el motor tipo Schrage. La figura 4.5 muestra el grupo motor-generador de la Mesa N°4, en donde se indica el

generador al lado izquierdo y el motor al derecho, así como el control de velocidad.



Figura 4.5 Grupo Motor-Generador de la Mesa 4 del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la FIEE

La figura 4.6 muestra la fotografía de la implementación del medidor de ángulo de potencia en el Laboratorio Máquinas Eléctricas de la FIEE.



Figura 4.6 Implementación del circuito medidor de ángulo de potencia

4.1.1 ESTADO ESTABLE EN VACÍO

La medición del ángulo de potencia en este proyecto se inicia con el estado estable en vacío, operando el generador sin carga con un voltaje terminal de 210V fase-fase y frecuencia cercana a 60 Hz. Como se explica en el Capítulo anterior, en el estado estable en vacío se presenta un desfase entre las señales obtenidas por los circuitos detector de posición de rotor y detector de cruce por cero ascendente de la señal de voltaje terminal, este desfase es debido a que la posición del rotor es tomada de un punto arbitrario ubicado en el acople entre motor y generador, por lo cual es necesario tomar una referencia de posición entre estas dos señales bajo las condiciones de operación en vacío.

En la figura 4.7 se observa el ángulo de potencia operando en vacío teniendo éste un valor cercano a cero y cambiante debido a la oscilación propia de la máquina en su operación en vacío, la referencia en vacío tomada para la medición fue de $864,66^\circ$ eléctricos. Este desfase inicial es tomado como referencia, a partir del cual se mide el cambio del ángulo de potencia al aplicar carga al generador.

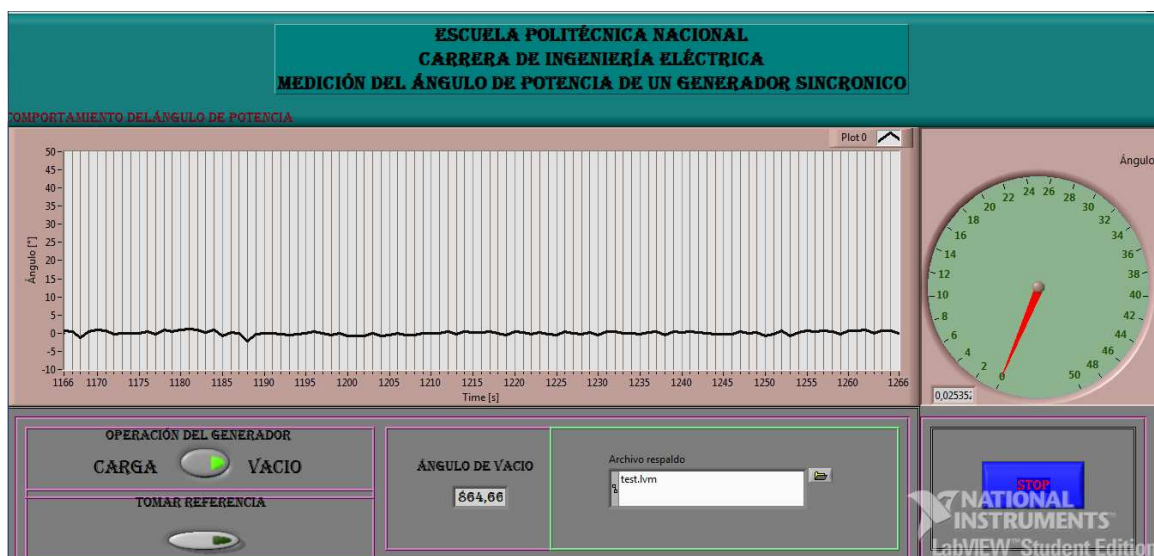


Figura 4.7 Comportamiento del ángulo de potencia en estado estable en vacío

4.1.2 ESTADO ESTABLE CON CARGA

La medición de estado estable con carga se realiza partiendo del estado estable en vacío, con la frecuencia a 60,01 Hz y voltaje terminal cercano a 210 V.

Las pruebas se realizan para los cuatro pasos de carga con los que cuenta el banco resistivo utilizado. El procedimiento consiste en activar un paso de carga,

regresar al generador a condiciones nominales de voltaje y frecuencia, una vez estabilizado el generador se toma las mediciones del ángulo mostrado en el medidor de ángulo de potencia, valores de potencia, voltaje y corriente.



Figura 4.8 Comportamiento del ángulo de potencia en estado estable para el primer paso de carga

La figura 4.8 muestra el comportamiento del ángulo de potencia en estado estable con carga monitoreado durante el primer paso de carga efectuado en las pruebas de laboratorio.

Los valores obtenidos con el medidor de ángulo de potencia son validados mediante la comparación con sus respectivas contrapartes calculadas mediante la ecuación (1.5).

Para efecto de visualización se presenta el cálculo y validación para el primer paso de carga, permitiendo la posterior presentación de un cuadro resumen de los cuatro pasos de carga efectuados.

El primer paso de carga produjo un movimiento en el ángulo de potencia desde el valor de 0 hasta el valor de 4.73° grados eléctricos.

La tabla 4.5 muestra las mediciones de voltaje, corriente y potencia activa tomadas con un analizador industrial para el primer paso de carga.

Tabla 4.5 Primer paso de Carga Resistiva

| | Voltaje fase-fase [V] | Corriente de línea [A] |
|------------------------|-----------------------|------------------------|
| L1 | 210,7 | 1,87 |
| L2 | 210,4 | 1,85 |
| L3 | 210,8 | 1,96 |
| Promedio | 210,63 | 1,89 |
| Potencia | | |
| Potencia Aparente [VA] | 690 | |
| Potencia Activa [W] | 690 | |
| Factor de potencia | 1 | |

El ángulo de potencia se obtiene del fasor de voltaje interno del generador:

$$E_q = \frac{V_t}{\sqrt{3}} + jx_q \cdot I_a$$

$$E_q = \frac{210,63}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ + 5j \cdot 1,89 \angle 0^\circ$$

$$E_q = 121,97 \angle 4,29^\circ \text{ V}$$

$$\delta = 4,44^\circ \text{ eléctricos}$$

El cálculo del voltaje interno fase neutro para carga resistiva:

Puesto que la carga es resistiva el ángulo de factor de potencia θ resulta ser cero.

$$E_{af} = \frac{V_t}{\sqrt{3}} + jx_q \cdot I_q + jx_d \cdot I_d$$

$$E_{af} = \frac{210,63}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ + 5j \cdot 1,89 \cdot \cos(4,44^\circ) \cdot (\cos(4,44^\circ) + j \cdot \sin(4,44^\circ)) + 11,31j \cdot 1,89 \cdot \sin(4,44^\circ) \cdot (\sin(4,44^\circ) + j \cdot \cos(4,44^\circ))$$

$$E_{af} = 122,89 \angle 4,44^\circ \text{ V}$$

La comparación entre el valor medido y el calculado permiten la validación del resultado obtenido con el medidor de ángulo de potencia. La tabla 4.6 muestra el error absoluto existente en la medición.

