



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa  
Dr. Antonio Núñez Jiménez  
Facultad Metalurgia-Electromecánica.

*Trabajo de Diploma en opción al título:*

Ingeniero Eléctrico

*Título: “Simulación matemática de aerogeneradores  
asincrónicos en el parque eólico de Gibara”*

Autor (es): Jervis Amarkee Williams  
Andrew Anthony Miller

Tutor (es): Dr. Reynaldo Laborde Brown  
Ing. Daniel Mendiola Ellis

Moa, 2007

## *DECLARACIÓN DE AUTORIDAD*

Nosotros, Jervis Amarkee Williams y Andrew Anthony Miller, autores de este trabajo de diploma titulado: “*Simulación matemática de aerogeneradores asincrónicos en el parque eólico de Gibara*”, certificamos su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.

ISMM de Moa, de junio del 2007

---

Jervis Amarkee Williams

---

Dr. Reynaldo Laborde Brown

Diplomantes:

---

Andrew Anthony Miller

Tutores:

---

Ing. Daniel Mendiola Ellis

## *Pensamiento*

*“Cuando los vientos se levantan y  
cambian rumbo, hay gente que empieza a  
construir muros...”*

*...por suerte hay otros  
que construyen molinos”*



## *Agradecimientos*

Primeramente damos gracias a Dios por habernos permitido realizar este trabajo y llegar al final de nuestras metas aquí en la patria Cubana.

Gracias a nuestras familias y amistades que nos dieron su amor, afecto y apoyo en tiempos de necesidad. Gracias en especial a Leighton Morgan por su apoyo incondicional con los medios de computación, Vicente Castellano, Jespere Kiki, Jean Louis Epandola, Virgen Charchabal, Ramona de la Fuente y a todos los "*Hombres y Mujeres de Valor*", a los hermanos y pastores quienes nos apoyaron siempre con sus oraciones.

Gracias a nuestros profesores quienes tenían la tarea difícil de impartir de sus conocimientos para la formación ingenieril nuestra.

Gracias al gobierno Cubano para su iniciativa de la "Revolución Energética" y al gobierno Jamaicano para su paso adelante en el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía.

## *Dedicatoria*

*Este trabajo esta dedicado a mi familia David George Miller, Eulalee Miller, Roshell, David Jr., Georgia, Patrice y Tashagay y a la familia amplia empezando con mi abuela Olive Miller...*

*... Andrew.*

*A mis padres, hermanos y amigos...*

*... Jervis.*

## **Resumen**

El trabajo presentado en este documento trata acerca de la simulación matemática de los aerogeneradores asincrónicos en el parque eólico de Gibara, localizado en el municipio del mismo nombre en la provincia de Holguín. Primeramente se presenta la fundamentación teórica que sustenta el proceso de obtención de energía eléctrica del viento, además exponer los distintos tipos de aerogeneradores.

Los materiales y métodos que sirven de base para el análisis del comportamiento del generador asincrónico son expuestos.

Se realizaron simulaciones para tres casos de procesos transitorios en el generador de inducción, los cuales son la desconexión y conexión del generador a la red y el caso de la aparición de cortocircuitos trifásicos en los terminales del mismo.

Se analizaron los resultados obtenidos para saber como influyen en el comportamiento de los generadores para los casos estudiados.

## **Summary**

The work presented in this document is about the mathematical simulation of the asynchronous wind generators of Gibara's wind farm, located in the municipal of Gibara, in the province of Holguín.

Firstly, a theoretical development of the achievement of electrical energy from the wind is presented as well the different types of wind generators.

The material and methods that serve as a theoretical base for the analysis of the behavior of the asynchronous generator are presented.

Simulations are done for three cases of transient processes in the induction generator. These cases are the disconnection and connection of the generator to the grid and the case of a three phase short circuit appearing at its terminals.

The results obtained were analyzed in order to know how they influence the performance of the generators for the cases studied.

## Tabla de Contenido

|                      |                                                                                                |    |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción General |                                                                                                | I  |
| Capítulo I-          | Fundamentación teórica de los aerogeneradores                                                  | 1  |
| 1.1-                 | Introducción                                                                                   | 1  |
| 1.2-                 | Estado actual de la energía eólica                                                             | 2  |
| 1.3-                 | Antecedentes Históricos                                                                        | 3  |
| 1.4-                 | Estructura del parque eólico de Gibara                                                         | 7  |
| 1.5-                 | Relación de la energía mecánica con el viento                                                  | 8  |
| 1.6-                 | Velocidades críticas de un aerogenerador                                                       | 9  |
| 1.7-                 | Tipos de aeroturbinas                                                                          | 10 |
| 1.8-                 | Modos de operación                                                                             | 15 |
| Capítulo II-         | Materiales y Métodos                                                                           | 25 |
| 2.1-                 | Introducción                                                                                   | 25 |
| 2.2-                 | Análisis estacionario del aerogenerador                                                        | 25 |
| 2.3-                 | Análisis dinámico del aerogenerador                                                            | 33 |
| 2.4-                 | Procesos Transitorios en el generador de inducción                                             | 35 |
| Capítulo III-        | Simulación de los aerogeneradores del parque eólico de Gibara                                  | 54 |
| 3.1-                 | Introducción                                                                                   | 54 |
| 3.2-                 | Simulación de la desconexión brusca del generador de la red                                    | 55 |
| 3.3-                 | Simulación de un cortocircuito trifásico en los terminales de la maquina                       | 58 |
| 3.4-                 | Simulación de la conexión del generador a la red                                               | 61 |
| Capítulo IV-         | Análisis de los resultados                                                                     | 63 |
| 4.1-                 | Introducción                                                                                   | 63 |
| 4.2-                 | Determinación de las condiciones de operación a partir de los resultados del diagrama circular | 63 |
| 4.3-                 | Comportamiento de la maquina frente a cortocircuitos                                           | 65 |
| 4.4-                 | Comportamiento frente a la desconexión brusca de la red                                        | 69 |
| 4.5-                 | Comportamiento ante la conexión de la maquina a la red                                         | 75 |
| Conclusiones         |                                                                                                | 82 |
| Recomendaciones      |                                                                                                | 83 |
| Bibliografía         |                                                                                                |    |
| Anexos               |                                                                                                |    |
| I                    | Mapa de conversión de energía eólica a eléctrica                                               |    |
| II                   | Datos del aerogenerador tratado                                                                |    |
| III                  | DFIG con convertidor entre generador y red                                                     |    |

|      |                                                                     |
|------|---------------------------------------------------------------------|
| IV   | Característica mecánica de los aerogeneradores y su curva de ajuste |
| V    | Diagrama circular de la máquina asincrónica                         |
| VI   | Códigos de los programas simulados                                  |
| VII  | Influencia de la caja multiplicadora                                |
| VIII | Fenómeno islanding, huecos de tensión                               |

## **Introducción General**

---

Ante el imparable incremento de la demanda de energía eléctrica, así como del creciente interés social por la conservación del medio ambiente, y la escasez de los combustibles fósiles y precios de los mismos, los cuales cada día tienden a aumentar. El futuro de la producción, y por ende, el continuo crecimiento económico, implica el concepto de generación distribuida, optimizando recursos y minimizando pérdidas, sin olvidar el respeto a nuestro entorno. Todo esto hace que las energías renovables sean fundamentales en el presente y el futuro.

La generación eólica es la fuente de energía renovable que más rápidamente está aumentando su uso, y junto con la hidráulica, es actualmente, la única que presenta precios que compiten con los actuales del kWh.

En el desarrollo de las tecnologías de generación eólica se ha avanzado de forma muy significativa en la modernización de turbinas eólicas y generadores eléctricos. En el campo de las turbinas, y de las palas los modelos comerciales alcanzan ya una potencia de 2MW. En el ámbito de los generadores eléctricos se ha pasado de las máquinas de inducción de jaula de ardilla con muy limitadas capacidades de control a máquinas síncronas multipolares con regulación de velocidad del rotor y control de potencia reactiva.

Estas máquinas llamadas doblemente alimentadas con convertidores electrónicos de potencia para el control del circuito del rotor poseen la habilidad de generar una tensión de valor eficaz y frecuencia constante, aunque su eje gire a velocidad variable. Para ello se alimenta el rotor de la máquina con un convertidor de frecuencia con el que se consigue por un lado regular la amplitud, frecuencia y fase de la tensión aplicada al rotor, lo cual permite realizar un control vectorial de la máquina para regular el par electromagnético y el factor de potencia del generador en un amplio margen de velocidades de giro, tanto por encima como por debajo de la velocidad de sincronismo. También se logra realizar una regulación independiente de las potencias activa y reactiva, lo que permite extraer o inyectar la potencia activa generada en el rotor de la máquina y controlar la potencia reactiva intercambiada entre este convertidor y la red. Por estas razones el generador asíncrono de doble alimentación es uno de los sistemas más utilizados en aerogeneradores de velocidad variable.

En el Caribe y el resto de América Latina, se enfrenta un reto apreciable. El crecimiento de las relativamente pequeñas economías tiene una dependencia significativa de la producción

de la energía eléctrica, también para la convivencia diaria está es muy necesaria. Últimamente estas economías han sufrido retrasos por los incrementos en los precios del petróleo en el mercado mundial, lo que influye directamente en la necesidad de esforzarse en hacer estudios en caminados hacia la aplicación amplia de la energía renovable para garantizar el desarrollo seguido y sostenible de estas economías frágiles.

La propuesta de construcción del parque eólico de Gibara es un paso adelante en este esfuerzo y constituye un pensamiento correcto y consciente de parte del gobierno revolucionario cubano. La experiencia y el aprendizaje ganado de esta actividad pueden servir como base para que los demás países de la región muevan sus esfuerzos en este sentido para garantizar nuestros futuros económicos, y la conservación del medio ambiente.

### **Objeto de estudio**

---

Los aerogeneradores asincrónicos del parque eólico de Gibara.

### **Situación general problemática**

---

Se está construyendo un parque eólico en el municipio de Gibara en la provincia de Holguín, en el cual solamente se sabe los parámetros y tipos de generadores pero no se sabe como comportarán frente a la conexión a la red, la desconexión brusca y un cortocircuito trifásico en sus terminales.

### **Hipótesis**

---

Por medio de la simulación matemática de los aerogeneradores asincrónicos del parque eólico de Gibara, se puede pronosticar el comportamiento de ellos ante la conexión y desconexión a la red y posibles cortocircuitos ocurridos en los mismos. Como resultado conocer de antemano las medidas necesarias y adecuadas a tomar para garantizar con calidad el suministro de la energía desde dicho parque.

### **Objetivo general**

---

Pronosticar mediante la simulación matemática el comportamiento de las corrientes y voltajes en las condiciones de conexión a la red, desconexión de la red y cortocircuitos en

los terminales de los aerogeneradores asincrónicos del parque eólico de Gibara, para poder indicar las medidas más adecuadas que garanticen la calidad de la energía en dicho parque.

### **Objetivos específicos**

---

1. Elaborar programas para la simulación matemática de las condiciones de conexión a la red, desconexión de la red y la aparición de cortocircuitos trifásicos en los aerogeneradores del parque eólico.
2. Recopilar información básica sobre los aerogeneradores.

### **Tareas a desarrollar**

---

1. Determinación del comportamiento del generador en régimen estacionario.
  - a. Trazado del diagrama circular de la máquina de asincrónica.
2. Comportamiento del aerogenerador en régimen dinámico.
3. Simulación de los aerogeneradores del parque para los casos de:
  - a. desconexión de la red eléctrica,
  - b. conexión a la red eléctrica y
  - c. la aparición de cortocircuitos trifásicos en los terminales del estator.
4. Recopilación bibliográfica.

## *Capítulo I*

### **1.1- Introducción**

---

La energía eólica es una forma indirecta de energía solar, puesto que son las diferencias de temperatura y de presión inducidas en la atmósfera por la absorción de la radiación solar las que ponen en movimiento las masas de aire, constituyéndose este fenómeno en el origen del viento. Se calcula que un 2% de la energía solar recibida por la tierra se convierte en energía cinética de los vientos. La cantidad de energía correspondiente es enorme: unos 30 millones de TWh por año, o sea, 500 veces el consumo mundial de la energía, incluso teniendo en cuenta que sólo el 10% de esta se encuentra disponible cerca del suelo, el potencial que sigue siendo considerable. Las zonas más favorables para la implementación de grandes motores eólicos son las regiones costeras y las grandes colinas cuya superficie es adecuada para que el viento no sufra el fenómeno de las perturbaciones, siendo necesario tener una velocidad media del viento superior a 10m/s. [10].

La energía eólica es la fuente de energía que experimenta el más rápido crecimiento a nivel mundial, con un 30 % anual aproximadamente. Este tipo de energía suministra electricidad para casi 14 millones de viviendas, algo más de 35 millones de personas. Hay más de 55000 turbinas eólicas instaladas en todo el mundo, empleando a casi 70000 personas, [CIES].

Actualmente, los llamados “molinos de viento” han sido sustituidos por “aeroturbinas”, que son capaces de producir potencias eléctricas muy apreciables. Los avances en la aerodinámica han incrementado el rendimiento de los aerogeneradores de 10 al 45 %. Este capítulo tiene el objetivo de brindar información teórica acerca de los aerogeneradores, sus distintas configuraciones y un desarrollo general de la obtención de la energía eléctrica a partir del viento.

## 1.2- Estado actual de la energía eólica

Los países de la Unión Europea presentan el más alto nivel de desarrollo de la tecnología eólica y de capacidad instalada, liderados por Alemania con 14609 MW, España con 6202 MW y Dinamarca con 3110 MW, ver figura 1. Estados Unidos ocupa el segundo lugar mundial, con una capacidad de 6430 MW. Durante el 2002 fueron instalados en Alemania alrededor de 3266 MW conectados a la red, lo cual representa un incremento de 33 % respecto al 2001. El número de turbinas eólicas instaladas en ese país asciende a 13700, las cuales producen aproximadamente 20 TWh como promedio anual, lo cual representa el 4.7 % de la demanda eléctrica nacional y un tercio de la electricidad generada en el mundo por energía eólica.

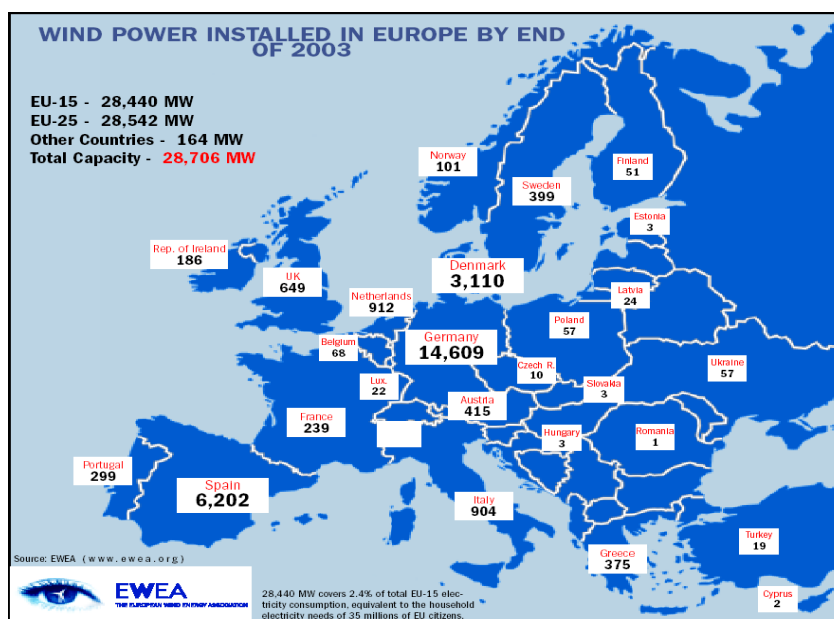


Figura 1. Potencia Eólica Instalada en Europa hasta el 2003. Fuente:[CIES]

Otros países de la Comunidad Europea experimentan un constante crecimiento tanto en capacidad instalada como en desarrollo tecnológico. Recientemente fue anunciada la decisión del Gobierno del Reino Unido de destinar 42 millones de dólares para nuevos proyectos *offshore*, los cuales agruparán a más de 500 turbinas, generando 1500 MW de electricidad, lo cual representará el 1.5 % de las necesidades energéticas del país. Por otra parte, Dinamarca, pionero en el desarrollo de tecnologías eólicas y donde esta industria es la

tercera del país, ya ha cambiado a una nueva fase. En 1998 y 1999 se instalaron 300 MW de nueva capacidad, mientras que en el 2000 se instalaron 603 MW. En el 2001 solo fueron instalados 115 MW. Sin embargo, durante el 2002 fueron instalados 530 MW, la mayoría de estos bajo el esquema “*repowering*”, incluyendo 183 MW de nuevas plantas *onshore*.

### **1.3- Antecedentes históricos**

---

La teoría de la aerodinámica se desarrolla durante las primeras décadas del siglo XX, permitiendo comprender la naturaleza y el comportamiento de las fuerzas que actúan alrededor de las palas de las turbinas. Los mismos científicos que la desarrollaron para usos aeronáuticos Joukowski, Drzewiechy y Sabinin en Rusia; Prandtl y Betz en Alemania; Constantin y Enfield en Francia, etc, establecen los criterios básicos que debían cumplir las nuevas generaciones de turbinas eólicas.

En el año 1910 Dinamarca tenía instalada una potencia eólica de 200 MW.

En los años 20 se empiezan a aplicar a los rotores eólicos los perfiles aerodinámicos que se habían diseñado para las alas y hélices de los aviones. En 1927, el holandés A.J. Dekker construye el primer rotor provisto de palas con sección aerodinámica, capaz de alcanzar velocidades en punta de pala, cuatro o cinco veces superiores la del viento incidente.

Betz demostró en su famoso artículo "Die Windmuhlen im lichte neverer Forschung", (Berlín 1927), que el rendimiento de las turbinas aumentaba con la velocidad de rotación y que, en cualquier caso, ningún sistema eólico podía superar el 60% de la energía contenida en el viento. Por lo tanto, los nuevos rotores debían funcionar con elevadas velocidades de rotación para conseguir rendimientos más elevados. La teoría demostró también que cuanto mayor era la velocidad de rotación menor importancia tenía el número de palas, por lo que las turbinas modernas podían incluso construirse con una sola pala sin que disminuyera su rendimiento aerodinámico significativamente.

A pesar de los esfuerzos realizados y de la mayor eficacia de las nuevas turbinas, las dificultades de almacenamiento y las desventajas propias de la irregularidad de los vientos fueron la causa de que las aplicaciones basadas en el aprovechamiento del viento como recurso energético continuaran declinando hasta el final de la Primera Guerra.

Los combustibles fósiles, y en particular el petróleo, empezaban a imponerse como la principal e insustituible fuente de energía. Sin embargo, el petróleo presentaba un grave

inconveniente al crear una dependencia entre los países consumidores y los productores, de forma que cuando el orden económico se veía alterado por alguna crisis y la dependencia energética se hacía patente, se adoptaban políticas de apoyo de los recursos autónomos, que se abandonaban una vez se superaba la crisis.

La primera de estas etapas fue una consecuencia inmediata de la Primera Guerra. Con una fuerte expansión de la electricidad como sistema energético universal y escasez de recursos para importar petróleo, las turbinas eólicas continuaron desarrollándose por dos caminos diferentes.

Por un lado, hacia el diseño, construcción y comercialización de aerogeneradores de baja potencia, capaces de generar electricidad en áreas rurales más o menos aisladas, a las que todavía no habían llegado las redes de electrificación. Por otro, y a la sombra de una industria aeronáutica en pleno desarrollo, hacia el diseño y construcción de grandes plantas eólicas capaces de generar electricidad a gran escala. Este apoyo a los recursos energéticos autóctonos, que comenzó inmediatamente después de la guerra, se mantuvo durante la década siguiente, como consecuencia de la política proteccionista adoptada por los países occidentales tras la crisis de 1929.

Durante este período fueron innumerables los trabajos realizados sobre plantas eólicas de gran potencia en Europa y USA, centrandos los programas eólicos su interés en aspectos diferentes como, la evaluación de los recursos disponibles, obtención y tratamiento de datos meteorológicos, elaboración de mapas eólicos y localización de emplazamientos, y el cálculo, diseño y construcción de plantas de gran potencia, a la vez que intentó crear incentivos que motivasen a la iniciativa privada a fabricar y comercializar pequeñas turbinas con funcionamiento autónomo, que permitiesen cubrir las necesidades de explotaciones agrícolas o industriales situadas en zonas apartadas.

Dentro de los grandes proyectos, el Honnef alemán consistía en instalar torres de 300 metros de altura, con 3 ó 5 rotores de 150 metros de diámetro, capaces de generar 75 MW; aunque se realizaron estudios a pequeña escala, el prototipo de esta central fue destruido en una incursión aérea.

El anteproyecto Heronemus (U.S.A.) consistía en la construcción de estaciones eólicas compuestas por torres de 113 metros de altura con tres rotores de 73 metros de diámetro; se

pensaba que con 1400 estaciones de este tipo, ubicadas en la costa se podría generar el 8% de la demanda eléctrica U.S.A.

En 1931 se instaló en el Mar Negro una máquina eólica de 100 kW.

Entre 1941 y 1945 estuvo funcionando en U.S.A, una unidad de 1,2 MW.

Una vez finalizada la Segunda Guerra, y como consecuencia del período de escasez que siguió, los países europeos elaboraron programas nacionales para elegir los emplazamientos más adecuados donde deberían instalarse las grandes plantas eólicas que se proyectaban.

El segundo periodo de desarrollo de la energía eólica comienza en los años cincuenta y se prolonga hasta mediados de los sesenta en que, una vez restablecida la economía internacional, acaba perdiendo interés al no resultar sus precios competitivos con los de los combustibles fósiles convencionales, por lo que el bajo precio del petróleo, hasta 1973, cerró el camino al desarrollo de la tecnología eólica; a esta etapa siguió otra de precios del petróleo altos que se prolongó hasta 1986 y que favoreció el desarrollo de los aerogeneradores eólicos como fuente de energía alternativa, renovable no contaminante, capaz de producir electricidad a precios competitivos. En esta época, las redes de electrificación empezaban a ser lo suficientemente extensas como para cubrir la mayor parte de las zonas rurales, por lo que también disminuyeron las ventajas de los aerogeneradores de baja potencia utilizados en zonas aisladas.

El período terminó con un gran número de instalaciones experimentales, construidas de una forma dispersa en países diferentes, sin demasiada conexión entre si.

Solamente en Francia, Dinamarca e Inglaterra se llevaron a cabo programas de cierta importancia. El número de aerogeneradores instalados a finales de 1991 era superior a los 21.000, según datos de la Agencia Internacional de la Energía, con un total de potencia de 2.200 MW, equivalente a dos centrales nucleares de gran potencia, y de los cuales la mitad estaban instalados en los parques eólicos de California.

A finales de 1991 la potencia de origen eólico instalada en la red eléctrica danesa ascendía a 410 MW con una producción de energía equivalente al 2,3% del consumo del país. En Alemania la potencia instalada era de 100 MW y estaba previsto alcanzar los 250 MW en breve plazo.

Holanda contaba con 80 MW de potencia instalada y 100 más en construcción. El programa eólico holandés tiene previsto alcanzar los 1.000 MW hacia el año 2000 y los 2.000 MW en el 2010.

España tenía en fase de realización varios proyectos que completarían los 50 MW hacia finales de 1992. El Plan de Energías Renovables, dentro del Plan Energético Nacional 1992-2000 alcanzó los 100 MW a finales de 1995, aunque las previsiones actuales sobrepasan ampliamente estas cifras.

En cuanto al tipo de máquinas de mayor interés, los resultados obtenidos de las numerosas experiencias realizadas permitieron concretar el campo de trabajo en dos modelos: las turbinas de eje horizontal de dos o tres palas y, en menor medida, las turbinas Darrieux de eje vertical.

El tamaño medio de las máquinas instaladas hasta 1990 estuvo en el rango de los 100 kW, aunque se observaba una clara tendencia ascendente.

En los últimos 10 años los pequeños aerogeneradores aumentaron poco a poco sus potencias, a la vez que mejoraban su fiabilidad y reducían sus costes; las potencias medias de los aerogeneradores instalados entre 1990 y 1991 era de 225 kW; en los últimos años se han podido construir aerogeneradores con potencias mayores, desarrollados por las grandes compañías de la industria aeronáutica, que aumentan la fiabilidad de las máquinas y reducen sus costes, convergiendo hacia una nueva generación de aeroturbinas de 500 kW a 1,2 MW, lo que demuestra el alto grado de madurez alcanzado por esta tecnología.

La fabricación de pequeñas máquinas ha ido perdiendo interés en países con redes de distribución de electricidad muy extendidas, ya que los costes superiores de la energía en instalaciones pequeñas e individuales los hacen poco rentables. El precio del kW/h eólico puede ser, en aerogeneradores de potencia media, la mitad que en los aerogeneradores de potencia baja. La rentabilidad de las aeroturbinas eólicas implica el intentar disminuir costos, tanto en su instalación inicial, como en los gastos de mantenimiento, procurando que el tiempo de vida de la instalación sea superior al del período de amortización.

## **1.4- Estructura del parque eólico de Gibara**

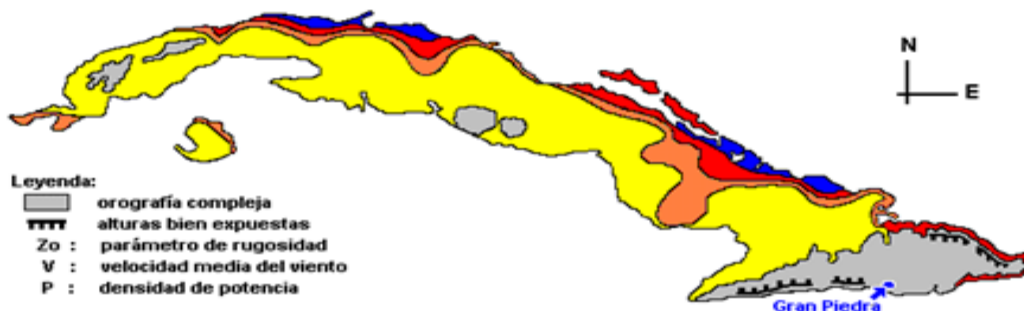
El parque eólico estará compuesto de seis generadores asíncronos de rotor bobinado, conectados en paralelo a un punto de acoplamiento común. Estos serán conectados a la red a través de una línea de seis kilómetros. Cada máquina tiene una tensión nominal de 690 V y serán conectadas al punto común a través de transformadores de 900kW a 33kV. El parque tendrá una potencia nominal total de 5,184 MW. La configuración de los aerogeneradores será la de un parque eólico con un generador de inducción doblemente alimentado de velocidad variable, (DFIG-Doubly Fed Induction Generators) con sus siglas en inglés.

### **1.4.1- Características de los lugares con potencial eólica**

Analizando las características de los vientos, el lugar adecuado que puede ser utilizado para la instalación de turbinas eólicas, debe presentar las siguientes cualidades, [7]:

- Un sitio que debe tener una alta velocidad anual del viento
- No debe haber obstrucciones a una milla o dos contra el viento
- La cima de una colina llana, redondeada y con pendientes suaves que esté en una llanura o una isla lacustre o marino, es un buen sitio
- Una planicie o una playa abierta puede ser un lugar bueno
- Un desfiladero que produzca canalización del viento, también es bueno.

En la figura 2 esta mostrada el mapa del potencial eólica de Cuba.



VELOCIDADES DEL VIENTO ESTIMADAS A LA ALTURA DE 50 M

| Región   | I       | II      | III                           | IV                            | V       | VI      |
|----------|---------|---------|-------------------------------|-------------------------------|---------|---------|
|          | V (m/s) | V (m/s) | V (m/s) P (W/m <sup>2</sup> ) | V (m/s) P (W/m <sup>2</sup> ) | V (m/s) | V (m/s) |
| amarillo | < 5.5   | < 5     | < 4.5 < 150                   | < 4 < 150                     | < 3     | < 5.5   |
| naranja  | 5.5-7.5 | 5-6     | 4.5-5.5 150-250               | 4-5 150-250                   | 3-4     | 5.5-7   |
| rojo     | 7.5-9.5 | 6-8     | 5.5-7 250-400                 | 5-6 250-350                   | 4-5     | 7-8.5   |
| azul     | > 9.5   | > 8     | > 7 > 400                     | > 6 > 350                     | > 5.5   | > 8.5   |

Figura 2. Mapa de la Potencial Eólica de Cuba. Fuente: Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES), Santiago de Cuba.

### 1.5- Relación de la energía mecánica con el viento

El viento transporta una energía mecánica al desplazarse a una velocidad  $v$ . Una masa de aire  $m$  que se desplaza a una velocidad  $v$  tiene una energía cinética que vale  $1/2 mv^2$ . La máquina capaz de transformar parte de esta energía es una máquina eólica.

De toda esta energía mecánica, no toda la energía se puede absorber. La teoría de Betz dice que de un tubo fluido que transporta aire a una velocidad  $v$  y tiene una sección  $s$ , transporta una energía que vale  $1/2 ds v^3$ , (donde  $d$  es la densidad del aire), de la que sólo se puede extraer los  $16/27$  de la misma. Este valor da el máximo posible de utilización de la corriente fluida.

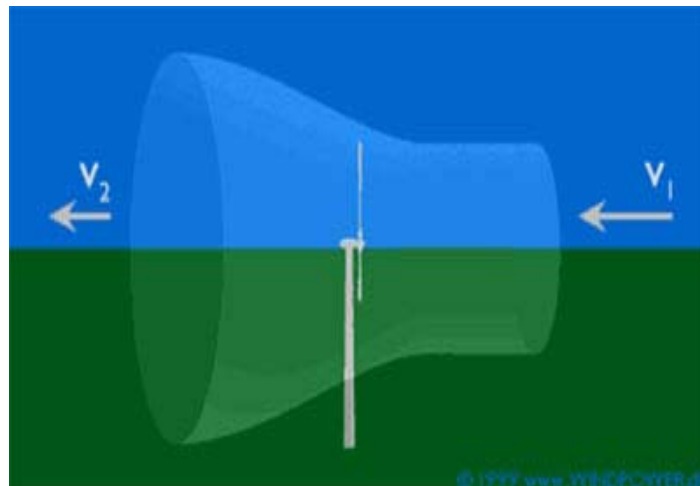


Figura 3. viento incidiendo sobre las alas. Fuente:[15].

Por otra parte, se sabe que la potencia del viento es proporcional al cubo de las velocidades,  $P = Kv^3$ . Por ello, si la velocidad se duplica esta potencia se multiplica por un factor 8.

De acuerdo con los conceptos básicos de la mecánica de fluidos, la velocidad del viento varía exponencialmente con la altura  $H$  debido a la fricción con el suelo, con un exponente  $n$  empírico que depende de las características del terreno, que varía de 0,1 a 0,8. A su vez el viento tiene velocidades variables según las zonas por las que discurre. Un efecto destacable es la aceleración del viento que se produce en las colinas, por efecto Venturi, que hace que tales lugares sean apropiados para la instalación de generadores eólicos, si el perfil de la ondulación es suave y no da lugar a turbulencias.

El potencial eólico de una zona geográfica cualquiera se mide estudiando el número de horas en que esta velocidad supera una fijada. Tomando como abscisas las 8.760 horas que tiene el año y como ordenadas las velocidades se obtiene una curva monótona decreciente representativa.

### 1.6- Velocidades críticas en un aerogenerador

Existe un concepto muy importante a tener en cuenta en una aeroturbina. Una aeroturbina orientada en la dirección del viento empieza a girar lentamente a una determinada velocidad de viento, esta velocidad se llama **velocidad de conexión,  $V_c$** , para esta situación no se produce prácticamente ninguna energía. Por debajo de  $V_c$  la energía obtenida es nula, incluso en algunos sistemas se produce consumo de energía en lugar de producción.

Cuando la velocidad aumenta, hay una velocidad, llamada **velocidad nominal,  $V_n$** , para la cual la máquina empieza a dar la potencia que marca el fabricante. A partir de este punto la máquina proporciona esta potencia hasta que llegue a una velocidad de viento superior, en la cual la máquina se debe frenar para que la fuerza del viento no provoque esfuerzos demasiado elevados en la estructura que podrían destruirla; esta nueva velocidad se llama **velocidad de desconexión  $V_d$** .

Por encima de  $V_d$ , el diseño de la maquinaria no permite una generación mayor de energía, por lo que el exceso de velocidad se desperdicia. Toda máquina eólica debe poseer un diseño (frenos, entrada en pérdida, etc.) que la proteja de los excesos de velocidad del viento, y debe ser provista con los datos sobre las tres velocidades citadas e incluso una gráfica representativa potencia-velocidad.

### 1.7- Tipos de aeroturbinas

Para aprovechar este tipo de energía, la del viento, que generalmente no es constante, se utilizan aeroturbinas que son máquinas eólicas que en un principio se clasifican en función de su eje en **verticales y horizontales**, ver figura 4.

En las de eje vertical sólo son utilizables para producir electricidad la llamada Daerrius, en la cual se pueden alcanzar altas velocidades de giro, capaces de producir energía eléctrica. La desventaja de las aeroturbinas de eje horizontal es que generan menos electricidad a igualdad de costo.

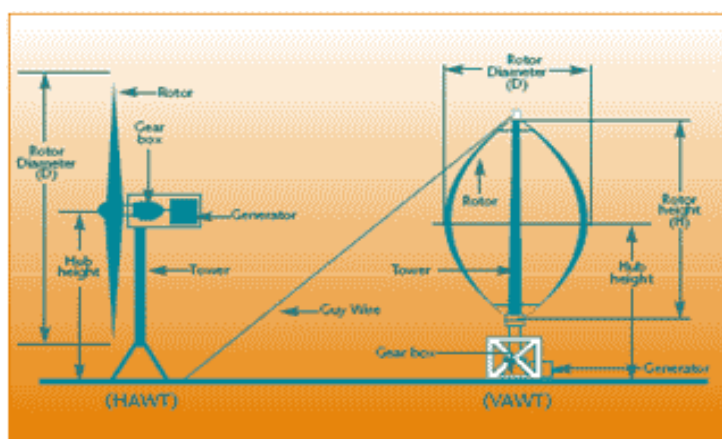


Figura 4. Tipos de aeroturbinas. Fuente: NRCan Small Wind Systems Buyer's Guide

En este caso el eje de giro está situado verticalmente y las palas giran alrededor de él en un plano horizontal. El viento hace fuerza por un lado sobre la parte delantera de las palas, pero a la vez presiona sobre la parte trasera de otra pala, frenándola. El diseño crítico consiste en diseñar la estructura de la pala de modo que por delante sea capaz de captar el mayor viento posible y que simultáneamente ofrezca la menor resistencia al viento por su parte posterior.

La forma aerodinámica de las palas le permite mantener la velocidad de giro una vez que la alcanza, pero el sistema es incapaz de arrancar por sí solo. Esto obliga a disponer un sistema secundario de arranque.

La disposición del rotor le permite captar el viento proveniente de cualquier dirección sin necesidad de dispositivo de orientación. Este hecho se traduce en una simplificación de la maquinaria y en un menor número de averías. Además al estar dispuesto verticalmente el eje, la maquinaria de aprovechamiento de la energía puede situarse directamente sobre el terreno y no es necesario el empleo de una torre como en los sistemas de eje horizontal.

Las aeroturbinas de eje horizontal pueden ser lentas (multipolar) o rápidas. Estas últimas son las máquinas más adecuadas por la producción eléctrica, constando de un rotor, una torre, un buje, un multiplicador y un generador.

El rotor suele tener 2 palas de material similar al de las hélices de los aviones (fibra de vidrio) con un perfil aerodinámico, y están unidas a un buje donde se encastran las palas. Existe a su vez un multiplicador en el que se cambia la velocidad angular que proporciona el eje del rotor a otra velocidad adecuada para producir energía eléctrica. Este generador eléctrico puede ser sincrónico o asincrónico (más usado que el anterior).

El sistema horizontal es el más estudiado y el que mejores rendimientos proporciona; se ha llegado a un coeficiente de aprovechamiento de 0,45 a 0,50 de la potencia mecánica, aunque al transformarla en eléctrica, el rendimiento desciende. Con una elección adecuada del emplazamiento dan buen rendimiento medio, independientemente de la estación del año y de la hora del día, y emplean menos superficie de terreno que otros sistemas para la misma potencia producida.

Sin embargo, la energía producida en este sistema horizontal tiene variaciones instantáneas muy elevadas y difíciles de calcular. Para su emplazamiento deben elegirse zonas sin obstáculos y elevadas. La necesidad de un sistema de orientación para adaptarse a la

dirección del viento complica el sistema y lo hace más propenso a fallas. Dicho sistema suele constar de una veleta que detecta la dirección del viento y de un motor controlado por dicha veleta, que orienta el rotor para que apunte al viento.

### 1.7.1- Origen de la fuerza rotatoria

El principio de funcionamiento de una turbina eólica de eje horizontal es similar al de un avión, por sustentación. El aire incidente sobre las palas se divide en dos corrientes (ver figura 5), una circula por la parte superior del perfil de longitud mayor que la inferior y por tanto a mayor velocidad que en la parte inferior, resultando una diferencia de presión entre ambas caras: depresión en la parte superior y sobrepresión en la inferior, [27].

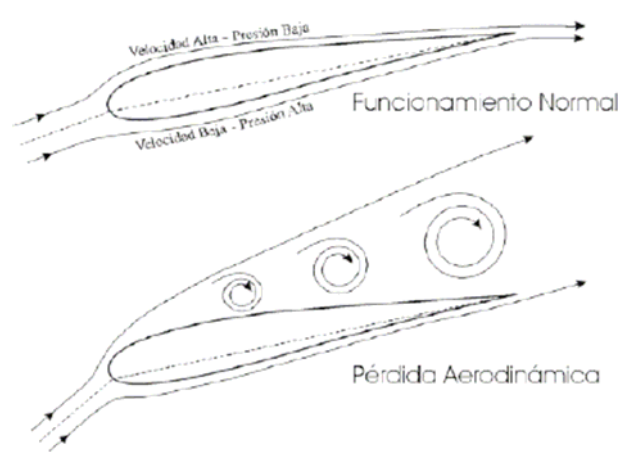
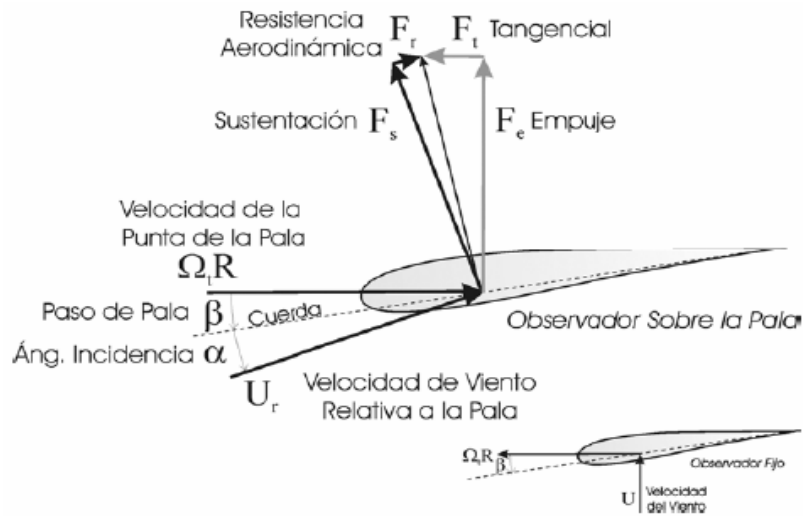


Figura 5 Variación del ángulo de ataque de un perfil de pala

Esta diferencia de presión entre las caras del perfil tiene como resultado la aparición de la denominada *fuerza de sustentación*,  $F_s$ , perpendicular a la *velocidad del viento relativa a la pala*,  $U_r$  (ver figura 6). A la fuerza de sustentación se le suma en la misma dirección de  $U_r$ , una componente de resistencia aerodinámica,  $F_r$ . Si la resultante de estas dos fuerzas se descompone en sus componentes tangencial y normal, la componente tangencial actúa en el sentido del movimiento de las palas, siendo la responsable de la aparición del par motor en el eje de la turbina, en cambio la componente normal (o fuerza de empuje) no realiza ningún trabajo y debe soportarla la torre del aerogenerador.