Tabla 4.6 Cálculo del error en la medición

| δ_{medido} [°] | $\delta_{calculado}$ [°] | $\varepsilon = \delta_{cal} - \delta_{med} ^\circ$ |
|--------------------------|-----------------------------|---|
| 4,73 | 4,44 | 0,29 |

La comparación de los ángulos obtenidos con el medidor, para el caso de estado estable con carga se muestra en la tabla 4.7. El cálculo se realiza utilizando los valores de voltaje, corriente promedio de las tres fases y la potencia activa medida.

Tabla 4.7 Cálculo del ángulo de potencia para cada paso de carga en estado estable con carga resistiva

| P [W] | Vt [V] | I_a [A] | $\sqrt{3} \cdot E_{af}$ [V] | $\delta_{calculado}$ [°] | δ_{medido} [°] | ε [°] |
|-----------------------|-------------|--------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------|
| PRIMER PASO DE CARGA | | | | | | |
| 690 | 210,63 | 1,89 | 212,86 | 4,44 | 4,73 | 0,29 |
| SEGUNDO PASO DE CARGA | | | | | | |
| 1360 | 210,1 | 3,74 | 218,81 | 8,76 | 9,07 | 0,31 |
| TERCER PASO DE CARGA | | | | | | |
| 2070 | 210,5 | 5,66 | 230,16 | 13,11 | 13,25 | 0,14 |
| CUARTO PASO DE CARGA | | | | | | |
| 2820 | 212,56 | 7,62 | 247,26 | 17,24 | 16,97 | 0,3 |

Como se muestra en la tabla 4.7 existe coherencia entre los valores medidos con la metodología planteada y los cálculos mediante la ecuación (1.5). La diferencia se debe a que los cálculos del ángulo son realizados si considerar resistencia y error propio de la medición con la tarjeta de adquisición de datos. Los resultados obtenidos demuestran que es posible el monitoreo o medición de ángulo de

potencia mediante la comparación de la posición de rotor y la posición del voltaje terminal de la máquina, para el caso de estado estable.

La tabla 4.8 muestra la ecuación potencia-ángulo para cada uno de las condiciones de estado estable con carga.

Tabla 4.8 Ecuaciones P vs δ

| Paso de carga | V_t [V] | $\sqrt{3}E_{af}$ [V] | Ecuación $P_e(\delta)$ [W] |
|-----------------|-----------|----------------------|---|
| 1 ^{ro} | 210,63 | 212,86 | $3964,3 \cdot \text{sen}(\delta) + 2475,2 \cdot \text{sen}(2\delta)$ |
| 2 ^{do} | 210,1 | 218,81 | $4064,7 \cdot \text{sen}(\delta) + 2462,7 \cdot \text{sen}(2\delta)$ |
| 3 ^{ro} | 210,5 | 230,16 | $4283,7 \cdot \text{sen}(\delta) + 2472,1 \cdot \text{sen}(2\delta)$ |
| 4 ^{to} | 212,56 | 247,26 | $4647,02 \cdot \text{sen}(\delta) + 2520,8 \cdot \text{sen}(2\delta)$ |

En la figura 4.9 se grafican la ecuaciones Potencia-Ángulo determinadas en la tabla 4.8 para cada paso de carga, así mismo se grafican los puntos de potencia y ángulo medido para cada estado estable.

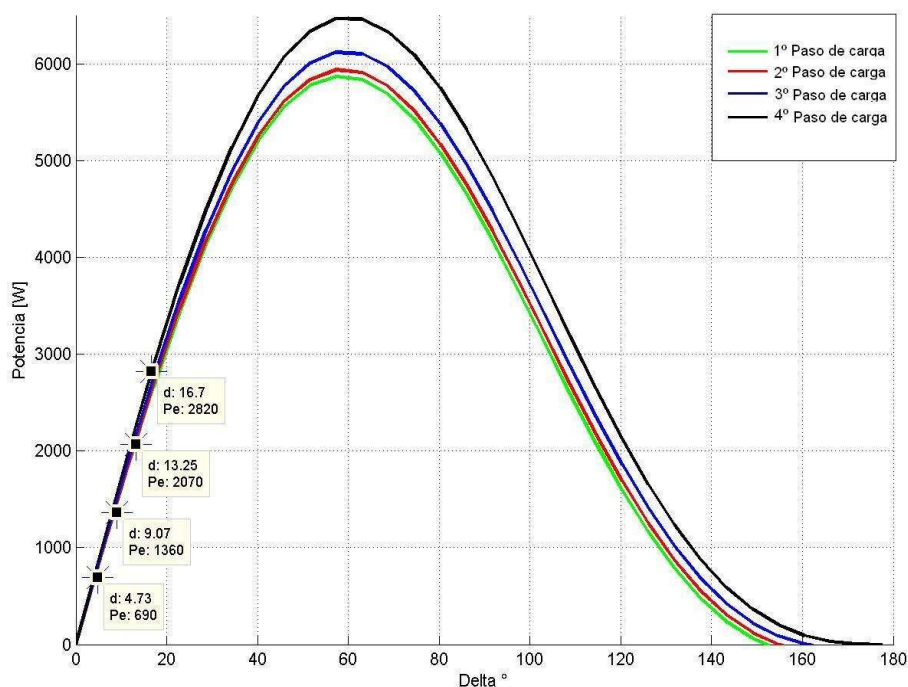


Figura 4.9 Curvas Potencia vs Ángulo en estado estable con carga

El primer paso de carga se muestra en la curva de color verde, al incrementar la carga, el voltaje terminal y la frecuencia disminuyen por efecto de la reacción de inducido, por lo cual es necesario aumentar la corriente de excitación y la potencia mecánica suministrada al generador, produciendo el movimiento del ángulo de potencia hacia la curva de color rojo que representa el estado estable para el segundo paso de carga. Para los siguientes pasos de carga se realizan las mismas operaciones de regulación de voltaje y frecuencia produciendo de esta manera las distintas curvas y puntos representados en la figura 4.9.