**Figura 6. Velocidades y fuerzas aerodinámicas en un perfil de pala**

La pérdida de sustentación o pérdida aerodinámica es un fenómeno que existe en el comportamiento aerodinámico de la pala: si se supone que la pala no puede girar sobre su eje (figura 5) y que la velocidad del viento aumenta, variará el ángulo de incidencia de la velocidad del viento relativa a la pala,  $U_r$ , de forma que si aumenta demasiado, se crean turbulencias en la zona del perfil de baja presión. Esta turbulencia que se crea en la parte posterior de la pala disminuye la fuerza de sustentación y en consecuencia la fuerza tangencial que provoca el giro de la pala,  $F_t$ , disminuyendo en consecuencia el par extraído. La pérdida de sustentación se produce cuando el ángulo de incidencia del viento,  $\alpha$  en la figura 6, es superior a un determinado valor, típicamente entre  $10^\circ$  y  $16^\circ$ . Este valor aumenta con la propia velocidad del viento y disminuye con la velocidad del rotor y el paso de pala, definido como el ángulo que forma la cuerda del perfil de la pala con el plano del rotor,  $\beta$  en la figura 6. Con la pérdida de sustentación disminuye el par transmitido al eje de baja velocidad, interesará controlar este fenómeno para regular la potencia capturada.

### **Control de potencia por variación del ángulo de paso ("Pitch controlled")**

Se diferencian dos estrategias de control de potencia según la potencia generada está por debajo del valor nominal o ya lo ha alcanzado el régimen de funcionamiento nominal. El control comprueba varias veces por segundo la potencia generada, cuando es menor que la potencia nominal interesa capturar la máxima energía procedente del viento y por tanto el

control fija el ángulo de paso al óptimo. En cambio, cuando se ha alcanzado la potencia nominal interesa mantener la potencia generada constante y aunque no sea con la máxima eficiencia de conversión eólica, el sistema de control enviará una orden al mecanismo de cambio de paso de pala para que varíe el ángulo de paso, pasando a capturar así menos potencia del viento.

El mecanismo de cambio de ángulo de paso suele ser hidráulico o también con motores de continua (con una batería para situar las palas en la posición de parada en caso de pérdida de potencia o de control). Éstos motores están alojados en el buje, [27].

### ***Control de potencia por pérdida aerodinámica (“Stall controlled”)***

Los aerogeneradores de regulación por pérdida aerodinámica tienen las palas unidas al buje en ángulo fijo, pero el perfil de la pala está aerodinámicamente diseñado para asegurar la pérdida de sustentación al alcanzar la velocidad de diseño.

La principal ventaja de la regulación por pérdida aerodinámica es que se evitan las partes móviles rotor y el complejo sistema de control. En contra, presenta un problema de diseño aerodinámico muy complejo, con las complicaciones que derivan de las vibraciones provocadas por la pérdida de sustentación. Visto desde la pala del rotor el ángulo de incidencia del viento será mayor en la base de la pala unida al buje que en las puntas (donde ya se ha desviado el tubo de corriente), es decir, las palas están contorneadas con el fin de que el ángulo de ataque sea el óptimo a lo largo de la pala y la pérdida de sustentación se produzca a lo largo de la pala. Sin embargo, en el caso particular de aerogeneradores controlados por pérdida aerodinámica es importante que la pala esté construida de tal forma que la pérdida de sustentación se produzca de forma gradual desde la raíz de la pala hacia el exterior a velocidades de viento altas.

### ***Control activo por pérdida aerodinámica (“active stall controlled”)***

Técnicamente estos aerogeneradores se parecen a los de regulación por cambio del ángulo de paso en el sentido en que ambos tienen palas que pueden girar respecto el propio eje de la misma pala. Para obtener una fuerza de giro razonablemente alta a bajas velocidades de viento, las palas giran como en los aerogeneradores de regulación por cambio del ángulo de paso. Sin embargo cuando el aerogenerador alcanza la velocidad nominal presenta una diferencia importante respecto a la regulación por cambio del ángulo de paso: si el generador

va a sobrecargarse, las palas de la turbina girarán en sentido contrario al que lo harían las reguladas por cambio de ángulo de paso (es decir, aumentará el ángulo de paso de las palas para que se produzca antes la pérdida de sustentación, con la finalidad de consumir el exceso de energía del viento generando turbulencias).

La principal ventaja de la regulación activa por pérdida aerodinámica es que la producción de potencia se puede controlar con más exactitud que con la regulación pasiva y además, la máquina puede funcionar casi a potencia nominal para un amplio rango de velocidades de viento (en el caso de un aerogenerador con regulación pasiva por pérdida aerodinámica, a altas velocidades de viento generalmente se producirá una caída en la producción de energía eléctrica, ya que las palas tienen una pérdida de sustentación mayor). El mecanismo de regulación suele ser hidráulico o eléctrico y se aloja en el buje.

## **1.8- Modos de operación**

---

Para aprovechar la energía eólica con fines eléctricos existen dos tipos de sistemas:

- **Instalaciones aisladas (funcionamiento en isla).**
- **Instalaciones conectadas a la red de distribución general.**

### **El aerogenerador asincrónico en redes aisladas**

En las instalaciones aisladas, la discontinuidad de este recurso hace que el principal problema resida en la acumulación o reserva de la energía producida por el viento para los períodos en que este no sople.

Su análisis es mucho más complejo que cuando se encuentre conectado a una línea, porque la frecuencia no está fija y la excitación se aporta a través de capacitores conectados a los bornes. La frecuencia depende de no solamente de la velocidad del accionamiento mecánico, sino también del deslizamiento, que depende de la potencia requerida por la carga eléctrica. Los bancos de capacitores se conectan normalmente en delta, por la razón que está resulta en corrientes de línea más balanceadas. Sin embargo, el modelo de una fase es a base de línea a neutro, entonces  $x_c$  en el modelo es un tercio de la reactancia capacitiva conectada entre líneas en el arreglo delta, (ver figuras 7 y 8). La combinación de capacitores y carga eléctrica debe presentar un factor de potencia en adelanto al aerogenerador, o no habrá voltaje de salida.

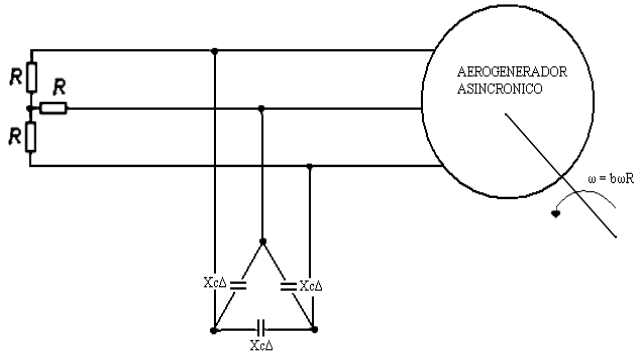


Figura 7 Diagrama de conexión y modelo circuital de una fase del sistema trifásico

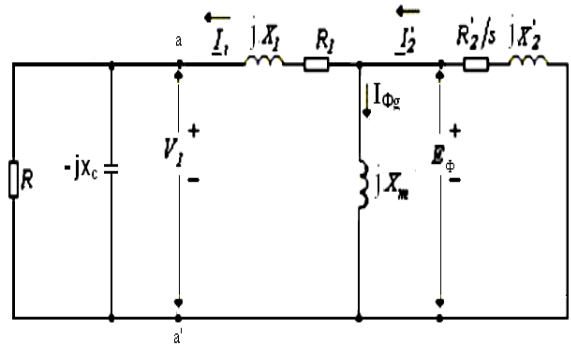


Figura 8 Modelo de una fase a frecuencia nominal

### Efecto de variaciones de frecuencia

Si se le designa  $f_B$  a la frecuencia nominal de la máquina, y a la velocidad sincrónica correspondiente  $\omega_B$ , y entonces se le designa a la relación velocidad accionada a velocidad sincrónica base  $b$ , entonces  $b$  será:

$$b = \frac{\omega}{\omega_B} \quad (1)$$

Similarmente, si a la relación de frecuencia generada a frecuencia nominal se la denomina  $a$ , esto será:

$$a = \frac{f}{f_B} \quad (1.1)$$

Se asumirá que todas las reactancias del modelo se miden a frecuencia nominal. Entonces bajo condiciones de operación del generador, las reactancias inductivas serán proporcionales a la frecuencia y la reactancia capacitiva variará inversamente. También  $|E_\Phi|$ , el voltaje inducido por el flujo del entrehierro será proporcional a la frecuencia. Se muestran estos efectos en la figura 8.

La velocidad sincrónica también varía con frecuencia, y se da por  $a\omega_B$ . El deslizamiento bajo condiciones de operación será:

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = \frac{a\omega_B - b\omega_b}{a\omega_B} = \frac{a - b}{a} \quad (1.2)$$

Como el deslizamiento es negativa en operación como generador, la cantidad

a-b también será negativa. Dividiendo cada impedancia en el modelo y el voltaje por  $a$ , no cambian las corrientes del modelo, pero permite el uso del voltaje a frecuencia nominal  $|E_\phi|$ .

### Factores que afectan a la frecuencia generada

El deslizamiento en un generador asincrónico será pequeño y negativo. La carga eléctrica no se puede incrementar más del punto donde se desarrolla torque máximo. En este punto, la generación se hace inestable, y la generación cae. La frecuencia de generación se da por:

$$f = \frac{p\omega_s}{4\pi} = \frac{p}{4\pi} \frac{\omega}{1-s} \quad (1.3)$$

Dado que el deslizamiento es negativo, la cantidad  $(1 - s)$  será ligeramente mayor que la unidad. La frecuencia, entonces, dependerá principalmente de la velocidad y decrementará ligeramente a medida que se incrementa la potencia de la carga eléctrica. [McPherson].

### Excitación y desarrollo de voltaje

Para poder desarrollar un voltaje en los terminales de un aerogenerador aislado, dos condiciones deben existir. El núcleo del rotor debe tener algún magnetismo remanente, y suficiente capacidad de excitación se debe conectar a los bornes. No es necesario que el núcleo del rotor sea altamente magnetizado. Normalmente, una operación previa habrá dejado al rotor con suficiente magnetización. En el caso que no, la conexión de un acumulador a dos terminales cualquiera del estator (con el rotor bloqueado) servirá para este propósito.

### Instalaciones conectadas a la red de distribución general

Las ventajas de este último sistema son un mayor aprovechamiento energético, pues la propia red actúa como acumulador energético, su transmisión a sitios alejados es fácil y su pequeño aporte discontinuo no afecta a la estabilidad de la red.

#### 1.8.1- Configuraciones típicas de los aerogeneradores

---

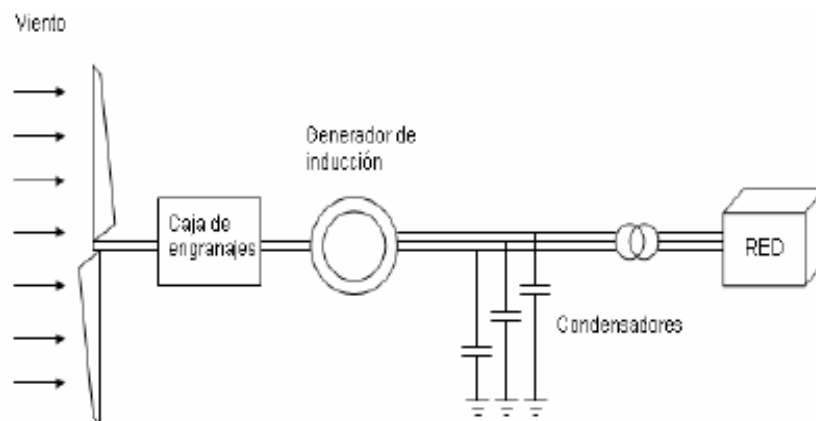
En dependencia del tipo de generador involucrado y de la velocidad (fija o variable) a la cual funciona el sistema, se tienen distintas configuraciones de generadores eólicos. Un resumen con las configuraciones más usadas en la actualidad es la siguiente:

- Generador Directamente conectado a la red

- Operación a velocidad fija
- Principalmente generadores de Inducción
- Necesidad de compensación
- Sistema con etapa CA-CC-CA
  - Operación a velocidad variable
  - Generadores sincrónicos y asíncrónicos

Este trabajo se concentra en configuraciones que utilizan generadores de inducción solamente.

La Figura 9 presenta las principales componentes de un parque eólico típico con generadores de inducción. En este caso la turbina opera a velocidad fija, transfiriendo la potencia generada directamente al sistema eléctrico.



**Figura 9 Parque eólico con generador de inducción a velocidad fija**

Tal como se dijo anteriormente, los generadores de inducción demandan potencia reactiva que debe ser abastecida ya sea por la red eléctrica, o a través de la instalación de equipos de compensación como bancos de condensadores o equipos de electrónica de potencia. De forma tal de mantener los costos lo más bajo posibles, generalmente la solución entregada por los bancos de condensadores shunt locales es la más utilizada.

En algunas configuraciones, es necesaria una compensación reactiva especial en el límite del parque eólico definido por el punto de acoplamiento común o PCC1 por sus siglas en inglés, como por ejemplo compensación reactiva variable. En otros casos, los niveles/variaciones de voltaje en el PCC pueden demandar un transformador con cambiador

de derivación bajo carga. Generalmente los condensadores son diseñados para proporcionar un factor de potencia bueno a una cierta velocidad de viento.

Las variaciones de la potencia activa y reactiva en los sistemas de velocidad fija debido a las variaciones en la velocidad del viento, son un importante problema de operación que ha hecho poco a poco más frecuente el uso de sistemas de velocidad variable.

Por su parte, la operación a velocidad variable presenta beneficios tales como el de reducir las fluctuaciones de voltaje en el PCC y el de un control independiente de la potencia activa y reactiva entregada a la red. Otro beneficio es que la velocidad del rotor puede ser ajustada en función de la velocidad del viento, de forma tal de mantener la relación entre la velocidad lineal de las aspas y la velocidad del viento ( $TSR$ ) en su valor óptimo. A esta  $TSR$ , la eficiencia aerodinámica  $P_C$  es máxima, lo que significa que la conversión de energía es a su vez maximizada. La mayor desventaja es la de un mayor costo de la turbina en comparación a las de operación a velocidad fija debido principalmente al a etapa inversora.

Existen básicamente dos enfoques en los aerogeneradores de velocidad variable. Un primer enfoque es uno en el cual toda la potencia generada por la turbina debe pasar a través de un convertidor de frecuencia antes de ser entregada a la red permitiendo, por ende, un amplio rango de variación de velocidad. El segundo cuenta con un rango restringido de variación de velocidad en el cual sólo una fracción de la potencia de la turbina debe ser convertida.

La figura 10 presenta las principales componentes de un parque eólico de velocidad variable con generador de inducción doblemente alimentado. La principal característica de la máquina es la de ser excitada tanto desde el estator como del rotor. Esto se aprecia claramente en la figura 10 donde los devanados del estator están directamente conectados a la red mientras que los del rotor se conectan a esta mediante un convertidor de potencia bi-direccional. El conversor del lado de la red trabaja siempre a la frecuencia de la red, mientras que el conversor del lado del rotor lo hace a frecuencia variable dependiendo del punto de operación [5]. Las variaciones de la velocidad de la turbina típicamente están en el rango de  $\pm 10$  a  $\pm 25$  % dependiendo de las dimensiones del conversor [8]. Con la finalidad de cubrir un amplio rango de operación, el generador de inducción doblemente alimentado está capacitado para trabajar como generador tanto en la zona con deslizamiento positivo ( $s > 0$ ) como negativo ( $s < 0$ ). Dado lo anterior, el conversor electrónico en el lado del rotor debe

poder operar con flujos de potencia en ambos sentidos, razón por la cual en estas configuraciones se usa un convertor bi-direccional.

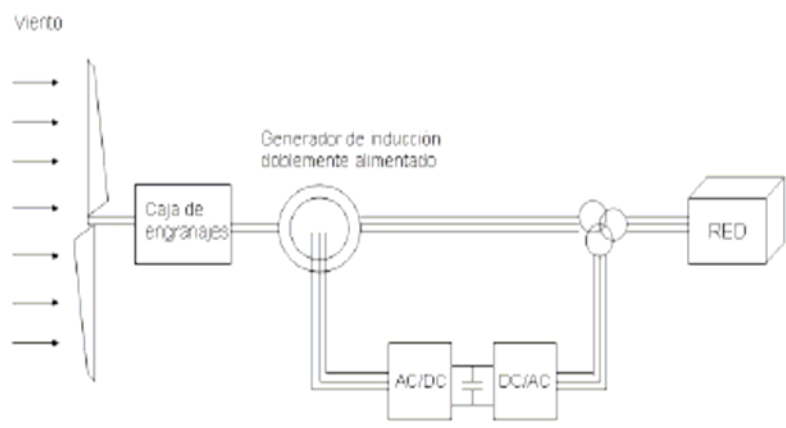


Figure 10 Parque eólico con generador de inducción doblemente alimentado de velocidad variable.

La operación variada de la turbina eólica con generador de inducción doblemente alimentada se logra al inyectar un voltaje variable en el rotor a la frecuencia de deslizamiento, [23].

### Sistemas de control

La potencia que entregan los aerogeneradores procede de una masa de aire en movimiento que no es controlable y se requiere de un sistema de regulación que controle la energía extraída por el rotor, [9].

El punto de operación de la turbina eólica se determina continuamente con la velocidad y la variación del viento, pudiéndose distinguir cuatro estados de operación básicos, que supervisa continuamente el sistema de control.

- **Turbina parada:** como resultado de que la velocidad del viento es menor que la velocidad de conexión. La velocidad de conexión suele ser de 3-5 m/s.
- **Turbina a carga parcial:** si la velocidad del viento entre la de conexión y la nominal – interesa extraer del viento la máxima energía posible para llegar cuanto antes a la potencia nominal, que será a la velocidad nominal del viento, normalmente 12-15 m/s.
- **Turbina a plena carga:** la velocidad del viento es mayor que la nominal y menor que la de desconexión. La velocidad de desconexión suele ser de 25 m/s.
- **Turbina parada:** como resultado de la velocidad de viento elevada, mayor que la de desconexión.

El control de aerogeneradores es un sistema jerárquico de dos niveles: el nivel más elevado o sistema de supervisión y un nivel inferior o sistema de control de velocidad y potencia.

El sistema de control encargado de la supervisión, a partir de los datos medidos, genera los siguientes valores:

- Valores de referencia para el sistema de control de potencia y de velocidad.
- Señales de control secuenciales, haciendo posible que el aerogenerador pase de un estado de operación a otro.
- Chequeos secuenciales del estado del aerogenerador, realizando las funciones de protección.

El sistema de control de potencia y de velocidad se puede considerar como dos subsistemas por separado. El primero actúa sobre el rotor y el segundo sobre el convertidor que gobierna el generador.

El primer subsistema controla el ángulo de paso de las palas (los parámetros regulados son velocidad y potencia) con la finalidad de:

- Capturar tanta energía como sea posible para las condiciones atmosféricas dadas.
- Proteger el rotor, el generador y los equipos de electrónica de potencia de sobrecargas durante vientos elevados.
- Proteger las partes mecánicas de la turbina eólica después de la pérdida de carga (momento en que crece la velocidad del rotor, pudiéndose producir el empalamiento de la máquina).

El segundo subsistema controla el par (los parámetros regulados son la potencia, las corrientes, etc.) con la finalidad de suavizar la potencia de salida del aerogenerador para amortiguar las oscilaciones electromecánicas. Generalmente, se pueden considerar dos esquemas básicos de sistemas de control de turbinas eólicas:

- ❖ Velocidad específica  $\lambda$  constante. Se basa en que la máxima potencia extraíble del viento es a la velocidad específica óptima ( $\lambda_{opt}$ ). La memoria del sistema de control tiene almacenada la curva característica de potencia  $p(\lambda, \beta)$   $C$  de la turbina, continuamente se miden la velocidad del viento y del rotor, calculando la velocidad específica y comparándola con la de referencia ( $\lambda_{opt}$ ). La señal de error se transmite al sistema de control que cambiará la velocidad de la turbina para minimizar el error.

- ❖ **Máximo punto de potencia.** Se basa en la curva de potencia en función de la velocidad del viento (ver figura 6.7). Cuando el aerogenerador está en funcionamiento, la velocidad del rotor decrece y aumenta en pequeños incrementos mientras se mide continuamente la potencia: si  $dP/d\omega > 0$ , se incrementa la velocidad del rotor; si  $dP/d\omega < 0$ , la velocidad del rotor se disminuye; finalmente si  $dP/d\omega \approx 0$  no se varía la velocidad del rotor.

Se utilizan ambos esquemas de control sólo cuando el aerogenerador trabaja a carga parcial. La estructura del sistema de control depende del tipo de aerogenerador utilizado. Para sistemas de velocidad constante (pero variación del ángulo de paso), el sistema de control actúa sobre las palas del rotor, para aerogeneradores de velocidad variable se tendrá además el control de velocidad. En algunos casos se utilizan sistemas de control diferentes para el arranque, parada u operaciones intermedias.

La figura 11 representa un esquema general del control implementado para una turbina de velocidad variable con generador de inducción doblemente alimentado. El esquema de control se puede dividir en tres partes principales: el control del ángulo de paso de las aspas del aerogenerador (regulación de velocidad), el control del convertor en el lado del rotor y el control del convertor en el lado de la red.

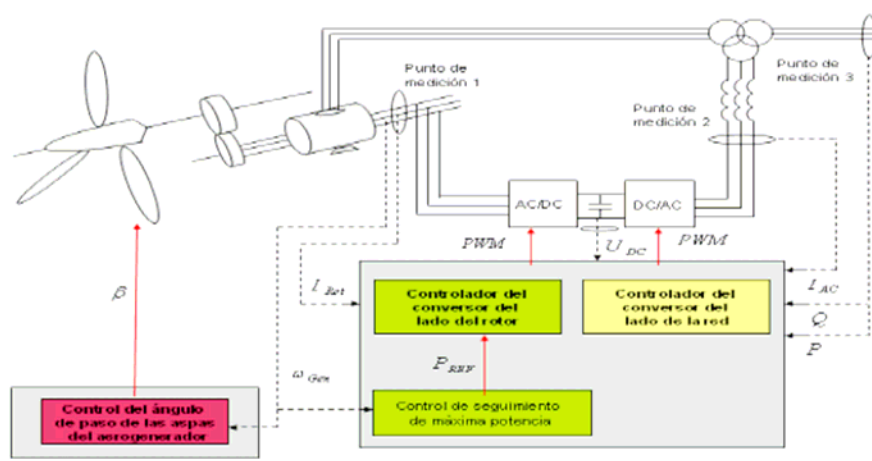


Figura11 Sistema de control con generador de inducción doblemente alimentado, [9].

La figura 12 muestra el esquema de un generador de inducción de velocidad fija directamente conectado a la red. El sistema consta del control para regular el ángulo de las aspas del aerogenerador, del modelo aerodinámico, mecánico y el modelo del generador.

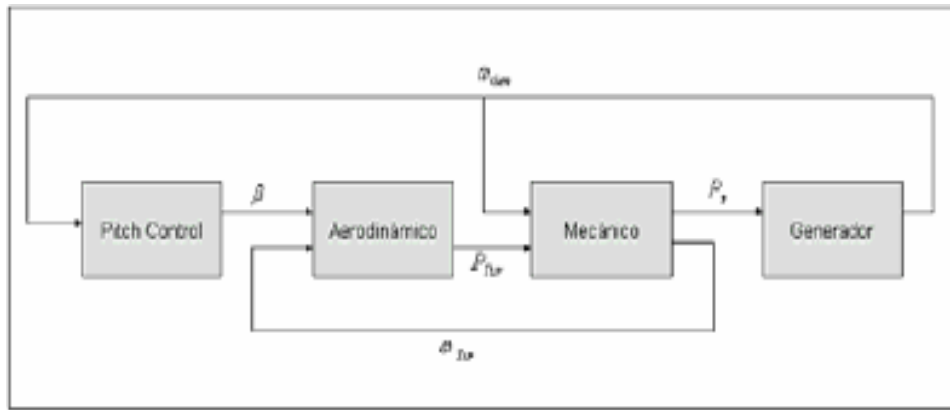


Figura 12 Sistema de control con generador de inducción, [9]

El modelo mecánico, aerodinámico y del control del ángulo de las aspas del aerogenerador son los mismos que en el caso del generador de inducción doblemente alimentado.

### 1.8.2- Calidad de energía de la generación eólica

La finalidad de un sistema eléctrico de potencia es producir, transportar y distribuir a los consumidores energía eléctrica manteniendo los parámetros dentro un rango definido. Sus principales parámetros son la tensión, la frecuencia y la forma sinusoidal. Debido a la estructura del sistema eléctrico y a fenómenos físicos externos, es imposible mantener estos parámetros dentro de un rango definido: la tensión está sometida a variaciones debido a la energía reactiva consumida; al mismo tiempo el consumidor puede experimentar perturbaciones eléctricas como huecos de tensión, interrupciones, etc.; la frecuencia, en cambio, depende del equilibrio entre la potencia activa generada y consumida. A parte de estos fenómenos, se debe considerar la existencia de cargas no lineales, cada vez más presentes en la red, que generan armónicos y flickers (parpadeos), provocando la distorsión de la onda sinusoidal. En global, se puede caracterizar el suministro con los siguientes parámetros según la norma EN 50160:

- ❖ Frecuencia
- ❖ Amplitud de la tensión suministrada

- ❖ Variaciones de la tensión suministrada
- ❖ Variaciones rápidas de tensión
- ❖ Huecos de tensión
- ❖ Interrupciones breves de la tensión suministrada
- ❖ Interrupciones largas de la tensión suministrada
- ❖ Sobretensiones temporales en la red entre fases y tierra
- ❖ Sobretensiones transitorias entre fases y tierra
- ❖ Desequilibrio de la tensión suministrada
- ❖ Tensiones armónicas
- ❖ Tensiones interarmónicas
- ❖ Señales de transmisión de información por la red

En los sistemas eléctricos que integran turbinas eólicas pueden ser éstas las que emitan perturbaciones a la red o ser las mismas susceptibles a estas perturbaciones provenientes de la red.

La aplicación de la energía eólica puede provocar problemas con la calidad de la energía en el sistema. En el caso de los aerogeneradores doblemente alimentados, los convertidores electrónicos de potencia traen con ellos la inyección de corrientes armónicas en la red que pueden provocar distorsiones no aceptables en el voltaje de la carga. Para esto el IEEE 519, [9] y otras normas especifican niveles máximos permisibles de distorsión de voltaje y corrientes armónicas que el convertidor inyecta al bus de generación. En dependencia de la impedancia del sistema que se ve por el convertidor, el factor limitante será la inyección de corrientes armónicas o la especificación de distorsión de voltaje. Ya se sabe que la potencia de salida de los aerogeneradores varía debido a razones como la sombra de la torre y condiciones de viento. Estas variaciones de potencia resultan en parpadeos (flickers) en el bus de carga. Estos parpadeos se pueden corregir por compensación de potencia reactiva utilizando los convertidores del aerogenerador doblemente alimentado.

## Capítulo II

### 2.1- Introducción

---

La conexión de los parques eólicos a las redes eléctricas presenta problemas de diferente naturaleza. Estos problemas se derivan de la naturaleza del elemento de conversión electromecánico de energía (la máquina asíncrona) y de la característica aleatoria de la fuente de energía primaria (el viento). La máquina asíncrona carece de capacidad de regulación de tensión y frecuencia y absorbe potencia reactiva en todo su margen de funcionamiento. Es preciso pues, que la red a la que está conectada proporcione la potencia reactiva que necesita y mantenga la tensión y frecuencia en sus bornes ante variaciones de la carga. Por otro lado, la potencia desarrollada por la turbina eólica que acciona el generador asíncrono depende de la velocidad del viento.

Estos problemas pueden tener diferente impacto dependiendo de las características de la red a la que está conectado el parque: red aislada o sistema interconectado. En cualquier caso, la conexión de un parque eólico a una red requiere la realización de estudios detallados tanto de régimen permanente como de régimen dinámico para valorar con precisión su impacto. Este capítulo describe los modelos estacionarios y dinámicos desarrollados para la simulación en el programa MATLAB, estableciendo las ecuaciones fundamentales necesarias para los cálculos.

### 2.2- Análisis estacionario del aerogenerador

---

Al girar el rotor de una máquina asíncrona, conectado a la red con fuentes de potencia reactiva, con una frecuencia mayor que la frecuencia de rotación del campo magnético ( $\Omega > \Omega_1$ ), la f.e.m. en el devanado del rotor varía su dirección en comparación al régimen de motor. A causa de esta, varía también su dirección las componentes activas de las corrientes  $I_2$  e  $I_1$ , la máquina cede potencia a la red y funciona como un generador, [Ivanov]. Tomando esto en consideración se pasa a realizar el análisis del generador de inducción en régimen estacionario basado en el circuito equivalente de la figura 2.1.

#### Circuito Equivalente de la máquina asíncrona

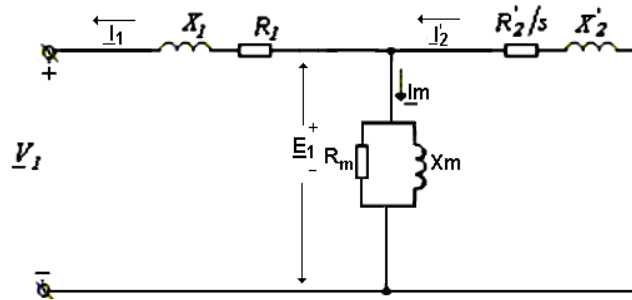


Figura 2.1 Circuito equivalente de la maquina asincrónica en régimen generador.

En el análisis en estado estacionario, se presta mucha atención a los valores de las corrientes y voltajes en valores efectivos en vez de los valores instantáneos, [Fitzgerald].

Entre las características de funcionamiento importantes con respecto al estado estacionario se encuentran las *variaciones de corrientes*, *velocidad*, y las *pérdidas* mientras que cambian los requisitos del *momento de la carga*, el *momento de arranque*, y el *momento máximo*. Todas estas características pueden ser determinadas con el uso del circuito equivalente.

Aplicando las leyes de Kirchhoff de tensión y de corriente, se puede escribir las tensiones y las corrientes del generador de la manera siguiente:

$$\begin{aligned}\underline{U}_1 &= \underline{E}_1 - \underline{I}_1(R_1 + jX_1) \\ \underline{U}_1 &= \underline{E}_1 - \underline{I}_1 \underline{Z}_1\end{aligned}\quad (2.1)$$

$$\begin{aligned}\underline{E}_1 &= -\underline{I}_2(R'_2/s + jX'_2) \\ \underline{E}_1 &= -\underline{I}_2 \underline{Z}'_2\end{aligned}\quad (2.2)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 - \underline{I}_m \quad (2.3)$$

$\underline{U}_1$  es la tensión en los bornes del estator.

$\underline{E}_1$  f.e.m. inducida a través del entrehierro y que pasa al rotor de la maquina y sería la misma f.e.m que atraviesa el entre hierro desde el rotor al estator  $\underline{E}_2$ .

$\underline{Z}_1$  y  $\underline{Z}_2$  impedancias del estator y del rotor respectivamente.

**Características de funcionamiento y características mecánicas**

Conociendo las impedancias del circuito equivalente de la máquina asincrónica (generador), ver el anexo 2, se puede determinar sus características de funcionamiento en estado estacionario para cualquier velocidad. Estas características se resumen en los siguientes pasos:

1. Cálculo de la velocidad sincrónica en Rad./s o en r/min.:

$\omega_s = \frac{2\pi f_1}{p}$ , ó  $n_s = \frac{60 f_1}{p}$ , donde  $p$  es el número de pares de polos y  $f_1$  es la frecuencia del estator.

2. Para la velocidad deseada, calcula el resbalamiento ( $s$ ):

$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = \frac{n_s - n}{n_s}$ , donde  $\omega$  y  $n$  son las velocidades de rotación del rotor en Rad./s y r/min., respectivamente.

Suele aclarar que en el caso del generador, el deslizamiento o resbalamiento será negativo ya que la máquina será operada por encima de la velocidad sincrónica.

3. Calcula la impedancia del rotor  $Z_2$ :
4. Calcula la impedancia de fase  $Z_f$ . Esta es el efecto del campo magneto resultante sobre la impedancia de una fase del estator:

$$Z_f = \frac{Z_2 * Z_M}{Z_2 + Z_M} = R_f + jX_f$$

5. Calcula la impedancia en los bornes de la fase de la máquina:

$$Z_{in} = Z_1 + Z_f$$

6. Calcula la corriente de fase:

$$\underline{I}_1 = \frac{V_{1m} \angle 0^\circ}{Z_{in}} = |I_1| \angle \theta_{\phi m}$$

7. Calcule el factor de potencia:  $\cos \theta_{\phi m}$
8. Calcula las pérdidas de cobre del estator:

$$P_{cob_1} = 3I_1^2 R_1$$

9. Calcula la potencia en el entrehierro,  $P_g$ , o potencia electromagnética,  $P_{em}$ :

$$P_g = 3I_1^2 R_f$$

10. Calcula las pérdidas de cobre del rotor:

$$P_{cob_2} = 3I_2^2 R_2 = s * P_g$$

11. Calcula la potencia mecánica que está recibiendo la máquina en su eje por la turbina eólica :

$$P_{in} = P_{mec} = (1 - s)P_g$$

12. Calcula el momento de entrada:

$$M_2 = \frac{P_{mec}}{\omega}$$

13. Calcula el momento desarrollado en el entrehierro:

$$\tau_d = \frac{P_g}{\omega_s} \text{ en } [Nm] \text{ ó } 7.04 * \frac{P_g}{n_s} \text{ en } [lb - ft]$$

14. Calcula de la potencia de salida:

$$P_{out} = \sqrt{3}V_L |I_1| \cos \theta_{\phi m}$$

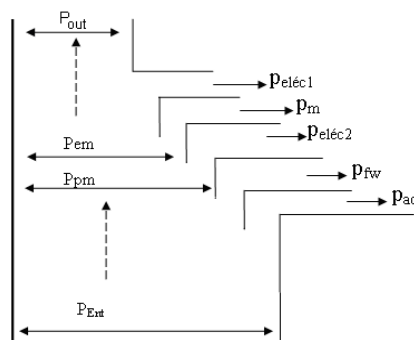
$$P_{out} = P_{em} - p_{elec1} - p_m \text{ en } [W] \text{ ó } \frac{P_{out}}{746} \text{ en } [Hp],$$

15. Calcula la eficiencia o rendimiento:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 1 - \frac{\Delta P}{P_{in}}$$

### **Diagrama energético de un generador asincrónico**

Basado en el circuito equivalente en T de la máquina asincrónica se puede señalar que la transformación de la energía mecánica y la potencia, durante el régimen de generador se hace de derecha a izquierda, es decir, desde el rotor hacia el estator. [12], figura 2.2.



**Figura 2.2: Diagrama energético de una máquina asincrónica como generador**

$P_{Ent}$  : La potencia mecánica aplicada a la máquina.

$P_{em}$  : La potencia electromagnética transmitida por medio del campo magnético desde el rotor al estator.

$P_{pm}$  : Potencia mecánica interna de la maquina.

$p_{pm}$  : Pérdida mecánica interna (en la fricción de los cojinetes y en las escobillas de la maquina con rotor bobinado).

$p_m$  : Pérdidas magnéticas en el núcleo del rotor.

$p_{ad}$  : Pérdidas adicionales

$p_{elec\ 1}$  : Pérdidas eléctricas en el estator.

$p_{elec\ 2}$  : Pérdidas eléctricas en el rotor.

Como el deslizamiento en este régimen es negativo ( $s < 0$ ), pues tanto la resistencia  $R'_2/s$ , varia el signo, y se hace negativa.

Aunque los conductores eléctricos pueden tener sólo resistencia positiva, no es menos cierto que la introducción del concepto acerca de las resistencias negativas es útil. Si las resistencias positivas son consumidores de energía ( $I^2 R$ ), pues, las resistencias negativas es necesaria analizarlas como fuentes o generadores de energía eléctrica ( $I^2 R$ ).

### **Características mecánicas del generador**

Las características mecánicas de la maquina asincrónica son las características de torque en función de velocidad.

Se puede desarrollar una expresión del momento de la máquina de inducción en función de su deslizamiento aplicando el teorema de Thevenin al circuito equivalente, [McPherson]. El circuito del rotor, referido al estator, se considere como si fuera conectado a un generador equivalente de Thevenin. Ver figura 2.3.

Aquí se pasa directamente a las expresiones necesarias para obtener las características mecánicas.

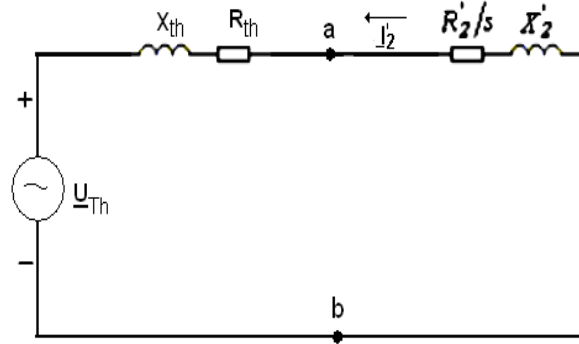


Figura 2.3. Circuito Equivalente de Thevenin.

La tensión de Thevenin se considera como aquella fracción de tensión que cae en la rama de magnetización en circuito abierto.

$$\underline{U}_{Th} = \frac{Z_M * V_1}{(Z_M + Z_1)} \quad (2.4)$$

Donde:

$$\underline{Z}_M = \frac{R_m * jX_m}{R_m + jX_m} = R_M + jX_M \quad (2.5)$$

La corriente en el rotor referido al estator será:

$$\underline{I}'_2 = \frac{\underline{U}_{Th}}{R_{th} + \frac{R'_2}{s} + j(X_{th} + X'_2)} \quad (2.6)$$

El torque desarrollado esta dado por:

$$\tau_d = \frac{Pg}{\omega_s} = \frac{1}{\omega_s} 3I'^2_2 \frac{R'_2}{s} \quad (2.7)$$

Ahora sustituyendo la corriente en la expresión del torque, la expresión queda como sigue:

$$\tau_d = \frac{3}{\omega_s} \frac{U_{Th} * R'_2 / s}{[(R'_2 / s + R_{th})^2 + (X'_2 + X_{th})^2]} \quad (2.8)$$

Siendo que  $\omega_s$  es una constante cuando la frecuencia de la red es constante, el momento desarrollado es proporcional a Pg. La potencia de entrehierro por fase,  $Pg/3$ , es completamente absorbida por la resistencia  $R'_2/s$ . Pues el torque máximo corresponde a la potencia máxima transferida a  $R'_2/s$ . Con esto tomado en cuenta, el deslizamiento máximo se deduce como:

$$s_M = \frac{R'_2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X'_2 + X_{th})^2}} \quad (2.9)$$

## El diagrama circular de la máquina asincrónica

Al variar el resbalamiento del rotor de la máquina asincrónica para  $U_1$  y  $f = \text{constantes}$  y siendo constantes los parámetros  $R_1$ ,  $x_1$ ,  $R_2'$ ,  $x_2'$ ,  $R_m$  y  $x_m$ , el extremo del complejo de la corriente del estator  $I_1$  se desplaza por una circunferencia. Esta circunferencia, que es el lugar geométrico de la corriente  $I_1$ , junto con unas construcciones suplementarias, imprescindibles para la determinación gráfica de las características electromecánicas, se llama – diagrama circular de una máquina asincrónica, ver anexo 6.