La figura 4.10 muestra el comportamiento del ángulo de potencia en el plano $P - Q$ para el caso de una carga puramente resistiva, puesto que la potencia reactiva es cero, se observa que el movimiento de la potencia activa es a lo largo del eje P . Para efecto de grafica se asumió un voltaje terminal constante para cada paso de carga, de tal manera que el punto en el eje Q es constante.

Se observa que el ángulo de potencia para el plano P - Q esta dado por el arco tangente de la relación entre la potencia activa y el punto $\left(\frac{V_t^2}{x_d} + \frac{V_t^2(x_d - x_q)}{x_d \cdot x_q}\right)$

$$\frac{V_t^2}{x_d} + \frac{V_t^2(x_d - x_q)}{x_d \cdot x_q} = 8873 \text{ VA}$$

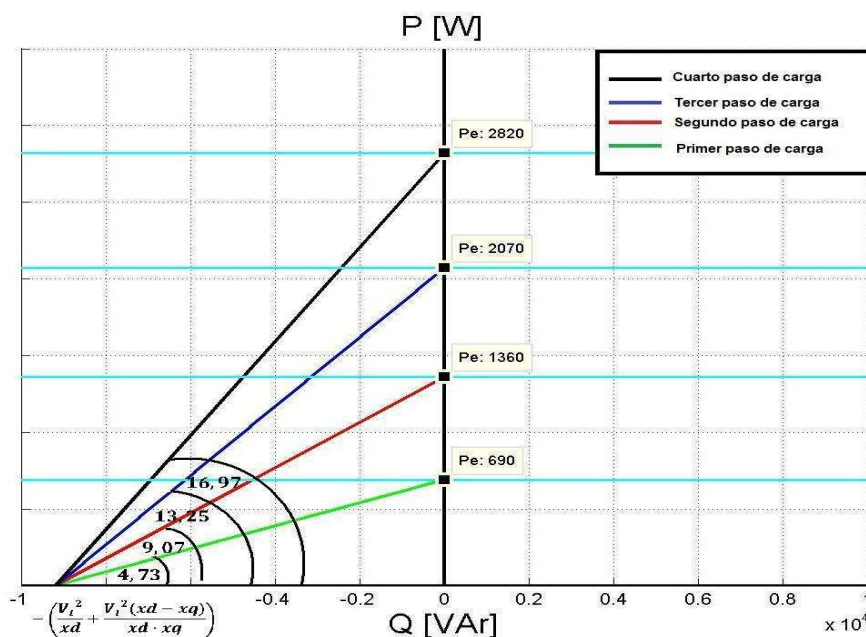


Figura 4.10 Ángulo de potencia en el plano P - Q

4.2 AUMENTO DE CARGA HACIA LA BARRA INFINITA

La prueba de aumento de carga hacia la barra infinita consiste en conectar el grupo motor-generador a la red eléctrica de la EEQ. La conexión se efectúa usando un sincronoscopio del laboratorio, para lo cual se realiza la puesta en paralelo del grupo con la red, verificando las siguientes condiciones:

- El sistema trifásico del generador y el de la barra infinita deben tener la misma secuencia de fases.
- El voltaje eficaz del generador debe tener el mismo valor que el voltaje eficaz de la red.
- Las frecuencias de ambos voltajes deben ser iguales.
- El ángulo de los voltajes instantáneos deben coincidir.

Una vez realizada la puesta en paralelo, se procede a la toma de referencia en vacío, tal como se realiza en el estado estable del generador aislado. Para verificar el aumento de carga se procede al aumento progresivo de la carga suministrada por el generador, mediante el incremento de la potencia mecánica, sin alterar la corriente de campo a fin de mantener fijo el voltaje interno de la máquina.

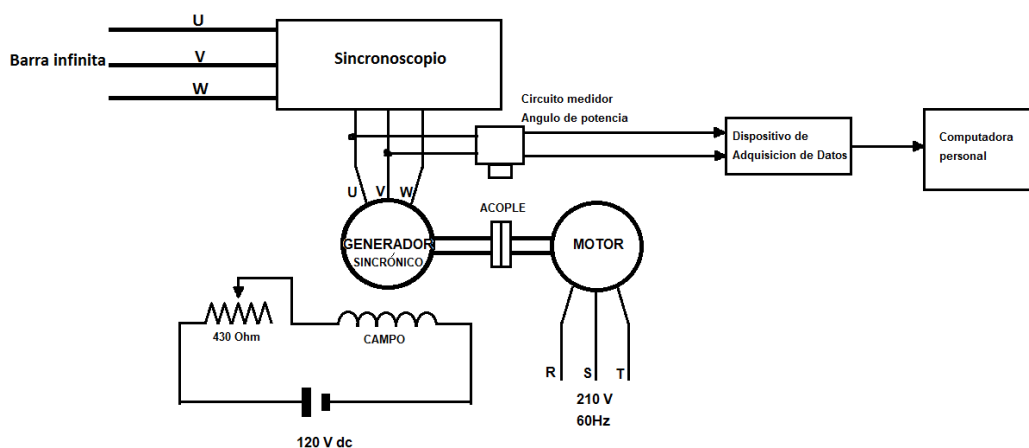


Figura 4.11 Esquema del sistema utilizado en la medición del ángulo de potencia para aumento y disminución de carga hacia la barra infinita

El sistema utilizado para el aumento de carga es el mismo que para el estado estable del generador aislado, con la diferencia de que se conecta a la red de la EEQ. En la barra infinita el voltaje y frecuencia son constantes, si no se altera la

excitación del generador, el valor eficaz del voltaje interno se mantiene inalterable, permitiendo de esta manera la visualización del movimiento del ángulo de potencia debido a la variación de la carga suministrada por el generador.