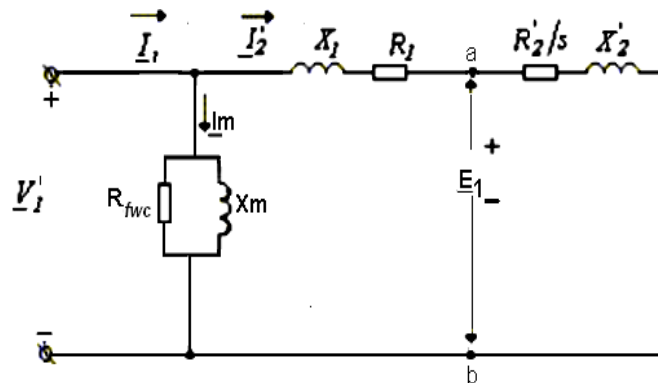


Figure 2.4 Circuito equivalente aproximado de una fase de una máquina asincrónica

El diagrama circular se basa en el circuito equivalente aproximado de la máquina de inducción (régimen motor) que se muestra en la figura 2.4. La rama paralela se ha desplazado desde los puntos a, b hasta los terminales e incluye una resistencia  $R_{fwc}$  que representa las pérdidas rotacionales. Si se desea realizar un cálculo preciso utilizando el modelo aproximado, la tensión de fase en los bornes se debería reducir a un valor que hará que la  $I_2$  sea lo mismo que era antes de la traslación de la rama paralela. Se puede demostrar que ésta tensión reducida está casi en fase con la verdadera tensión en los bornes  $V_1$  y se obtiene casi precisamente por la expresión:

$$V_1' = V_1 \left(1 - \frac{x_1}{x_m}\right) \quad (2.10)$$

Dado que  $R_{fwc}$  se ocupa de todas las pérdidas rotacionales, el circuito aproximado asume cero deslizamiento en vacío en el eje del motor. Entonces, en vacío,  $\frac{r_2}{s}$  es un circuito abierto,

y la corriente de línea en vacío  $I_{nl}$  es  $\frac{V_1'}{Z_s}$ . Según la ley de corriente de Kirchoff, la corriente

de línea bajo carga es:

$$I_1 = I_{nl} + I_2 \quad (2.11)$$

donde:

$$|I_2| = \frac{V_1'}{|Z_1 + Z_2|} \quad (2.12)$$

y

$$\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 = R_1 + \frac{R_2}{s} + j(x_1 + x_2) \quad (2.13)$$

La corriente  $I_2$  atrasará a  $V_1'$  por el ángulo de impedancia

$$\theta_2 = \sin^{-1} \frac{x_1 + x_2}{|\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2|} \quad (2.14)$$

, entonces, la ecuación de  $|I_2|$  se puede manipular de la siguiente manera:

$$|I_2| = \left( \frac{V_1'}{x_1 + x_2} \right) \left( \frac{x_1 + x_2}{|\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2|} \right) = \frac{V_1'}{x_1 + x_2} \sin \theta_2 \quad (2.15)$$

Este último se reconocerá como la ecuación polar de un círculo de la forma  $\rho = D \sin \theta$ , donde D es el diámetro del círculo. Entonces el trazo de  $I_2$  es un círculo de diámetro

$$D = \frac{V_1'}{x_1 + x_2} \quad (2.16)$$

Se debe señalar que  $x_1 + x_2$  es la reactancia a rotor bloqueado ( $X_{RB}$ ) cuando se haga este ensayo a frecuencia nominal.

La ecuación del diagrama circular se puede escribir por insertar

$$I_2 = |I_2| \angle -\theta_2 = \left( \frac{V_1'}{x_1 + x_2} \sin \theta_2 \right) \angle -\theta_2 \quad (2.17)$$

, en la ecuación (2.15), y quedará

$$I_1 = I_{nl} + \left( \frac{V_1'}{x_1 + x_2} \sin \theta_2 \right) \angle -\theta_2 \quad (2.18)$$

## 2.3- Análisis dinámico del aerogenerador

El modelo físico escogido para representar a las máquinas rotatorias esta compuesto de varias ramas eléctricas, donde cada una tiene resistencia e inductancia propia las cuales aparecen acopladas inductivamente, como se observa en la figura 2.5.

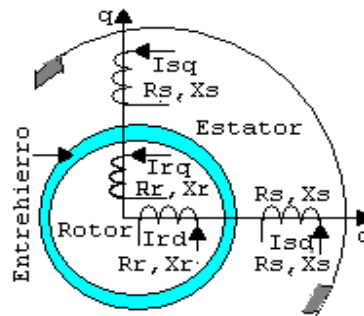


Figura 2.5. Ilustración del Modelo físico de las máquinas rotatorias en los ejes  $d$ ,  $q$

Cuando son energizados, cada rama produce un campo magnético y si el total tiene las mismas características del creado por la máquina física, las ecuaciones obtenidas del circuito pueden ser usadas para calcular el funcionamiento de la máquina, [11].

Dada la estructura idealizada, la cual tiene una simetría radial y es lineal magnéticamente (Saturación e histéresis despreciable), el principio de superposición es aplicable y el campo puede ser descompuesto en componentes a lo largo de cualquiera de los dos ejes, los cuales fueron escogidos para estar a un ángulo recto uno respecto del otro para conveniencia del análisis.

Las bobinas modelos son escogidas para estar estacionarias, y la realidad que las bobinas en la máquina física puedan rotar es manipulada en la matemática por una transformación de coordenadas. Realizando una transformación de ejes móviles a ejes fijos, se llega a la conclusión que cualquier máquina rotatoria puede ser estudiada como una máquina estática. Cuando se utiliza un modelo es conveniente usar una terminología estándar, definiciones, convenios y signos algebraicos, es aconsejable poner en correlación el modelo con la máquina física, de forma tal, que ciertos signos algebraicos en la ecuación modelo sean fácilmente interpretables.

Las ecuaciones del circuito son necesarias para representar las características eléctricas de la máquina, en general cada bobina en la máquina física será representada por una bobina en el modelo.

Las ecuaciones de Maxwell constituyen las bases para representar matemáticamente el modelo escogido, después de situar las condiciones de fronteras, estas se reducen a la ley de inducción de Faraday que describe el efecto de un campo magnético cambiante, la misma escrita en forma de ecuación es:

$$e_i = -\frac{d\phi}{dt}$$

, donde  $e_i$  - fuerza electromotriz inducida en volts,  $d\phi/dt$  - rapidez de cambio del flujo magnético en webers/segundo.

Para tener en cuenta la rotación se emplea la ley de Newton para el movimiento de un cuerpo sobre un punto.

Para describir el modelo matemático primero es necesario reducir la estructura real dinámica a una ideal basado en varias consideraciones que serán abordadas a continuación.

### Comportamiento dinámico del aerogenerador

Las ecuaciones de las tensiones del aerogenerador asincrónico en la referencia sincrónica d-q pueden escribirse en forma compleja con el eje real d y el eje imaginario q según las ecuaciones

$$\begin{aligned} u_s &= R_s i_s + \Psi_s + j\omega_s \Psi_s \\ u_r &= R_r i_r + \Psi_r + j(\omega_s - \omega_r) \Psi_r \end{aligned} \quad (2.19)$$

La relación entre la corriente  $i$  y el flujo  $\psi$  se da de acuerdo a

$$\begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_m \\ L_m & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Donde:

$$L_m = \frac{X_m}{\omega_s} \quad (2.21)$$

$$L_{ss} = \frac{X_m + X_s}{\omega_s} \quad (2.22)$$

$$L_{rr} = \frac{X_m + X_r}{\omega_s} \quad (2.23)$$

Esta expresión matricial se escribe de manera más conveniente como:

$$\begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} L_{rr} & -L_m \\ -L_m & L_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Donde  $D = L_{ss}L_{rr} - L_m^2$

Insertando la expresión de corriente, el comportamiento del aerogenerador basado en flujos electromagnéticos se obtiene

$$\begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s L_{rr}}{D} - j\omega_s & \frac{R_s L_m}{D} \\ \frac{R_r L_m}{D} & -\frac{R_r L_{ss}}{D} - j(\omega_s - \omega_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_s \\ u_r \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Las potencias eléctricas de estator y rotor se calculan utilizando las corrientes y voltajes del aerogenerador

$$S_s = \frac{3}{2} u_s \bar{i}_s \quad (2.26)$$

$$S_r = \frac{3}{2} u_r \bar{i}_r \quad (2.27)$$

Donde  $\bar{i}$  denota el conjugado complejo de  $i$ . La parte real de la potencia es la activa P y la parte imaginaria la reactiva Q.

El torque electromagnético se da de acuerdo a

$$T = \frac{3}{2} I_m [\bar{\psi}_s i_s] \quad (2.28)$$

El torque se puede expresar totalmente en términos de flujos de manera:

$$T = \frac{3pL_m}{2D} I_m [\psi_s \bar{\psi}_r] \quad (2.29)$$

Donde p es el número de pares de polos.

## 2.4- Procesos Transitorios en el generador de inducción.

### 2.4.1- Desconexión de los aerogeneradores de la red.

La desconexión brusca de los aerogeneradores se puede provocar por varias razones, [13]. Entre ellos se tiene:

- El fenómeno de ‘Islanding’ (ver anexo 8)
- Huecos de tensión (ver anexo 8)

Para el caso de estudio, el parque de Gibara la desconexión de los aerogeneradores será realizada para condiciones de sobre o baja velocidades del viento y para bajo voltajes en el sistema.

### 2.4.2- Análisis matemático para la desconexión de la máquina asincrónica de la red.

Se supone que antes de ser desconectada la máquina funcionaba en el régimen establecido con una velocidad angular del rotor  $\omega$  y una frecuencia de la red  $\omega_1$ , [Ivanov]. Cuando  $t = 0$  tiene lugar la desconexión simultánea de todas las fases del devanado del estator de la red y la corriente del estator del régimen estable precedente  $I_1(t = 0)$  con suma rapidez (durante el tiempo que arde el arco entre los contactos, que desconectan la red del devanado del estator) se reduce a cero. Considerando que en este tiempo el devanado de jaula del rotor es superconductor, y aplicándole al mismo principio de constancia de los flujos embragados, se llega a la conclusión de que el flujo embragado del rotor  $\tilde{\Psi}_{2inic} = L_2 \tilde{I}_{2inic}$ , después de que se desaparece la corriente del estator permanece igual que en el régimen estable precedente para  $t = 0$ , cuando él era igual a  $\tilde{\Psi}_{2(t=0)} = L_2 \tilde{I}_{2(t=0)} + L_{12} \tilde{I}_{1(t=0)}$ , donde  $\tilde{I}_{2(t=0)}$  es la corriente del rotor del régimen precedente.

De la condición  $\tilde{\Psi}_{2inic} = \tilde{\Psi}_{2(t=0)}$  se halla la corriente del rotor después de que ha desaparecido la corriente del estator:

**Condiciones iniciales para el cálculo del proceso transitorio.**

$$I_{2\text{ inic}} = \frac{\tilde{\Psi}_{2(t=0)}}{L_2} = I_{2(t=0)} + k_2 I_{1(t=0)} \quad (2.30)$$

$$k_2 = L_{12}/L_2$$

Corriente del rotor después que haya desaparecido la corriente del estator.

$k_2$ : Coeficiente de acoplamiento del rotor.

El proceso transitorio ulterior se reduce a la extinción de la corriente  $\tilde{I}_2$ , cuyo valor inicial es igual a  $\tilde{I}_{2\text{ inic}}$ . Por cuanto el tiempo en que arde el arco es muy breve, puede considerarse que este proceso se inicia cuando  $t = 0$ . La corriente  $\tilde{I}_2$  se determina a partir de la ecuación para el devanado en jaula del rotor, con el devanado del estator abierto, es decir, para  $\tilde{I}_1 = 0$ ;  $\tilde{U}_2 = 0$ .

La ecuación del rotor se escribe en un sistema de ejes que giran con una velocidad arbitraria  $\omega_0$ :

$$\tilde{U}_2 = \tilde{I}_2 R_2 + \frac{d\tilde{\Psi}_2}{dt} + j(\omega_0 - \omega)\tilde{\Psi}_2 \quad (2.31)$$

$$\tilde{I}_2 R_2 + [p + j(\omega_0 - \omega)]\tilde{\Psi}_2 = 0 \quad (2.32)$$

Donde  $\tilde{\Psi}_2 = L_2 \tilde{I}_2$ .

La solución de esta ecuación diferencial homogénea es  $\tilde{I}_2 = \underline{C}e^{p_0 t}$ . El coeficiente de amortiguamiento  $p_0$  es la raíz de la ecuación característica correspondiente

$$p + j(\omega_0 - \omega) + \frac{1}{T_{20}} = 0 \quad (2.33a)$$

, de donde

$$p = -\frac{1}{T_{20}} - j(\omega_0 - \omega) \quad (2.33b)$$

**Cálculo de la constante de tiempo del devanado del rotor para el devanado abierto del estator,  $T_{20}$ .**

$$T_{20} = L_2 / R_2 \quad (2.34)$$

La constante de integración  $\underline{C}$  se determina para la condición inicial para  $t = 0$ .

$$\tilde{I}_{2\text{inic}} = \underline{C} e^{p_0 t} = \underline{C}. \quad (2.35)$$

Definitivamente, el complejo resultante de la corriente del rotor se expresa de la forma

$$\tilde{I}_2 = \tilde{I}_{2\text{inic}} e^{-t/T_{20} e^{-j(\omega_0 - \omega)t}} \quad (2.36)$$

El sentido físico del mismo será más comprensible se emplea el sistema de ejes  $d, q$ , que giran con una velocidad del rotor  $\omega_0 = \omega$ . En los ejes del rotor del complejo  $\tilde{I}_2 = \tilde{I}_{2\text{inic}} e^{-t/T_{20}}$ , se amortigua con la constante de tiempo  $T_{20}$ , quedando inmóvil con relación al rotor. El complejo resultante  $\tilde{I}_2$  corresponde al sistema de corrientes amortiguadas aperiódicamente en las fases del rotor

$$\begin{aligned} i_{2a} &= i_{2a.\text{inic}} e^{-t/T_{20}} \\ i_{2b} &= i_{2b.\text{inic}} e^{-t/T_{20}} \\ i_c &= i_{2c.\text{inic}} e^{-t/T_{20}} \end{aligned} \quad (2.37)$$

**Corriente en el rotor,  $I_2$**

$$\tilde{I}_2 = \tilde{I}_{2\text{inic}} e^{-\frac{t}{T_{20}}} \quad (2.38)$$

**Valores iniciales de las corrientes del rotor.**

$$\begin{aligned} i_{2a.\text{inic}} &= R_e [\tilde{I}_{2\text{inic}}] \\ i_{2b.\text{inic}} &= R_e \left[ \tilde{I}_{2\text{inic}} e^{-j^{2\pi/3}} \right] \\ i_{2c.\text{inic}} &= R_e \left[ \tilde{I}_{2\text{inic}} e^{j^{2\pi/3}} \right] \end{aligned} \quad (2.39)$$

En los ejes del estator  $\alpha, \beta$ , la velocidad angular es  $\omega_0 = 0$  la función compleja resultante de la corriente del rotor  $\tilde{I}_2 = \tilde{I}_{2\text{inic}} e^{-t/T_{20}} e^{j\omega t}$ , gira con la velocidad del rotor  $\omega$ , por cuanto

precisamente con esta velocidad se traslada con respecto al estator la f.m.m., generada por las corrientes amortiguadas aperiódicamente en las fases del rotor.

#### Valores instantáneos de las corrientes del rotor, en los ejes d, q

$$\begin{aligned} i_{2a} &= i_{2ainic} e^{-t/T_{20}} \\ i_{2b} &= i_{2binic} e^{-t/T_{20}} \\ i_{2c} &= i_{2cinic} e^{-t/T_{20}} \end{aligned} \quad (2.40)$$

#### Para el cálculo de la tensión en el estator durante el proceso de desconexión

De la ecuación de las tensiones del estator en los ejes que giran con una velocidad  $\omega_0$ ,

$\tilde{U}_1 = \tilde{I}_1 R_1 + \frac{d\tilde{\Psi}_1}{dt} + j\omega_0 \tilde{\Psi}_1$ , el campo de las corrientes del rotor, escrito en los ejes  $\alpha, \beta$ , es

decir, cuando  $\omega_0 = 0$ , induce en el devanado abierto del estator la tensión:

$$\tilde{U}_1 = + \frac{d\tilde{\Psi}_1}{dt} = \tilde{U}_{1inic} e^{-t/T_{20}} e^{j\omega t} \quad (2.41)$$

donde

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}_{1inic} &= L_{12} \tilde{I}_{2inic} = L_{12} \tilde{I}_{2inic} e^{-t/T_{20}} e^{j\omega t} \\ \tilde{U}_{1inic} &= \left( j\omega - \frac{1}{T_{20}} \right) \tilde{\Psi}_{1inic} \approx j\omega \tilde{\Psi}_{1inic} \end{aligned} \quad (2.41a)$$

Esta tensión varía con una velocidad angular del rotor igual a  $\omega$ , y su amplitud se amortigua con la constante del tiempo  $T_{20}$ .

#### 2.4.3- Procesos transitorios en el devanado conectado a la red.

##### 1. Escritura de las ecuaciones de la tensión por medio del flujo embragado.

Para la investigación de los procesos de transición en el plano complejo, que gira con una velocidad arbitraria  $\omega_0$ , hay que considerar en forma conjunta las ecuaciones diferenciales para el estator y para el rotor en cortocircuito:

$$\tilde{U}_1 = \tilde{I}_1 R_1 + \frac{d\tilde{\Psi}_1}{dt} + j\omega_0 \tilde{\Psi}_2 \quad (2.42a)$$

$$\tilde{U}_2 = \tilde{I}_2 R_2 + \frac{d\tilde{\Psi}_2}{dt} + j(\omega_0 - \omega) \tilde{\Psi}_2 \quad (2.42b)$$

$$\begin{aligned}\tilde{\Psi}_1 &= L_1 \tilde{I}_1 + L_{12} \tilde{I}_2 \\ \tilde{\Psi}_2 &= L_2 \tilde{I}_2 + L_{12} \tilde{I}_1\end{aligned}\quad (2.42c)$$

Considerando que la tensión del estator está dada y expresando el flujo embragado por medio de la corriente con ayuda de las ecuaciones:

$$\begin{aligned}\tilde{I}_1 &= \tilde{I}_{1(\alpha, \beta)} e^{-j\alpha_0} \\ \tilde{I}_2 &= \tilde{I}_{2(d, q)} e^{-j(\alpha_0 - \alpha)}\end{aligned}\quad (2.42d)$$

Donde  $\tilde{I}_1 = \tilde{I}_{1(\alpha, \beta)}$  es la función compleja de la corriente del estator en el propio plano complejo  $\alpha, \beta$ .  $\tilde{I}_2 = \tilde{I}_{2(d, q)}$ , la función compleja de la corriente del rotor en el propio plano complejo  $d, q$ . Se obtiene un sistema de ecuaciones para determinar las corrientes desconocidas:

$$\begin{aligned}[R_1 + (p + j\omega_0)L_1]\tilde{I}_1 + (p + j\omega_0)L_{12}\tilde{I}_2 &= \tilde{U}_1; \\ [p + j(\omega_0 - \omega)L_{12}\tilde{I}_1] + [R_2 + (p + j\omega_0)L_2]\tilde{I}_2 &= 0.\end{aligned}\quad (2.43).$$

Sin embargo, resulta preferible el sistema de ecuaciones compuesto para las incógnitas de los flujos embragados. A fin de obtenerlo, se expresa las corrientes mediante los flujos embragados con ayuda del sistema (2.42d):

$$\begin{aligned}\tilde{I}_1 &= (\tilde{\Psi}_1 - k_2 \tilde{\Psi}_2) / L'_1; \\ \tilde{I}_2 &= (\tilde{\Psi}_2 - k_1 \tilde{\Psi}_1) / L'_2.\end{aligned}\quad (2.44).$$

En donde:

$L'_1 = L_1 - L_{12}^2 L_2^{-1} = L_{1\sigma} + (L_{2\sigma}^{-1} + L_{12}^{-1})^{-1} = \sigma L_1$ , es la inducción transitoria del devanado del estator.