La tabla 4.9 muestra las mediciones de voltaje fase-fase y potencia activa tomados con el analizador industrial disponible en el laboratorio, para cada aumento de carga.

Tabla 4.9 Aumento de carga

| | Voltaje fase-fase generador [V] | Voltaje fase-fase barra infinita [V] |
|--------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| L1/2 | 214 | 214,6 |
| L2/3 | 213,8 | 213,8 |
| L1/3 | 216 | 215,5 |
| Promedio | 214,6 | 214,63 |
| Potencia vs Ángulo | | |
| | Potencia [W] | Ángulo δ [°] |
| Estado inicial | 0 | 0 |
| Primer aumento | 1070 | 8,21 |
| Segundo aumento | 1660 | 12,49 |
| Tercer aumento | 2170 | 16,37 |
| Cuarto aumento | 3020 | 22,8 |

En la figura 4.12 se presentan gráficamente las mediciones efectuadas para cada aumento de carga. Puesto que tanto el voltaje interno como el terminal están

fijados, el movimiento del ángulo de potencia se produce sobre la misma curva Potencia vs Ángulo.

$$P_e = \frac{E_{af} V}{x_d} \text{sen}(\delta) + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \text{sen}(2\delta)$$

$$P_e = \frac{214,6 \cdot 214,63}{11,31} \text{sen}(\delta) + \frac{214,63^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{5} - \frac{1}{11,31} \right) \cdot \text{sen}(2\delta) [W]$$

$$P_e = 4072,5 \cdot \text{sen}(\delta) + 2570,1 \cdot \text{sen}(2\delta) [W]$$

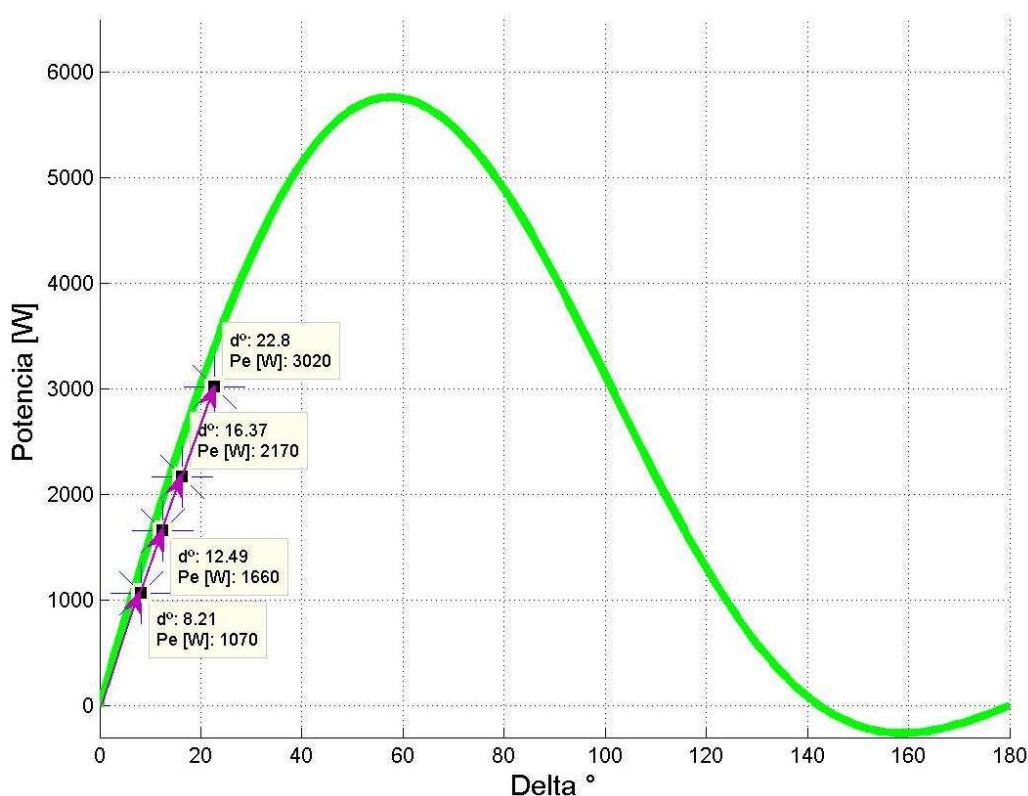


Figura 4.12 Ángulo de potencia frente al aumento de carga

Como se observa en la figura 4.12 el comportamiento del ángulo de potencia medido para cada aumento de carga es coherente con el comportamiento descrito por la ecuación (2.3). La diferencia entre los valores medidos (cuadrados en color negro) y los esperados en la curva de color verde es producto de la precisión de los aparatos de medición y la tarjeta, lo cual no implica necesariamente la no validez de la medición puesto que éste permite estimar de manera teórica el comportamiento del ángulo de potencia.

A continuación se realiza la simulación para el aumento de carga. A partir de las constantes H y D , obtenidas en las pruebas realizadas al generador, se determina

el coeficiente de amortiguamiento, la frecuencia natural de oscilación, la relación de amortiguamiento, la frecuencia de amortiguamiento, por medio de las ecuaciones (2.24), (2.27), (2.31) y (2.36).

Los cálculos son efectuados con la potencia en por unidad, realizando las correspondientes sustituciones en cada ecuación, el comportamiento del ángulo durante el aumento de la carga está dado por la ecuación (2.56).

Para efecto de comparación entre la simulación y el comportamiento monitoreado con el medidor de ángulo de potencia, se toma el cambio del primer aumento hacia el segundo, como se muestra en la figura 4.13.