$L'_2 = L_2 - L_{12}^2 L_1^{-1} = L_{2\sigma} + (L_{1\sigma}^{-1} + L_{12}^{-1})^{-1} = \sigma L_2$ , es la inducción transitoria del devanado del rotor.

$k_1 = L_{12} L_1^{-1} = 1 - \sigma_1$ , es el coeficiente de acoplamiento del estator;

$k_2 = L_{12} L_2^{-1} = 1 - \sigma_2$ , es el coeficiente de acoplamiento del rotor;

$k = k_1 k_2 = L_{12}^2 (L_1 L_2)^{-1} = 1 - \sigma$ , es el coeficiente de acoplamiento resultante;

$\sigma_1 = L_{1\sigma} L_1^{-1} = 1 - k_1$ , es el coeficiente de dispersión del estator;

$\sigma_2 = L_{2\sigma} L_2^{-1} = 1 - k_2$ , es el coeficiente de dispersión del rotor;

$\sigma = 1 - L_{12}^2 (L_1 L_2)^{-1} = 1 - k$ , es el coeficiente de dispersión resultante.

Introduciendo las ecuaciones (2.44) en la (2.42a) y la (2.42b), se obtiene un sistema de ecuaciones diferenciales para los flujos embragados del estator y del rotor:

$$\begin{aligned} [R_1(L'_1)^{-1} + p + j\omega_0] \tilde{\psi}_1 - k_2 R_1(L'_1)^{-1} \tilde{\psi}_2 &= \tilde{U}_1; \\ -k_1 R_2(L'_2)^{-1} \tilde{\psi}_1 + [R_2(L'_2)^{-1} + p + j(\omega_0 - \omega)] \tilde{\psi}_2 &= 0. \end{aligned} \quad (2.45)$$

El momento electromagnético también se puede expresar directamente a través del flujo embragado, sin determinar las corrientes.

$$\begin{aligned} M &= \frac{3p_\tau}{2} I_m \tilde{\psi}_2 \tilde{I}_2^* = -\frac{3p_\tau k_1}{2L'_2} I_m \tilde{\psi}_2 \tilde{\psi}_1^* = \\ &= \frac{3p_\tau k}{\sigma L_{12}} \frac{(\tilde{\psi}_2^* \tilde{\psi}_1 - \tilde{\psi}_2 \tilde{\psi}_1^*)}{4j} \end{aligned} \quad (2.46)$$

En los ejes fijos  $\alpha, \beta$  (cuando  $\omega_0 = 0$ ) las ecuaciones (2.45) toman la forma:

$$\begin{aligned} (p + s_{k1}\omega_1) \tilde{\psi}_1 - k_2 s_{k1}\omega_1 \tilde{\psi}_2 &= \tilde{U}_1; \\ -k_1 s_{k2}\omega_1 \tilde{\psi}_1 + (p + s_{k2}\omega_1 - j\omega) \tilde{\psi}_2 &= 0 \end{aligned} \quad (2.47)$$

Donde

$$s_{k1}\omega_1 R_1(L'_1)^{-1} = \frac{1}{T'_1}, \quad s_{k2}\omega_1 R_2(L'_2)^{-1} = \frac{1}{T'_2};$$

$T'_1$ , es la constante de tiempo del devanado del estator y  $\omega = \omega_1$ ;

$T'_2$ , es la constante de tiempo del devanado del rotor y  $\omega = \omega_1$ ;

$s_{k1} = R_1 / (\omega_1 L'_1)$ , es el deslizamiento crítico, que corresponde al momento máximo, durante la alimentación por parte del rotor y con estator en cortocircuito;

$s_{k2} = R_2 / (\omega_1 L'_2)$ , es el deslizamiento crítico, que corresponde al momento máximo, durante la alimentación por parte del estator y rotor en cortocircuito;

## 2. Componentes de las corrientes y de los flujos embragados.

Al surgir instantáneamente la tensión  $\tilde{U}_1$  ( $\tilde{U}_1 = 0$  cuando  $t < 0$  y  $\tilde{U}_1 = \dot{U}_{1m} e^{j\omega_1 t}$ , cuando  $t \geq 0$ ) y con una velocidad angular constante  $\omega$  del rotor, la solución del sistema de ecuaciones diferenciales (2.47), se expresa para cada uno de los flujos embragados incógnitas en forma de la suma de dos componentes: del valor estable ( $\tilde{\psi}_{1est}$  o  $\tilde{\psi}_{2est}$ ) y de la componente libre ( $\tilde{\psi}_{1lib}$  o  $\tilde{\psi}_{2lib}$ )

$$\tilde{\psi}_1 = \tilde{\psi}_{1est} + \tilde{\psi}_{1lib}; \quad \tilde{\psi}_2 = \tilde{\psi}_{2est} + \tilde{\psi}_{2lib} \quad (2.48)$$

Y de igual modo, como resultado de la resolución del sistema (2.47) con ayuda del (2.47) pueden ser escritas las corrientes del estator y del rotor:

$$\tilde{I}_1 = \tilde{I}_{1est} + \tilde{I}_{1lib}; \quad \tilde{I}_2 = \tilde{I}_{2est} + \tilde{I}_{2lib}. \quad (2.49)$$

Con esto, los valores estables de los flujos embragados o de las corrientes, se hallan resolviendo los sistemas (2.43) ó (2.45) cuando  $t = \infty$ . Las componentes libres corresponden a las soluciones de los sistemas (2.43) ó (2.45) cuando  $\tilde{U}_1 = 0$ . Estas soluciones se presentan en forma de la suma de dos funciones exponenciales. Por ejemplo la suma de las componentes libres de los flujos embragados son iguales a:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_{1lib} &= \tilde{\psi}_{1aper} e^{p_{aper} t} + \tilde{\psi}_{1per} e^{p_{per} t}, \\ \tilde{\psi}_{2lib} &= \tilde{\psi}_{2aper} e^{p_{aper} t} + \tilde{\psi}_{2per} e^{p_{per} t}, \end{aligned} \quad (2.50)$$

Donde  $\tilde{\psi}_{1aper}, \tilde{\psi}_{2aper}$ , son los valores iniciales de los flujos embragados libres, que corresponden a la raíz de la ecuación característica  $p = p_{aper}$ .

$\tilde{\psi}_{1per}, \tilde{\psi}_{2per}$ , son los valores iniciales de los flujos embragados libres, que corresponden a la raíz de la ecuación característica  $p = p_{per}$ .

Donde  $p_{aper}$  y  $p_{per}$  son los coeficientes de amortiguamientos aperiódicos y periódicos.

### 3. Ecuación característica y determinación de sus raíces.

La ecuación característica, cuyas raíces son los coeficientes de amortiguamiento  $p_{aper}$  y  $p_{per}$ , se obtiene del sistema de ecuaciones homogéneas, correspondientes a (9):

$$\begin{aligned} (p + s_{k1}\omega_1)\tilde{\psi}_1 - k_2 s_{k1}\omega_1\tilde{\psi}_2 &= 0, \\ -k_1 s_{k2}\omega_1\tilde{\psi}_1 + (p + s_{k2}\omega_1 - j\omega)\tilde{\psi}_2 &= 0. \end{aligned} \quad (2.51)$$

Eliminando en este sistema los flujos embragados  $\tilde{\psi}_1$  y  $\tilde{\psi}_2$ , se escribe la ecuación característica

$$\begin{aligned} p^2 + p(s_{k1} + s_{k2} - j\frac{\omega}{\omega_1})\omega_1 + (\sigma s_{k1}s_{k2} - js_{k1}\frac{\omega}{\omega_1})\omega_1^2 &= 0, \text{ y se halla sus raíces} \\ p = -0.5(s_{k1} + s_{k2})\omega_1 + 0.5j\omega \pm 0.5\omega_1\sqrt{(s_{k1} - s_{k2} - j\omega\omega_1^{-1})^2 + 4(1 - \sigma)s_{k1}s_{k2}}. \end{aligned} \quad (2.52)$$

Se considera que con el signo (-) delante de la raíz,  $p = p_{aper}$ , cuando se tiene el signo (+),  $p = p_{per}$ .

En el caso general el coeficiente de amortiguamiento es un número complejo  $p = p_\alpha + jp_\beta$ .

Por cuanto la componente libre se expresa en la forma

$$Ce^{pt} = Ce^{p_\alpha t} e^{jp_\beta t}, \text{ la parte real esta determinada por la constante de tiempo:}$$

$T = -p_\alpha^{-1}$ , el coeficiente  $p_\beta$  de la parte imaginaria de  $p$  es igual a la velocidad angular de la componente libre con respecto al plano complejo  $\alpha, \beta$ .

En algunos casos particulares importantes la expresión de  $p$  en (2.52) se simplifica sensiblemente. Estos casos son:

a). *El rotor esta fijo.*

En este caso  $\omega = 0$  y ambos valores de  $p$  resultan ser números reales ( $p_\beta = 0$ )

$$p = p_\alpha = -0.5(s_{k1} + s_{k2})\omega_1 [1 \mp \sqrt{1 - 4\sigma s_{k1}s_{k2}(s_{k1} + s_{k2})^{-2}}]$$

Teniendo en cuenta el valor pequeño del segundo término bajo el signo radical, en comparación con la unidad, es posible escribir  $p$  de un modo más sencillo, sin cometer un error importante

$$p = p_\alpha = -0.5(s_{k1} + s_{k2})\omega_1 \{1 \mp [1 - 2\sigma s_{k1}s_{k2}(s_{k1} + s_{k2})^{-2}]\}$$

Tomando en esta expresión el signo (+) delante de los corchetes, se obtiene el valor de  $p$  que corresponde a la componente aperiódica con amortiguamiento rápido:

$p_{aper} = -(s_{k1} + s_{k2})\omega_1 + \sigma\omega_1 s_{k1}s_{k2}(s_{k1} + s_{k2})^{-1}$ . Si se desprecia el segundo termino de esta expresión, se halla el coeficiente de amortiguamiento del proceso rápido

$$\begin{aligned} p_{aper} &= -T_{aper}^{-1} = -(s_{k1} + s_{k2})\omega_1 \\ &= -(T_1' + T_2')(T_1 T_2')^{-1} \end{aligned} \quad (2.53a)$$

Tomando en la expresión para  $p$  el signo (-) delante de los corchetes, se obtiene el valor de  $p$  que corresponde a la componente de amortiguamiento lento,

$$\begin{aligned} p_{per} &= -T_{per}^{-1} = \frac{s_{k1}s_{k2}\omega_1^2\sigma^2}{(s_{k1} + s_{k2})\sigma\omega_1} \\ &= -(T_{10} + T_{20})^{-1} \end{aligned} \quad (2.53b)$$

Donde

$$T_{10} = \frac{1}{\sigma \omega_1 s_{k1}} = \frac{L_1}{R_1} = T_1' \sigma^{-1}; \quad T_{20} = \frac{1}{\sigma \omega_1 s_{k2}} = \frac{L_2}{R_2} = T_2' \sigma^{-1}; \quad (2.53c)$$

Son las constantes de tiempo de los devanados del estator y del rotor con otro devanado abierto.

b). *El rotor que gira con una velocidad arbitraria  $\omega$ .*

En este caso, para simplificar los cálculos, es cómodo introducir, en lugar de  $s_{k1}$  y  $s_{k2}$  su valor medio, haciendo  $s_{k1} = s_{k2} = s_k$ , donde  $s_k = 0.5(s_{k1} + s_{k2})$ . Entonces, aproximadamente

$$p = p_\alpha + jp_\beta \approx -s_k \omega_1 + 0.5j\omega \pm 0.5\omega_1 \sqrt{-\omega^2 \omega_1^{-2} + 4(1-\sigma)s_k^2}. \quad (2.54)$$

Para el movimiento giratorio lento del rotor, cuando  $\omega < 2\omega_1 s_k \sqrt{1-\sigma}$ , la raíz cuadrada en la expresión de  $p$  resulta ser un número real y, en consecuencia, los coeficientes de la parte imaginaria de los valores posibles de  $p$  coinciden:

$$p_{aper.\beta} = p_{per.\beta} = 0.5\omega. \quad (2.55)$$

Esto significa que ambas componentes del proceso libre giran con igual velocidad angular, igual que a la mitad de la velocidad del rotor. Al contrario, las partes reales de  $p$  en esta gama de velocidades del rotor, resultan distintos:

$$p_{aper.\alpha} = -s_k \omega_1 - 0.5\omega_1 \sqrt{4(1-\sigma)s_k^2 - \omega^2 \omega_1^{-2}} = T_{aper}^{-1}; \quad (2.56a)$$

$$p_{per.\alpha} = -s_k \omega_1 + 0.5\omega_1 \sqrt{4(1-\sigma)s_k^2 - \omega^2 \omega_1^{-2}} = -T_{per}^{-1}. \quad (2.56b)$$

La componente con el subíndice (*aper*) se amortigua con más rapidez que con la componente con el subíndice (*per*). Por cuanto

$(p_\alpha + s_k \omega_1)^2 + p_\beta^2 = (1-\sigma)s_k^2 \omega_1^2 = const.$ , el lugar geométrico del número complejo  $p$  es una circunferencia con el centro en el punto  $(-s_k \omega_1)$ , cuyo radio es igual a  $s_k \omega_1 \sqrt{1-\sigma}$ .

Para el movimiento giratorio rápido del rotor, cuando  $\omega > 2s_k \omega_1 \sqrt{1-\sigma}$ , la raíz cuadrada en la expresión para  $p$  es un número imaginario y, por lo tanto, las partes reales de ambas raíces de la ecuación característica coinciden:

$$p_{aper.\alpha} = p_{per.\alpha} = -s_k \omega_1 \quad (2.56c)$$

Esto significa que ambas componentes del proceso libre se amortiguan con una misma constante de tiempo promediada

$$T_{aper} = T_{per} = \frac{1}{s_k \omega_1} = 0.5(T'_1 + T'_2) \quad (2.57)$$

Los coeficientes de la parte imaginaria de  $p$  en esta gama de velocidades del rotor, por contrario, resultan distintos:

$$p_{aper.\beta} = 0.5\omega - 0.5\omega_1 \sqrt{\omega^2 \omega_1^{-1} - 4(1-\sigma)s_k^2}; \quad (2.58a)$$

$$p_{per.\beta} = 0.5\omega + 0.5\omega_1 \sqrt{\omega^2 \omega_1^{-1} - 4(1-\sigma)s_k^2}. \quad (2.58b)$$

De este modo, los complejos resultantes de las componentes del proceso libre, giran con diferentes velocidades angulares  $p_{\beta}$ , y  $p_{per.\beta} \neq p_{aper\beta}$ .

(Magnitudes en valores relativos, divididos por  $\omega_1$  para la construcción del lugar geométrico del complejo  $p$ ).

c). El rotor gira a una velocidad próxima a la sincrónica ( $\omega \approx \omega_1$ ), caso a tratar.

En este caso se puede calcular con exactitud la diferencia entre  $s_{k1}$  y  $s_{k2}$ . Recurriendo a la ecuación (2.52) para  $p$  y escribiendo la raíz cuadrada de la misma en la forma  $\sqrt{1-x}$ , donde  $x \ll 1$ , transformando la expresión debajo de la radical  $\sqrt{(s_{k2} - s_{k1})^2 - 2j(s_{k2} - s_{k1})\omega/\omega_1 - \omega^2/\omega_1^2 + 4(1-\sigma)s_{k1}s_{k2}}$ , utilizando la expresión aproximada  $(s_{k2} - s_{k1})^2 + 4(1-\sigma)s_{k1}s_{k2} = (s_{k2} + s_{k1})^2(1-\sigma)$ , cuyo empleo da un error muy pequeño, sacando fuera de los paréntesis  $-\omega^2/\omega_1^2$  queda

$$j \frac{\omega}{\omega_1} \sqrt{1 - (s_{k2} + s_{k1})^2(1-\sigma)\omega_1^2/\omega^2 + 2j(s_{k2} - s_{k1})\omega/\omega_1}. \text{ Teniendo en cuenta que cuando } \omega/\omega_1 \approx 1$$

los términos bajo el radical son pequeños en comparación con el primero, se utiliza la relación aproximada de  $\sqrt{1-x} \approx 1 - x/2$ . Después de estas transformaciones, representando la raíz cuadrada aproximadamente en la forma,

$$j \frac{\omega}{\omega_1} [1 - (s_{k2} + s_{k1})^2(1-\sigma)\omega_1^2/(2\omega^2) + j(s_{k2} - s_{k1})\omega/\omega_1], \text{ se puede obtener de (2.52) las raíces de}$$

la ecuación característica:

$$p_{aper} = p_{aper.\alpha} + jp_{aper.\beta} = -s_{k1}\omega_1 + j\omega(1-\sigma)(s_{k2} + s_{k1})^2\omega_1^2/(4\omega^2) \quad (2.59a)$$

Cuando se tiene el signo (-) delante de la raíz cuadrada:

$$p_{per} = p_{per.\alpha} + jp_{per.\beta} = -s_{k2}\omega_1 + j\omega - j\omega(1-\sigma)(s_{k2} + s_{k1})^2\omega_1^2/(4\omega^2) \quad (2.59b)$$

Cuando se tiene el signo (+) delante de la raíz cuadrada:

De la ecuación (2.63a) se aprecia que el complejo de la componente del proceso transitorio con el subíndice (*aper*) se amortigua con la constante de tiempo del devanado del estator.

$$T'_1 = -p_{aper.\alpha}^{-1} = 1/(s_{k1}\omega_1) = L'_1 / R_1 \quad (2.60a)$$

Este gira con una velocidad angular  $p_{aper.\beta}$  en el sentido de rotación del rotor. De esto se deduce que la componente con el subíndice (*aper*) corresponde al sistema libre (aperiódico) de las corrientes (de los flujos embragados) en el devanado del estator.

El rotor, en comparación con el campo de las corrientes libres del estator gira a una velocidad:

$\omega - p_{aper.\beta} = \omega[1 - (1 - \sigma)(s_{k1} + s_{k2})^2 \omega_1^2 / (4\omega^2)]$ , que se diferencia muy poco de la velocidad  $\omega$ . en el devanado del rotor se induce un sistema periódico de corrientes (de flujos embragados), que varían con una frecuencia angular  $\omega - p_{aper.\beta}$ .