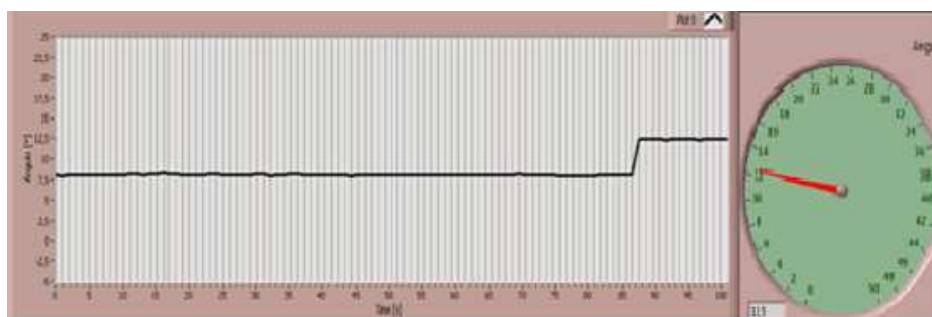


Figura 4.13 Comportamiento del ángulo de potencia para el segundo aumento de carga

El aumento de carga es la diferencia de potencia entre la potencia del segundo aumento y la del primer aumento. Los datos necesarios para la simulación se calculan a continuación:

$$P_s = \frac{\frac{E_{af} V}{x_d} \cos(\delta) + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos(2\delta)}{Sb}$$

$$P_s = \frac{4072,5 \cdot \text{sen}(\delta_0) + 2570,1 \cdot \text{sen}(2\delta_0) [W]}{3500} [pu]$$

$$P_s = 1,1636 \cdot \cos(\delta_0) + 0,7343 \cos \cdot (2\delta_0)$$

$$\Delta P = \frac{2^{do} \text{ Aumento} - 1^{er} \text{ Aumento}}{Sb}$$

$$\Delta P = \frac{1660 - 1070}{3500} = 0,1457 [pu]$$

Tabla 4.10 Datos para la simulación de aumento de carga

| δ_0 [°] | P_s [pu] | ΔP [pu] |
|----------------|------------|-----------------|
| 8,21 | 1,9548 | 0,1457 |

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\pi f_0}{H} P_s} = \sqrt{\frac{\pi \cdot 60}{3,0689} \cdot 1,1655} = 10,95 \text{ Hz}$$

$$\xi = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\pi f_0}{H P_s}} = \frac{0,4823}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot 60}{3,0689 \cdot 1,1655}} = 1,35 \text{ Hz}$$

$$\theta = \cos^{-1}(\xi) = \cos^{-1}(1,7144) = 1,133i$$

$$\omega_d = 8,4609 \cdot \sqrt{1 - 1,7505^2} = 9,96i$$

$$\delta = 8,21 + 0,086 \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 - 1,82^2}} e^{-14,8t} \text{sen}(9,96 \cdot i \cdot t + 0,815 \cdot i) \right] \cdot \frac{180}{\pi} [^\circ]$$

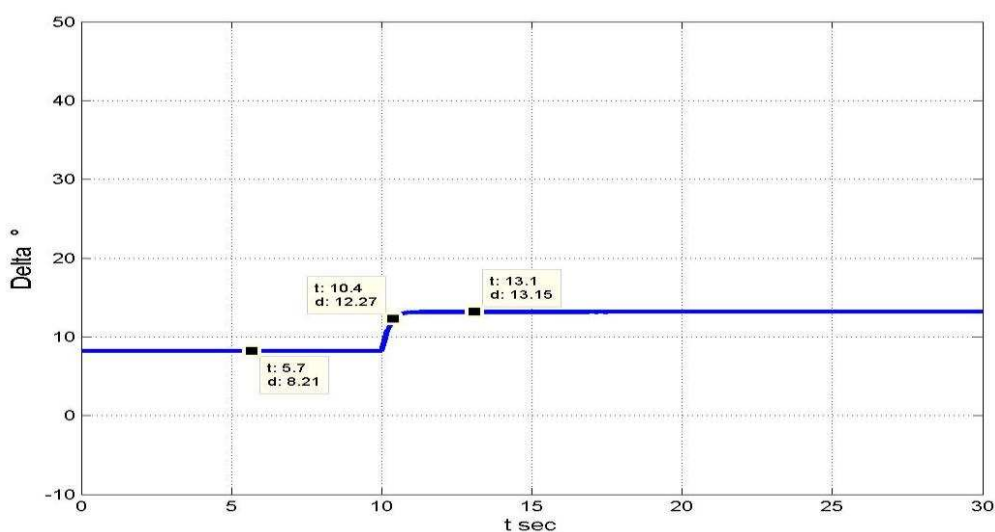


Figura 4.14 Simulación del segundo aumento de carga

Como se puede apreciar existe coherencia entre la curva monitoreada y la simulada. La diferencia entre estas curvas está dada por la precisión del dispositivo de medición y el intervalo de tiempo en la simulación.

4.3 DISMINUCIÓN DE CARGA HACIA LA BARRA INFINITA

La prueba de disminución de carga consiste en reducir la potencia entregada a la barra infinita desde el grupo motor-generador. Se utiliza el mismo sistema empleado para el aumento de carga partiendo desde el ángulo de $22,8^\circ$. Al igual que para el caso de aumento de carga no se altera la corriente de campo para mantener fijo el voltaje interno de la máquina y se toman mediciones de potencia y ángulo para cada paso, las cuales se encuentran listadas en la tabla 4.11.

Tabla 4.11 Disminución de carga

| | Voltaje fase-fase generador [V] | Voltaje fase-fase barra infinita [V] |
|---------------------|------------------------------------|---|
| L1/2 | 214 | 214,6 |
| L2/3 | 213,8 | 213,8 |
| L1/3 | 216 | 215,5 |
| Promedio | 214,6 | 214,63 |
| Potencia vs Ángulo | | |
| | Potencia [W] | Ángulo δ [°] |
| Estado inicial | 3020 | 22,8 |
| Primera disminución | 2850 | 21,38 |
| Segunda disminución | 2560 | 19,42 |
| Tercera disminución | 2320 | 17,33 |
| Cuarta disminución | 1660 | 12,5 |
| Quinta disminución | 480 | 3,73 |

En la figura 4.15 se observa los puntos de disminución de carga. Dado que la corriente de campo se mantiene constante, el movimiento del ángulo δ ocurre en la misma curva Potencia vs Ángulo. Al igual que para el caso del aumento de carga este movimiento es coherente con el valor determinado mediante la ecuación (2.3), permitiendo de esta manera validar la medición del ángulo de potencia para la disminución de carga.