De la ecuación (2.59b) se aprecia que el valor complejo de la componente del proceso transitorio con el subíndice (*per.*) se amortigua con una constante de tiempo:

$$T'_2 = -p_{per.\alpha}^{-1} = 1/(s_{k2}\omega_1) = L'_2 / R_2 \quad (2.60b)$$

, es decir, con la constante de tiempo del rotor y gira con una velocidad angular  $p_{aper.\beta}$ , un poco menor que la velocidad del rotor  $\omega$ , de donde sigue que la componente con el subíndice (*aper.*) corresponde al sistema de de corrientes libres (aperiódicas) en el rotor. Además, el sistema de corrientes libres del rotor es casi inmóvil con respecto al rotor, girando conjuntamente con éste a una velocidad  $p_{per.\beta}$  e induciendo en el devanado del estator un sistema periódico de corrientes que varían con la frecuencia:

$$p_{per.\beta} = \omega[1 - (1 - \sigma)(s_{k2} + s_{k1})^2 \omega_1^2 / (4\omega^2)] \quad (2.61)$$

Vinculando la denominación de las componentes con el carácter de la variación de las mismas en el devanado del estator, se les da nombre de componentes periódicas (subíndice (*per.*)) tanto a las corrientes transitorias (flujos embragados) que cambian periódicamente en el devanado del estator, como al sistema de corrientes libres (de flujos embragados) que se halla mutuamente vinculado con ellas en el devanado del rotor.

Del mismo modo, la denominación de componentes aperiódicas (subíndice (*aper*)) se le otorga tanto al sistema de corrientes (flujos embragados) libres (aperiódicas), en el devanado

del estator, como al sistema de de corrientes (flujos embragados) que varían periódicamente, que se inducen en el devanado del rotor con una velocidad  $\omega - p_{aper.\beta}$  con respecto al campo del sistema de corrientes libres del estator.

#### **2.4.4- Conexión de la máquina asincrónica a la red.**

La conexión tiene lugar con una velocidad angular arbitraria del rotor  $\omega$ . Cuando  $t=0$  el devanado del estator se halla unido a la red con una tensión  $\underline{U}_1$ . En los ejes del estator  $\alpha, \beta$  para  $t < 0$  la tensión  $\tilde{U}_1 = 0$ , cuando  $t \geq 0$ , la tensión  $\tilde{U}_1 = \dot{U}_{1m} e^{j\varphi_1 t}$

$$(2.62)$$

Donde  $\dot{U}_{1m} = \dot{U}_{1m} e^{j\omega_0}$ .

Se supone que la velocidad angular durante el proceso de transición no varia quedando igual a  $\omega$ . Se consideran dadas las corrientes iniciales y los flujos embragados de los devanados  $(\tilde{I}_{1inic}, \tilde{I}_{2inic}, \tilde{\psi}_{1inic}, \tilde{\psi}_{2inic})$ , que se tienen cuando  $t=0$ , en el caso general, si la conexión tiene lugar en el momento cuando las corrientes, después de haberse desconectado el régimen precedente, aun no ha extinguido, la corriente y el flujo embragado iniciales del rotor, así como el flujo embragado del estator, pueden ser distintos de cero, la corriente inicial en el devanado del estator siempre es igual a cero.

Los flujos embragados del estator y del rotor en el proceso transitorio se determinan a partir del sistema de ecuaciones diferenciales (2.49), escritas en los ejes del estator, y se expresan en forma de la suma del valor estable de la magnitud y de la componente libre (escritas en las ecuaciones (2.47) y (2.48)).

Aquí los coeficientes de amortiguamiento  $p_{aper}$  y  $p_{per}$  se calculan en el caso general por medio de (2.52). Las partes reales y imaginarias de  $p_{aper}$  y  $p_{per}$  dependen esencialmente de la velocidad angular del rotor  $\omega$ . las mismas se pueden calcular para los casos particulares dados, rotor inmóvil ( $\omega=0$ ) y cuando la velocidad angular del rotor es cercana a la sincrónica.

Los valores establecidos para los flujos embragados se determinan para  $t = \infty$ . A partir de la ecuación (2.52).

Teniendo en cuenta que los flujos embragados estables varían armónicamente, se puede expresar sus funciones complejas resultantes en los ejes del estator

$$\tilde{\psi}_1 = \dot{\psi}_{1m} e^{j\omega_1 t}; \quad \tilde{\psi}_2 = \dot{\psi}_{2m} e^{j\omega_2 t}. \quad (2.63)$$

Entonces, se observa que

$$p\tilde{\psi}_1 = j\omega_1\tilde{\psi}_1, \quad p\tilde{\psi}_2 = j\omega_2\tilde{\psi}_2 \quad (2.64)$$

Se obtiene de (13) las siguientes ecuaciones de las tensiones para el régimen estable en los ejes del estator:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= (j + sk_1)\tilde{\psi}_1 - k_2 s_{k1} \omega_1 \tilde{\psi}_2 = \tilde{U}_1; \\ -k_1 s_{k2} \omega_1 \tilde{\psi}_1 + \omega_1 (sj + s_{k2}) \tilde{\psi}_2 &= 0. \end{aligned} \quad (2.65)$$

Donde  $s = (\omega_1 - \omega) / \omega_1$ , es el deslizamiento.

Resolviendo las ecuaciones del sistema (2.65) conjuntamente, se obtiene:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_{1est} = \tilde{\psi}_1 &= \frac{\tilde{U}_1 (s_{k2} + js)}{j\omega_1 [(s_{k2} + s s_{k1}) + j(s - \sigma s_{k1} s_{k2})]} \\ \tilde{\psi}_{2est} = \tilde{\psi}_2 &= \frac{\tilde{U}_1 k_1 s_{k2}}{j\omega_1 [(s_{k2} + s s_{k1}) + j(s - \sigma s_{k1} s_{k2})]} \end{aligned} \quad (2.66)$$

Aproximadamente, para  $R_1=0$  y  $s_{k1}=0$

$$\tilde{\psi}_1 = \frac{\tilde{U}_1}{j\omega_1}; \quad \tilde{\psi}_2 = \frac{\tilde{U}_1 k_1 s_{k2}}{j\omega_1 (s_{k2} + js)}. \quad (2.67)$$

Con ayuda de la ecuación (2.47), se halla las corrientes estables:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{1est} = \tilde{I}_1 &= \frac{\tilde{U}_1 (\sigma s_{k2} + js)}{j\omega_1 L'_1 [(s_{k2} + s s_{k1}) + j(s - \sigma s_{k1} s_{k2})]} \\ \tilde{I}_{2est} = \tilde{I}_2 &= \frac{\tilde{U}_1 (-k_1 js)}{j\omega_1 L'_2 [(s_{k2} + s s_{k1}) + j(s - \sigma s_{k1} s_{k2})]} \end{aligned} \quad (2.68)$$

Para determinar los cuatro coeficientes complejos incógnitos en las expresiones para las componentes libres de los flujos embragados o de las corrientes, se utiliza las condiciones iniciales dadas para  $t = 0$ , por ejemplo

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_{1,t=0} = \tilde{\psi}_{1inic} &= \tilde{\psi}_{1est} + \tilde{\psi}_{1aper} + \tilde{\psi}_{1per}; \\ \tilde{\psi}_{2,t=0} = \tilde{\psi}_{2inic} &= \tilde{\psi}_{2est} + \tilde{\psi}_{2aper} + \tilde{\psi}_{2per}, \end{aligned} \quad (2.69)$$

Se obtuvo dos de las cuatro ecuaciones necesarias. Las otras dos se obtienen teniendo en consideración que las ecuaciones diferenciales homogéneas (2.51) deben ser satisfechas tanto por las componentes aperiódicas de los flujos embragados, como por las periódicas.

Introduciendo en las componentes aperiódicas y periódicas en estas ecuaciones y simplificando, se obtiene:

$$\begin{aligned}\tilde{\psi}_{2aper} &= \tilde{\psi}_{1aper} ((p_{aper} + s_{k1}\omega_1) / k_2 s_{k1}\omega_1) = k_{21aper} \tilde{\psi}_{1aper}; \\ \tilde{\psi}_{1per} &= \tilde{\psi}_{2per} ((p_{per} + s_{k2}\omega_1 - j\omega) / k_1 s_{k1}\omega_1) = k_{12per} \tilde{\psi}_{2per}\end{aligned}\quad (2.70a)$$

Donde

$$\begin{aligned}k_{21aper} &= (p_{aper} + s_{k1}\omega_1) / (k_2 s_{k1}\omega_1); \\ k_{12per} &= (p_{per} + s_{k2}\omega_1 - j\omega) / (k_1 s_{k2}\omega_1).\end{aligned}\quad (2.70b)$$

Para una velocidad angular del rotor cercana a la sincrónica ( $\omega \approx \omega_1$ )

$$\begin{aligned}k_{21aper} &\approx j k_1 s_{k2} \omega_1 / \omega; \\ k_{12per} &\approx -j k_2 s_{k2} \omega_1 / \omega;\end{aligned}\quad (2.70c)$$

Considerando las ecuaciones (2.70a) y (2.70c) conjuntamente se halla los coeficientes:

$$\begin{aligned}\tilde{\psi}_{2per} &= [k_{21aper} (\tilde{\psi}_{1inic} - \tilde{\psi}_{1est}) - \tilde{\psi}_{2inic} - \tilde{\psi}_{2est}] / (k_{12per} k_{21aper} - 1); \\ \tilde{\psi}_{1per} &= [k_{12per} (\tilde{\psi}_{2inic} - \tilde{\psi}_{2est}) - \tilde{\psi}_{1inic} - \tilde{\psi}_{1est}] / (k_{12per} k_{21aper} - 1).\end{aligned}\quad (2.71a)$$

Si antes de la conexión no había corrientes en los devanados, se obtiene:

$$\begin{aligned}\tilde{\psi}_{2per} &= (\tilde{\psi}_{2est} - k_{21aper} \tilde{\psi}_{1est}) / (k_{12per} k_{21} - 1), \\ \tilde{\psi}_{1aper} &= (\tilde{\psi}_{1est} - k_{12per} \tilde{\psi}_{2est}) / (k_{12per} k_{21} - 1).\end{aligned}\quad (2.71b)$$

Los coeficientes de las componentes libres de las corrientes  $\tilde{I}_{1aper}$ ,  $\tilde{I}_{1per}$ ,  $\tilde{I}_{2aper}$ ,  $\tilde{I}_{2per}$  por medio de las corrientes iniciales y estables dadas:

$$\begin{aligned}\tilde{I}_{1aper} &= \frac{(1 - k_2 k_{21aper})}{\sigma(k_{12per} k_{21aper} - 1)} [(1 - k_1 k_{12per}) * (\tilde{I}_{est} - \tilde{I}_{1inic}) + \frac{k_1}{k_2} (k_2 - k_{12per}) * (\tilde{I}_{2est} - \tilde{I}_{2inic})]; \\ \tilde{I}_{1per} &= \frac{(k_{12per} - k_2)}{\sigma(k_{12per} k_{21aper} - 1)} [(k_1 - k_{21aper}) * (\tilde{I}_{1est} - \tilde{I}_{1inic}) + \frac{k_1}{k_2} (1 - k_2 k_{21aper}) * (\tilde{I}_{2est} - \tilde{I}_{2inic})],\end{aligned}\quad (2.72)$$

$$\begin{aligned}\tilde{I}_{2aper} &= \tilde{I}_{1aper} \frac{k_2 (k_{21aper} - k_1)}{k_1 (1 - k_2 k_{21aper})}; \\ \tilde{I}_{2per} &= \tilde{I}_{1per} \frac{k_2 (1 - k_1 k_{12per})}{k_1 (k_{12per} - k_2)}.\end{aligned}\quad (2.73)$$

### **2.4.5. -Proceso transitorio durante el cortocircuito simétrico del devanado del estator en una máquina asincrónica**

Se analiza un cortocircuito que tiene lugar a partir del régimen estacionario inicial sin la interrupción previa del circuito del devanado del estator. El proceso transitorio durante este cortocircuito puede considerarse como la conexión de una máquina asincrónica, por cuyos devanados pasan las corrientes iniciales  $I_{1\text{inic}}$  e  $I_{2\text{inic}}$ , en la tensión  $U_1=0$ .

Este enfoque permite emplear la descripción matemática del proceso de conexión para el análisis del proceso del cortocircuito. Si son dados los parámetros de la máquina, la tensión  $U_{10}$  y el deslizamiento  $s$  en el régimen estable inicial, entonces, las corrientes permanentes en este régimen  $I_{1\text{est0}}$  e  $I_{2\text{est0}}$ , son al mismo tiempo las corrientes iniciales para el proceso de cortocircuito y pueden ser halladas por el sistema de ecuaciones (2.68). [Ivanov].

Para analizar el comportamiento de la máquina de inducción frente a un cortocircuito, se utilizó los criterios estipulados en [Fitzgerald], al hacer esto se simplifica significativamente los cálculos.

#### **Corriente inicial para una falla trifásica.**

La maquina asincrónica, tanto en régimen generador que motor, aportará corriente hacia una falla trifásica cuando éste aparece en sus terminales. Esta corriente con el tiempo caerá a cero. Para determinar su magnitud inicial, se despreciará la resistencia del estator y los términos de flujo en los voltajes del estator. También se considerara que la maquina esta trabajando con un deslizamiento pequeño, ya que en la practica las maquinas trabajan con deslizamientos pequeños.

Las relaciones de voltaje y corriente se hacen:

Estator:

$$v_{1d} = -\omega \lambda_{1q} \quad (2.74a)$$

$$v_{1q} = \omega \lambda_{1d} \quad (2.74b)$$

Rotor:

$$v_{2d} = r_2 i_{2d} + p \lambda_{2d} = 0 \quad (2.75a)$$

$$v_{2q} = r_2 i_{2q} + p \lambda_{2q} = 0 \quad (2.75b)$$

Las corrientes del rotor se eliminarán de las relaciones de flujo del estator.

$$i_{2d} = \frac{\lambda_{2d} - L_{12}i_{1d}}{L_{22}} \quad (2.76)$$

$$\lambda_{1d} = L' i_{1d} + \frac{L_{12}}{L_{22}} \lambda_{2d} \quad (2.77a)$$

$$\lambda_{1q} = L' i_{1q} + \frac{L_{12}}{L_{22}} \lambda_{2q} \quad (2.77b)$$

Donde  $L' = L_{11} - \frac{L_{12}^2}{L_{22}}$  representa la inductancia transitorio de la maquina.

Cuando aparezca la falla, los voltajes  $v_{1d}$  y  $v_{1q}$  tienden a cero, y también los flujos del estator  $\lambda_{1d}$  y  $\lambda_{1q}$ . Bajo estas circunstancias, mantener constante a los flujos del rotor  $\lambda_{2d0}$  y  $\lambda_{2q0}$  en sus valores iniciales antes de la falla requiere que los componentes de corrientes del estator se hacen:

$$i_{1d} = -\frac{(L_{12}/L_{22})\lambda_{2d0}}{L'} \quad (2.78a)$$

$$i_{1q} = -\frac{(L_{12}/L_{22})\lambda_{2q0}}{L'} \quad (2.78b)$$

Estos son los valores iniciales inmediatamente después de la aparición de la falla (o sea en  $t = 0^+$ ). También son los valores que seguirían existiendo si no hubiese resistencia para provocar su decaída.

Entonces el valor inicial simétrica de corto-circuito es:

$$I_1 = \frac{1}{x'} \omega \frac{L_{12}}{L_{22}} \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\lambda_{2d0}^2 + \lambda_{2q0}^2} \quad (2.79)$$

#### Decrecimiento de la corriente de cortocircuito.

La corriente de falla cuya magnitud inicial se da por la ecuación (2.79) caerá a cero por la presencia de la resistencia del rotor. Esta caída se puede encontrar por examinar la caída de las corrientes del rotor.

Se llegará a la expresión

$$T_0' = \frac{L_{22}}{r_2} \quad (2.80a)$$

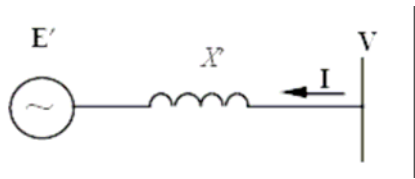
El cual es el constante de tiempo de la maquina de inducción con el estator en circuito abierto, pero cuando el estator esta en corto-circuito, La inductancia aparente es mas bajo por el acoplamiento del devanado del estator. Este constante de tiempo es entonces dada por:

$$T' = T_0 \frac{L'}{L_{11}} = T_0 \frac{x'}{x_{11}} \quad (2.80b)$$

Y es el constante de tiempo para cortocircuito.

### Circuito equivalente transitorio de la máquina asincrónica

Para completar la investigación hay que calcular los flujos  $\lambda_{2d0}$  y  $\lambda_{2q0}$  utilizados anteriormente en las condiciones pre-falla de la máquina. Haciendo uso del circuito equivalente transitorio en la figura 2.7.



**Figura 2.7. Equivalente Thévenin del generador asíncrono.**  
[González]

El generador se representa como una fuente de tensión  $E'$  detrás de una impedancia transitoria  $jX'$ .

$$E' = V - jI * X' \quad (2.81)$$

Se ha despreciado la resistencia, ya que queda muy pequeña en comparación a la reactancia.

Considerando que antes del cortocircuito cada fase del estator de la maquina lleva la corriente efectiva  $I_{10}$ . Dominando las componentes  $d, q$  como  $i_{1d0}$  y  $i_{1q0}$ , y dominando a  $I_{1d0}$  y  $I_{1q0}$  a estas componentes dividida por  $\sqrt{2}$ . Pues de la ecuación (2.81a), escrita para las condiciones pre-falla y multiplicada por  $\omega$ ,

$$\omega \frac{L_{12}}{L_2} \lambda_{2d0} = \omega \lambda_{1d0} - x' i_{1d0} \quad (2.82a)$$

$$\omega \frac{L_{12}}{L_2} \frac{\lambda_{2d0}}{\sqrt{2}} = V_{1q0} - x' I_{1d0} \quad (2.82b)$$

$$\text{Donde } V_{1q0} = \frac{v_{1q0}}{\sqrt{2}} \quad (2.82c)$$

Y el reemplazo de  $\omega \lambda_{1d0}$  por  $v_{1q0}$  sigue de la ecuación (2.74b). En manera similar de ecuación (2.77b).

$$\omega \frac{L_{12}}{L_2} \frac{\lambda_{2q0}}{\sqrt{2}} = V_{1d0} - x' I_{1q0} \quad (2.83)$$

Combinando las ecuaciones (2.82b) y (2.82c),

$$\begin{aligned} \omega \frac{L_{12}}{L_{22}} \left( \frac{\lambda_{2d0}}{\sqrt{2}} + j \frac{\lambda_{2q0}}{\sqrt{2}} \right) &= \frac{1}{j} \left[ (V_{1d0} + jV_{1q0}) - jx'(I_{1d0} + jI_{1q0}) \right] \\ &= \frac{1}{j} (V_{10} - jx'I_{10}) = \frac{1}{j} E_1' \end{aligned} \quad (2.84)$$

En ecuación (2.88),  $V_{10}$  es el voltaje en valor efectivo pre-falla, y

$$E_1' = V_{10} - jx'I_{10} \quad (2.85)$$

$E_1'$ , se denomina el *voltaje inicial detrás de la reactancia transitoria (transiente)* de la maquina de inducción. Ver circuito equivalente de falla.

El valor efectivo de la magnitud de la corriente simétrica inicial de cortocircuito de la ecuación (2.79) llega a ser:

$$I_1 = \frac{E_1'}{x'} \quad (2.86a)$$

Con el decremento determinado por la ecuación (2.80b) aplicada, la magnitud del valor efectivo de la corriente para cualquier tiempo  $t$  después la falla es:

$$I_1' = \frac{E_1'}{x'} e^{-t/T'} \quad (2.86b)$$

Aunque se ha ignorado la resistencia del estator  $r_1$  se le puede adicionar si se requiere más precisión. El voltaje  $E_1'$  detrás de la reactancia transitoria es un voltaje proporcional a las concatenaciones de flujos, (enlaces de flujos) del rotor (ver ecuación (2.88)). Este voltaje cambia con estas concatenaciones y, para un cortocircuito trifásico, decrece hasta cero a una razón (velocidad- rapidez) proporcional al constante de tiempo  $T'$ . Cambios al constante de tiempo para reactancia externa entre los bornes de la maquina y la falla se puede realizar añadiendo esa reactancia al numerador y denominador de la fracción en la ecuación del constante de tiempo (ecuación (2.80b)).