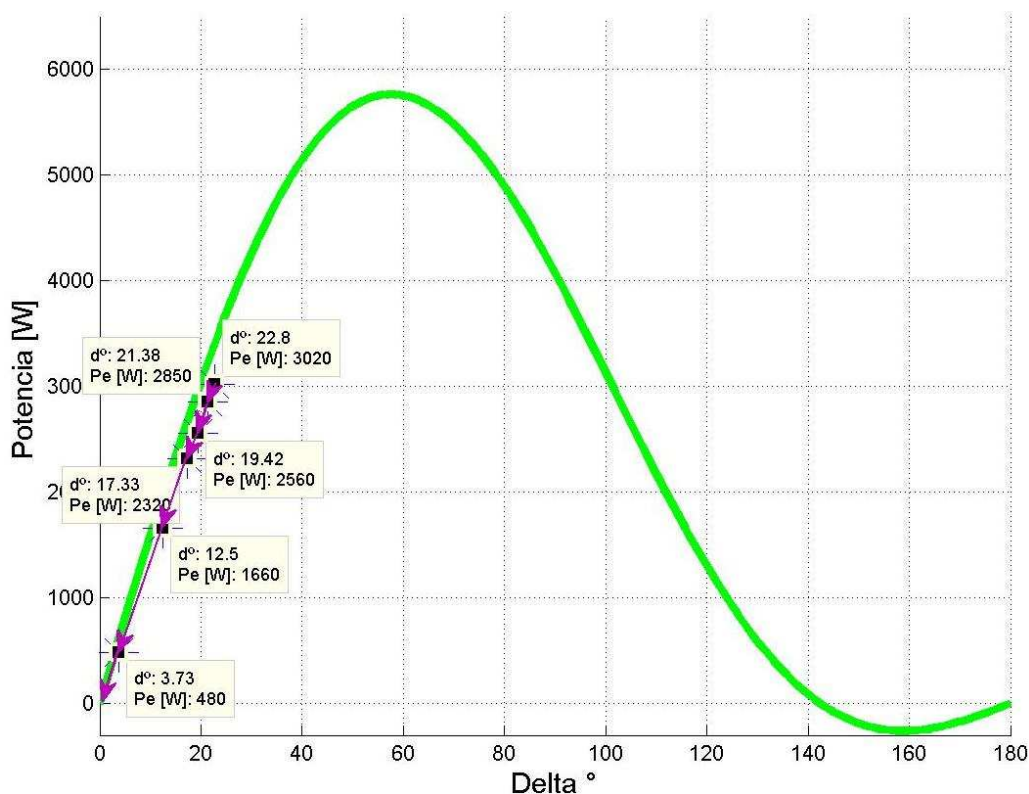


Figura 4.15 Ángulo de potencia frente a la disminución de carga

La simulación de disminución de carga se realiza utilizando las constantes H y D obtenidas en las pruebas del generador, y el mismo grupo de ecuaciones utilizadas para el aumento de carga.

Los cálculos son realizados con la potencia en por unidad, efectuando las correspondientes sustituciones en cada ecuación.

Para efecto de comparación entre la simulación y el comportamiento monitoreado con el medidor de ángulo de potencia, se toma el cambio del estado inicial hacia la primera disminución de carga, como se muestra en la figura 4.16.

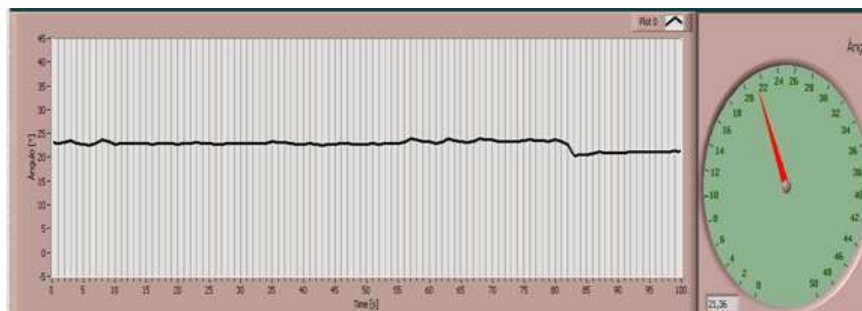


Figura 4.16 Comportamiento del ángulo de potencia para la primera disminución de carga

$$P_s = 1,1636 \cdot \cos(\delta_0) + 0,7343 \cos(2\delta_0)$$

$$\Delta P = \frac{2850 - 3020}{3500} = -0,0486 \text{ [pu]}$$

Tabla 4.12 Datos para la simulación de aumento de carga

| δ_0 [°] | P_s [pu] | ΔP [pu] |
|----------------|------------|-----------------|
| 22,8 | 1,67 | -0,0486 |

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\pi f_0}{H} P_s} = \sqrt{\frac{\pi \cdot 60}{3,0689} \cdot 0,8514} = 10,95 \text{ Hz}$$

$$\xi = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\pi f_0}{H P_s}} = \frac{0,4823}{2} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot 60}{3,0689 \cdot 0,8514}} = 1,35 \text{ Hz}$$

$$\theta = \cos^{-1}(\xi) = \cos^{-1}(0,815) = 0,815 \text{ i}$$

$$\omega_d = 8,6391 \cdot \sqrt{1 - 1,7144^2} = 9,965 \text{ i}$$

$$\delta = 22,8 - 0,0248 \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 - 1,35^2}} e^{-14,8t} \cdot \text{sen}(9,96 \text{ i} \cdot t + 0,815 \text{ i}) \right] \cdot \frac{180}{\pi} \text{ [°]}$$

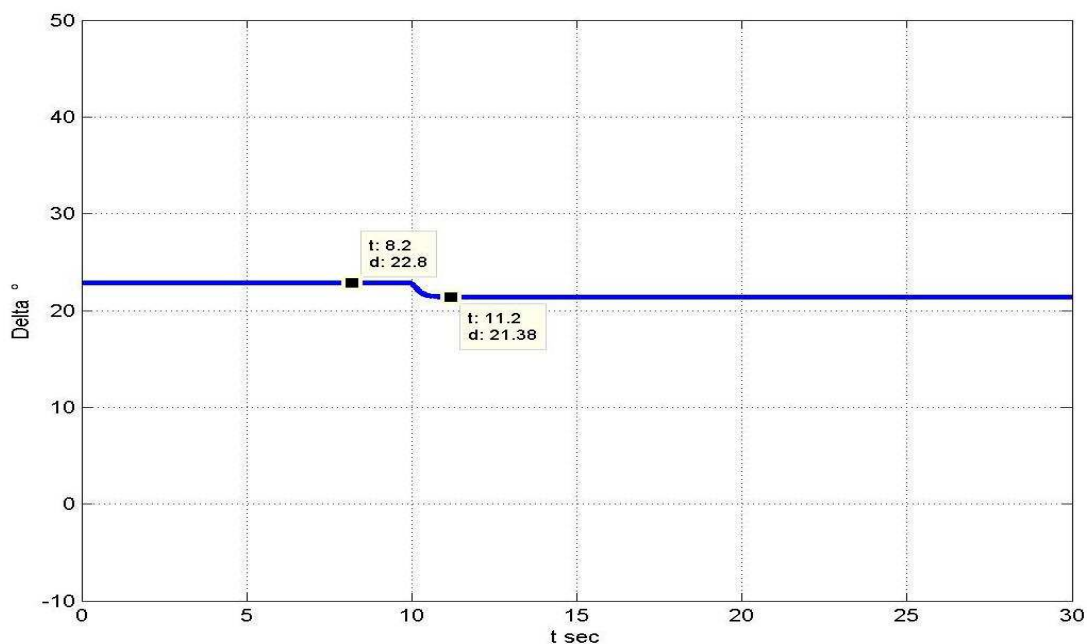


Figura 4.17 Simulación de la primera disminución de carga

Al igual que para el caso de aumento de carga existe una coherencia entre la simulación y la medición del ángulo de potencia con el instrumento construido, permitiendo corroborar la validez del método empleado, tanto para el estado estable como para el aumento o disminución de carga hacia la barra infinita.

4.4 VARIACIÓN DE LA CORRIENTE DE CAMPO

La prueba de variación de la corriente de campo consiste en conectar el grupo motor - generador a la red eléctrica de la EEQ. La conexión se efectúa usando el sincronoscopio disponible en el laboratorio. Una vez realizada la conexión se procede a la toma de referencia en vacío. Para visualizar el efecto de la variación de la excitación sobre el ángulo de potencia se fija la potencia mecánica, de tal manera que la potencia eléctrica permanezca casi constante. En esta condición se procede a maniobrar la resistencia usada para el control de corriente de campo. Para analizar la variación de la corriente de campo en el ángulo δ , se toman mediciones de corriente de campo, factor de potencia y ángulo; la tabla 4.13 muestra los datos obtenidos en la prueba realizada.

Tabla 4.13 Datos variación de excitación de campo

| P=1730 [W] | | | |
|------------------------|--------------------------|--------------|-------|
| $V_t = 214,63$ [V] L-L | | | |
| | I_f [A _{dc}] | δ [°] | fp |
| sobreexcitación | 1,5 | 5,5 | 0,42 |
| | 1,1 | 8,79 | 0,77 |
| | 0,9 | 10,63 | 0,956 |
| subexcitación | 0,74 | 12,33 | 0,951 |
| | 0,6 | 14,32 | 0,812 |
| | 0,5 | 15,76 | 0,695 |

A partir de los datos mostrados en la tabla 4.13 es posible determinar el ángulo de potencia, mediante el uso de las relaciones ángulo-potencia en el plano P-Q, la tabla 4.14 muestra el resultado de los cálculos.

$$\frac{V_t^2}{x_d} + \frac{V_t^2(x_d - x_q)}{x_d \cdot x_q} = 9213,2 \text{ VA}$$

$$Q = \left(\frac{P}{fp}\right) \cdot \text{sen}(\text{acos}(fp)) \quad ; \quad \delta = \text{atan}\left(\frac{P}{\left(\frac{V_t^2}{x_d} + \frac{V_t^2(x_d - x_q)}{x_d \cdot x_q}\right) + Q}\right)$$

Tabla 4.14 Resultado del cálculo de δ y Q

| Q [VA] | $\frac{V_t^2}{x_d} + \frac{V_t^2(x_d - x_q)}{x_d \cdot x_q} + Q$ [VA] | δ [°] calculado | δ [°] medido |
|---------|---|------------------------|---------------------|
| 3738,1 | 12951 | 7,60 | 5,5 |
| 1433,5 | 10647 | 9,22 | 8,79 |
| 530,9 | 9744,1 | 10,07 | 10,63 |
| -562,5 | 8650,7 | 11,31 | 12,33 |
| -1243,5 | 7969,7 | 12,25 | 14,32 |
| -1789,8 | 7423,4 | 13,12 | 15,76 |

Como puede apreciarse en la figura 4.18, el efecto de la variación del campo implica el aumento o disminución de ángulo de potencia a lo largo de eje Q, siempre y cuando la potencia activa no se altere en gran medida, es decir manteniendo la potencia mecánica constante, en la tabla 4.14 se observa una diferencia entre el valor calculado y el medido de ángulo de potencia, esto es debido a la dificultad de mantener constante la potencia mecánica en la máquina, con lo cual se presentaron potencias activas algo diferentes a la utilizada en los cálculos.

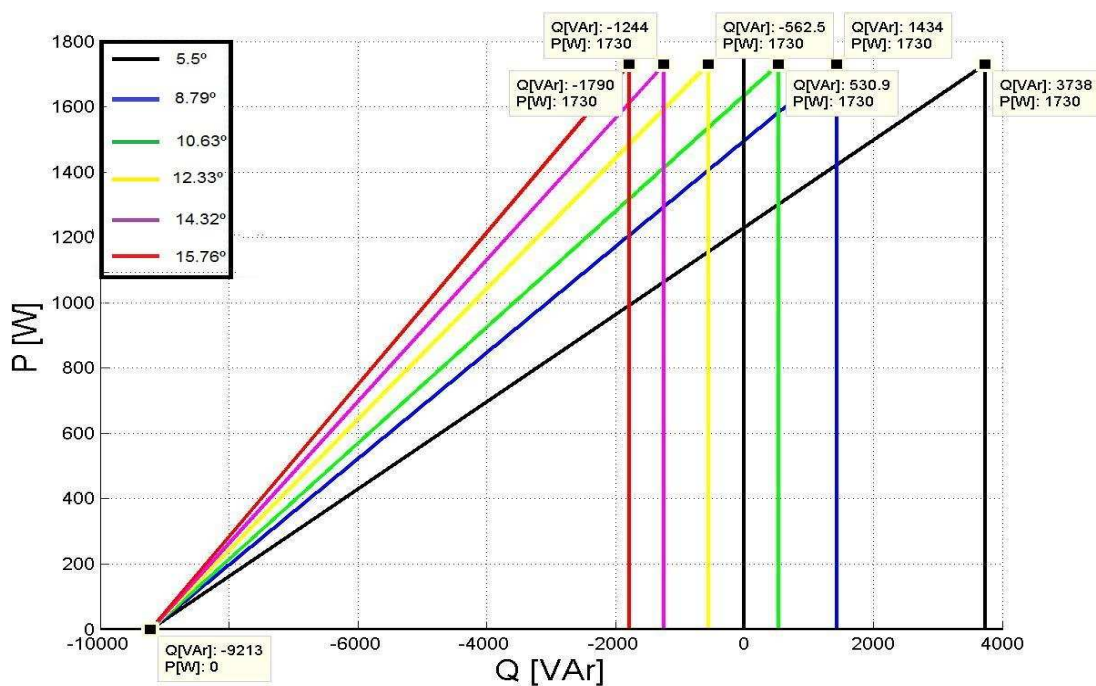


Figura 4.18 Ángulo de potencia en el plano P-Q, para variación de campo

CAPÍTULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Se ha comprobado con este método que la medición del ángulo de potencia de un generador sincrónico puede ser efectuada por comparación del desfase existente entre la posición del rotor y el voltaje terminal del generador.
- Fue necesario el acondicionamiento de la señal asociada con el voltaje terminal a la misma frecuencia de la señal producida por el detector de posición del rotor tomando en cuenta el número de polos del generador.
- Los cambios de carga efectuados en las pruebas de laboratorio fueron contrastados mediante las ecuaciones desarrolladas para estabilidad de pequeña señal.
- Los resultados obtenidos mediante esta técnica de medición son de carácter discreto, debido al hecho de que es necesario medir el desfase entre las dos señales en cada período, estando éste asociado al número de polos de la máquina y por lo tanto el paso de tiempo entre cada medición es igual al período de la señal de obtenida del rotor.
- La metodología planteada es aplicable solamente a monitoreo de ángulos que no excedan un límite, el cual está determinado por el período de tiempo de las señales entre las cuales se mide el desfase.
- La toma de un punto arbitrario en el eje del rotor y la necesidad de una referencia en vacío para la medición debe ser considerada en la determinación del ángulo de potencia cero.

- La utilización de un sensor óptico para la detección de la posición del rotor implica el acondicionamiento de la señal producida, cuya calidad está relacionada con la ubicación del sensor.
- El uso de LabVIEW constituye una herramienta de desarrollo poderosa, debido a la facilidad que brinda su entorno de programación gráfica en la creación de aplicaciones con interface de usuario de manera más sencilla que con lenguajes convencionales de programación.
- Al igual que los métodos de resolución numérica de la ecuación de oscilación, la medición del ángulo de potencia bajo la metodología propuesta es realizada en tiempos discretos, lo cual conlleva la necesidad de identificar más métodos que permitan el monitoreo del ángulo en forma continua.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar la medición del ángulo de potencia en base a mediciones de voltaje y corriente en los terminales del generador. Se deberá considerar la determinación de los parámetros del generador y su modelación con las variables de voltaje, corriente.
- Se recomienda la utilización de un medidor de velocidad tacométrico con el mismo número de polos del generador, en lugar de un sensor óptico a fin de mejorar el monitoreo de la posición del rotor. Al acondicionar la señal de voltaje a la misma frecuencia que la de la señal asociada a la posición del rotor se pierden algunos instantes de medición del ángulo.
- Se recomienda realizar la medición del ángulo de potencia con microcontrolador dedicado.

- Puesto que la metodología planteada es aplicable solo para ángulos en cierto rango, se recomienda realizar la medición en base a la posición acumulada del rotor y la posición acumulada del voltaje, en cuyo caso se tendría la medición para cualquier ángulo mayor al período de la señal de rotor.
- Se recomienda continuar con la determinación del comportamiento del ángulo de potencia en estado transitorio para el caso generador – barra infinita.
- El desarrollo de la medición del ángulo de potencia de generadores sincrónicos permitirá el estudio en laboratorio de estabilidad de sistemas de potencia conformados por más de una sola máquina.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] KUNDUR Prabha, "Power System Stability and Control", EPRI. McGraw-Hill, 2001.
- [2] BROKERING Walter, "Los Sistemas Eléctricos de Potencia", Prentice Hall, Chile, 2008.
- [3] SAADAT Hadi, "Power System Analysis", McGraw-Hill, 1999.
- [4] GRAINGER & STEVENSON, "Análisis de Sistemas de Potencia", McGraw-Hill, 1996.
- [5] ANDERSON, P. M., FOUAD, A.A., "Power System Control and Stability", First Edition, USA, 1977.
- [6] JÁTIVA Jesús, "Apuntes de la Materia de Sistemas Eléctricos de Potencia", EPN, Quito.
- [7] BOYLESTAD Robert, "Electrónica Teoría de Circuitos", Sexta Edición, Editorial Pearson, Prentice Hall, 2004.
- [8] FITZGERALD, A.E., KINGSLEY, Charles, "Máquinas Eléctricas", Sexta Edición, McGraw-Hill, Estados Unidos, 2003.
- [9] FRAILE Jesús, "Máquinas Eléctricas", Quinta Edición, McGraw-Hill, España, 2003.
- [10] LAJARA José, "LabVIEW Entorno Gráfico de Programación", Alfa Omega Grupo Editorial, México, 2007.
- [11] NATIONAL INSTRUMENTS, "Empezando con LabVIEW", Edición de abril 2003.
- [12] AGUIRRE Christian, "Estudios Eléctricos de Sistemas de Potencia para la Carrera de Ingeniería Eléctrica Utilizando el Software Power Factory 13.1 de DlgSILENT", Proyecto de Titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2008.
- [13] ARCOS Lenin, FLORES Iván, "Análisis de Estabilidad Transitoria del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador ", Proyecto de Titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2007.
- [14] CORREA Daniel, "Modelación y Simulación del Grupo 1 de la Central Hidroeléctrica Illuchi 1 de Elepco S.A.", Proyecto de Titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2007.

- [15] IEEE. "Test Procedures for Synchronous Machines", Standard 115.1965
- [16] <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=787454&isnumber=17042>