---

## *Capítulo III*

---

### **3.1- Introducción**

---

Las perturbaciones que puede sufrir un parque eólico son, principalmente, de dos tipos: (i) perturbaciones debidas a variaciones en la velocidad del viento, y (ii), perturbaciones originadas por fallas en la red próxima al parque eólico, [4]. Esta sección detalla la respuesta de los aerogeneradores del parque, atendiendo al segundo tipo de perturbación.

Con esto se realizaron simulaciones de los aerogeneradores para tres aspectos fundamentales:

1. La desconexión brusca del parque eólico de la red con distintos niveles de carga.
2. La conexión de los aerogeneradores a la red.
3. Introducción de cortocircuitos en las cercanías del parque eólico (comportamiento ante fallas).

Estas simulaciones se realizaron a partir del modelo circuital del generador asincrónico del capítulo II utilizando tanto su análisis en régimen estacionario que dinámico, para determinar el comportamiento de las máquinas bajo estas condiciones. Conociendo el comportamiento de las magnitudes del aerogenerador, facilita el pronóstico (hasta cierto nivel) de las afectaciones que producirán en la red próxima a la cual se conectarán.

En la realidad estas afectaciones a la red paralela serán pocas visibles (pero no invisibles) ya que la red es mucho mas potente que el parque a instalar. Se verán estas afectaciones mucho más en parques con potencias más cercanas a la potencia de cortocircuito de la red en el punto de enlace.

La simulación de la conexión a la red, se trata de la entrada de la máquina a la red a una velocidad de rotación angular en el eje. Se quieren ver sus corrientes iniciales y su acercamiento a la corriente de trabajo estable.

Las simulaciones de la desconexión y de cortocircuito se hacen a partir de un régimen de trabajo de la maquina (tensión y potencia inicial). Se realizaron varias simulaciones para distintas condiciones para determinar el comportamiento de las corrientes y tensiones bajo cada condición.

### 3.2-Simulación de la desconexión brusca del generador de la red

Para determinar el comportamiento de los aerogeneradores del parque eólico de Gibara frente a una desconexión brusca de la red, se realizó un programa utilizando el editor de MATLAB. En este programa el usuario tiene la posibilidad de determinar las condiciones bajo las cuales ocurre la desconexión, o sea, el nivel de tensión de operación y de potencia que se está entregando como por ciento del nominal de la máquina y podrá ver después el comportamiento de la corriente y del voltaje. Se presenta a continuación un procedimiento lógico para su elaboración.

#### Algoritmo para realizar el programa:

1. Datos de entrada:  
Potencia de salida de la máquina (potencia total  $P_{sal}$ ), tensión de salida,  $U_1$ . Se puede programarse corridas del programa para una variación de  $P_{sal}$  desde  $0 - 1.25 P_n$ . Con  $U_1 = U_n$ ;  $U_1 = 0.9 U_n$  y con  $U_1 = 1.1 U_n$ .
2. Determinación del deslizamiento  $s$  mediante la característica mecánica.  
Con las características mecánicas (tabuladas), se debe realizar un ajuste (preferiblemente en EXCEL, para obtener la función  $s = f(P_{sal})$ ). Conocida la  $P_{sal}$ , se halla el deslizamiento con el cual está trabajando la máquina.  
$$s = f(P_{sal})$$
3. Determinación de la potencia electromagnética,  $P_{em}$   
Con el deslizamiento se halla la potencia electromagnética y el momento electromagnético.  
$$P_{em} = f(s)$$
$$P_{em} = \frac{3 U_1^2 R_2 / s}{\left( R_1 + R_2 / s \right)^2 + (X_1 + X_2)^2}$$
4. Pérdidas de cobre en el rotor  
A partir de la potencia electromagnética se determina las pérdidas de cobre en el rotor.

$$P_{cob2} = s P_{em}$$

5 Corriente en el rotor.

Se determina el valor efectivo de la corriente en el rotor.

$$I_2 = U_1 \frac{Z_0}{Z_1 Z_0 + Z_0 Z_{2\text{elect}} + Z_1 Z_{2\text{elect}}}, \quad Z_{2\text{elect}} = \frac{R_2}{s} + j X_2$$

$$Z_0 = R_0 + j X_0$$

$$Z_1 = R_1 + j X_1$$

6 Determinación de la fem  $E_2$

$$E_2 = E_1 = Z_2 I_2 + R_{mec} I_2$$

$$R_{mec} = R_2 \frac{1-s}{s}$$

7 Cálculo de la corriente en el estator

Según el circuito equivalente  $E_1 = E_2$ . Esto permite determinar el valor efectivo de la corriente en el estator. Esta corriente está en fase con  $U_1$  porque la energía reactiva se le entregará a la máquina por el rotor para lograr un factor de potencia unitario y evitar que la máquina demande reactivo desde la red.

$$I_1 = U_1 \frac{Z_0 + Z_{2\text{elect}}}{Z_1 Z_0 + Z_0 Z_{2\text{elect}} + Z_1 Z_{2\text{elect}}}$$

8 Corriente de magnetización,  $I_o$

Se halla la corriente de magnetización (suma fasorial de  $I_1$  e  $I_2$ )

$$I_o = I_1 + I_2$$

9 Se determina la fem  $E_1$

$$E_1 = -Z_0 I_o$$

10 Potencia mecánica,  $P_{mec}$

Se determina la potencia mecánica que está recibiendo la máquina en su eje. Hasta aquí se conoce cómo está funcionando la máquina momentos antes de que se produzca la desconexión.

$$P_{mec} = \frac{(1-s)}{s} P_{cob2}$$

- 13 Condiciones iniciales para el cálculo del proceso transitorio.

Con la expresión siguiente se determina el valor efectivo de la corriente en el rotor para el instante  $t = 0$ . Los parámetros  $L_2$  y  $L_{12}$  son conocidos a partir del circuito equivalente.

$$I_{2\text{inic}} = \frac{\Psi_{2(t=0)}}{L_2} = I_{2(t=0)} + k_2 I_{1(t=0)}$$

$$k_2 = L_{12}/L_2$$

- 14 Cálculo de la constante de tiempo,  $T_{20}$

$$T_{20} = L_2/R_2$$

- 15 Corriente en el rotor,  $I_2$

Se determina la variación en el tiempo de la corriente en el rotor cuando se produzca la desconexión. Esta es una respuesta a la ecuación diferencial que rige este proceso.

$$I_2 = I_{2\text{inic}} e^{-\frac{t}{T_{20}}}$$

- 16 Valores iniciales de las corrientes del rotor.

Se determina los valores iniciales instantáneos de las corrientes en las tres fases del rotor.

$$i_{2a\text{inic}} = R_e [I_{2\text{inic}}]$$

$$i_{2b\text{inic}} = R_e \left[ I_{2\text{inic}} e^{-j^{2\pi/3}} \right]$$

$$i_{2c\text{inic}} = R_e \left[ I_{2\text{inic}} e^{j^{2\pi/3}} \right]$$

- 17 Valores instantáneos de las corrientes del rotor, en los ejes d, q

Se determina el comportamiento de los valores instantáneos de las corrientes en las tres fases del rotor.

$$i_{2a} = i_{2ainic} e^{-t/T_{20}}$$

$$i_{2b} = i_{2binic} e^{-t/T_{20}}$$

$$i_{2c} = i_{2cinic} e^{-t/T_{20}}$$

- 18 Para el cálculo de la tensión en el estator durante el proceso de desconexión

Finalmente se define el comportamiento de la tensión que se inducirá en el estator cuando se produzca la desconexión.

$$\Psi_{linic} = L_{12} I_{2inic}$$

$$U_{linic} = \left( j \omega - \frac{1}{T_{20}} \right) \Psi_{linic} \approx j \omega \Psi_{linic}$$

$$U_1 = U_{linic} e^{-t/T_{20}} e^{j \omega t}$$

Con las características mecánicas del aerogenerador de inducción, se graficó la característica  $s = f(P_{sal})$  utilizando como herramienta el Microsoft EXEL, y se realizó un ajuste de curvas para determinar esta ecuación del deslizamiento para brindar un mejor flujo al programa a realizar. **(Ver anexos 4)**

Según el ajuste obtenido, para la realización del programa en MATLAB se utilizó la relación  $s = 0.00531 \ln(P_{sal}) - 0.0268$ .

Se muestra el programa elaborado en el editor de MATLAB para la condición de la desconexión brusca de la red eléctrica en el **anexo 6**.

### **3.3-Simulación de un cortocircuito trifásico en los terminales de la maquina**

Para realizar esta simulación, se utilizara la misma técnica que se utilizó para la desconexión brusca ya presentada.

#### **Algoritmo para realizar el programa:**

1. Datos de entrada:  
Potencia de salida de la máquina (potencia total  $P_{sal}$ ), tensión de salida,  $U_1$ . Es posible programar corridas del programa para una variación de

$P_{sal}$  desde 0 – 1.25  $P_n$ . Con  $U_1 = U_n$ ;  $U_1 = 0.9 U_n$  y con  $U_1 = 1.1 U_n$ .

2. Determinación del deslizamiento  $s$  mediante la característica mecánica.  
Con las características mecánicas (tabuladas), se debe realizar un ajuste (preferiblemente en EXCEL, para obtener la función  $s = f(P_{sal})$ . Conocida la  $P_{sal}$ , se halla el deslizamiento con el cual está trabajando la máquina.

$$s = f(P_{sal})$$

3. Determinación de la potencia electromagnética,  $P_{em}$   
Con el deslizamiento se halla la potencia electromagnética y el momento electromagnético.

$$P_{em} = f(s)$$

$$P_{em} = \frac{3 U_1^2 R_2 / s}{\left( R_1 + R_2 / s \right)^2 + (X_1 + X_2)^2}$$

4. Pérdidas de cobre en el rotor

A partir de la potencia electromagnética se determina las pérdidas de cobre en el rotor.

$$p_{cob2} = s P_{em}$$

5. Corriente en el rotor.

Se determina el valor efectivo de la corriente en el rotor.

$$I_2 = U_1 \frac{Z_0}{Z_1 Z_0 + Z_0 Z_{2\text{elect}} + Z_1 Z_{2\text{elect}}}, \quad Z_{2\text{elect}} = \frac{R_2}{s} + j X_2$$

$$Z_0 = R_0 + j X_0$$

$$Z_1 = R_1 + j X_1$$

6. Determinación de la fem  $E_2$

$$E_2 = E_1 = Z_2 I_2 + R_{mec} I_2$$

$$R_{mec} = R_2 \frac{1-s}{s}$$

7. Cálculo de la corriente en el estator

Según el circuito equivalente  $E_1 = E_2$ . Esto permite determinar el valor efectivo de la corriente en el estator. Esta corriente está en fase con  $U_1$  porque la energía reactiva se le entregará a la máquina por el rotor para lograr un factor de potencia unitario y evitar que la máquina demande reactivo desde la red.

$$I_1 = U_1 \frac{Z_0 + Z_{2\text{ elect}}}{Z_1 Z_0 + Z_0 Z_{2\text{ elect}} + Z_1 Z_{2\text{ elect}}}$$

8. Se determina el *voltaje inicial detrás de la reactancia transitoria (trasiente)* de la maquina de inducción.

$$E'_1 = V_{10} - jx'I_{10}$$

9. El valor efectivo de la magnitud de la corriente simétrica inicial de cortocircuito

$$I_1 = \frac{E'_1}{x'}$$

10. Se determina el constante de tiempo de la maquina de inducción con el estator en circuito abierto

$$T'_0 = \frac{L_{22}}{r_2}$$

- 11 Se determina la inductancia transitoria de la maquina

$$L' = L_{11} - \frac{L_{12}^2}{L_{22}}$$

12. Se determina el constante de tiempo de la maquina de inducción con el estator en corto circuito

$$T' = T'_0 \frac{L'}{L_{11}} = T'_0 \frac{x'}{x_{11}}$$

13. Se determina la magnitud del valor efectivo de la corriente para cualquier tiempo  $t$  después la falla por:

$$I'_1 = \frac{E'_1}{x'} e^{-t/T'}$$

Se presenta el programa elaborado en MATLAB para este caso en el **anexo 6**.

### 3.4- Simulación de la conexión del aerogenerador a la red

Para la simulación de la conexión de los aerogeneradores, se realizó un programa que brinda al usuario la posibilidad de introducir el deslizamiento que la máquina tendrá en su instante de conexión, y por ende la velocidad de rotación del eje. La idea es determinar como se comportaría la máquina cuando se conecte a distintas velocidades de viento y distintas condiciones preexistentes de la red eléctrica paralela.

Se describirá como antes un procedimiento lógico para realizar el programa.

1. Se llevan los magnitudes eléctricas a p.u tomando como bases las magnitudes estatoricas
2. Se determinan los coeficientes de acoplamiento del estator, del rotor y el total.

$$k_1 = L_{12}L_1^{-1} = 1 - \sigma_1, \quad k_2 = L_{12}L_2^{-1} = 1 - \sigma_2, \quad k = k_1k_2 = L_{12}^2(L_1L_2)^{-1} = 1 - \sigma$$

3. Se determinan los coeficientes de dispersión

$$\sigma_1 = L_{1\sigma}L_1^{-1} = 1 - k_1, \text{ es el coeficiente de dispersión del estator;}$$

$$\sigma_2 = L_{2\sigma}L_2^{-1} = 1 - k_2, \text{ es el coeficiente de dispersión del rotor;}$$

$$\sigma = 1 - L_{12}^2(L_1L_2)^{-1} = 1 - k, \text{ es el coeficiente de dispersión resultante.}$$

4. Se determinan las inductancias transitorias

$$L'_1 = L_1 - L_{12}^2L_2^{-1} = L_{1\sigma} + (L_{2\sigma}^{-1} + L_{12}^{-1})^{-1} = \sigma L_1, \text{ es la inducción transitoria del devanado del estator.}$$

$$L'_2 = L_2 - L_{12}^2L_1^{-1} = L_{2\sigma} + (L_{1\sigma}^{-1} + L_{12}^{-1})^{-1} = \sigma L_2, \text{ es la inducción transitoria del devanado del estator.}$$

5. Se determinan los deslizamientos máximos.

$$s_{k1} = R_1 / (\omega_1 L'_1), \text{ es el deslizamiento crítico, que corresponde al momento máximo, durante la alimentación por parte del rotor y con estator en cortocircuito;}$$

$$s_{k2} = R_2 / (\omega_1 L'_2), \text{ es el deslizamiento crítico, que corresponde al momento máximo, durante la alimentación por parte del estator y rotor en cortocircuito}$$

6. Se determinan los coeficientes auxiliares.

$$k_{21aper} \approx jk_1 s_{k2} \omega_1 / \omega;$$

$$k_{12per} \approx -jk_2 s_{k2} \omega_1 / \omega;$$

7. Se determinan las corrientes estables

$$\tilde{I}_{1est} = \tilde{I}_1 = \frac{\tilde{U}_1 (\sigma s_{k2} + js)}{j\omega_1 L'_1 [(s_{k2} + s * s_{k1}) + j(s - \sigma s_{k1} s_{k2})]}$$

$$\tilde{I}_{2est} = \tilde{I}_2 = \frac{\tilde{U}_1 (-k_1 js)}{j\omega_1 L'_2 [(s_{k2} + s * s_{k1}) + j(s - \sigma s_{k1} s_{k2})]}$$

8. Se determinan los componentes libres.

$$\tilde{I}_{1aper} = \frac{(1 - k_2 k_{21aper})}{\sigma(k_{12per} k_{21aper} - 1)} [(1 - k_1 k_{12per}) * (\tilde{I}_{est} - \tilde{I}_{1inic}) + \frac{k_1}{k_2} (k_2 - k_{12per}) * (\tilde{I}_{2est} - \tilde{I}_{2inic})];$$

$$\tilde{I}_{1per} = \frac{(k_{12per} - k_2)}{\sigma(k_{12per} k_{21aper} - 1)} [(k_1 - k_{21aper}) * (\tilde{I}_{est} - \tilde{I}_{1inic}) + \frac{k_1}{k_2} (1 - k_2 k_{21aper}) * (\tilde{I}_{2est} - \tilde{I}_{2inic})],$$

$$\tilde{I}_{2aper} = \tilde{I}_{1aper} \frac{k_2 (k_{21aper} - k_1)}{k_1 (1 - k_2 k_{21aper})};$$

$$\tilde{I}_{2per} = \tilde{I}_{1per} \frac{k_2 (1 - k_1 k_{12per})}{k_1 (k_{12per} - k_2)}.$$

9. Se determinan las raíces de la ecuación característica

$$p_{aper} = p_{aper.\alpha} + jp_{aper.\beta} = -s_{k1} \omega_1 + j\omega(1 - \sigma)(s_{k2} + s_{k1})^2 \omega_1^2 / (4\omega^2)$$

$$p_{per} = p_{per.\alpha} + jp_{per.\beta} = -s_{k2} \omega_1 + j\omega - j\omega(1 - \sigma)(s_{k2} + s_{k1})^2 \omega_1^2 / (4\omega^2)$$

10. Se determina la corriente del proceso transitorio

$$\tilde{I}_1 = \tilde{I}_{1est} + \tilde{I}_{1lib}, \quad \tilde{I}_2 = \tilde{I}_{2est} + \tilde{I}_{2lib}$$

A base de este procedimiento lógico, se realizó el programa y se muestra en el **anexo 6**.

Queda planteado el procedimiento para la realización de las simulaciones necesarias para las condiciones de los procesos transitorios.

## Capítulo IV

### 4.1- Introducción

La interpretación de los resultados obtenidos permitirá obtener un análisis cuantitativo de las principales magnitudes eléctricas de los aerogeneradores del parque eólico y con estos se puede aplicar las medidas adecuadas para mantener los generadores en buen estado de funcionamiento y determinar márgenes de operación seguros de los mismos.

### 4.2- Determinación de las condiciones de operación a partir de los resultados del diagrama circular.

Habiendo trazado el diagrama circular de la máquina asincrónica, se procede a determinar sus características de funcionamiento tomando el caso del generador conectado a la red.

Es importante aclarar que para el modo generador hay una inversión del flujo de potencia con respecto al modo motor. También el diagrama circular trazado es de la máquina de inducción en general y fue trazado a una escala de 1mm: 10 [A] y 1mm: 10 [V]. Ver diagrama en el anexo V.

También es necesario resaltar que el diagrama en cuestión es una aproximación y no el trazado del diagrama circular exacto, es decir está basado en el circuito equivalente aproximado.

Equivalencia de segmentos entre los modos motor y generador:

DE gen. = AE mot.

AE gen. = DB mot.

$CB_{gen.} \approx 0.5CB_{mot.}$

Evaluación de las características:

$$P_{sal} = 3 * \frac{V_1}{\sqrt{3}} * AE = 3 * 398.372 * (10 * 50.5924) = 604.637 kW$$

$$P_{in} = 3 * \frac{V_1}{\sqrt{3}} * DE = 3 * 398.372 * (10 * 54.3905) = 650.029 kW$$

$$P_{\text{Pérdidas rotacionales}} = 3 * \frac{V_1}{\sqrt{3}} * AB = 3 * 398.372 * (10 * 2.2357) = 26.72 kW$$

$$P_{cob_1} = 3 * \frac{V_1}{\sqrt{3}} * BC = 3 * 398.372 * (10 * 0.5 * 1.236) \approx 7.4 kW$$

$$P_{cob_2} = 3 \frac{V_1}{\sqrt{3}} * CD = 3 * 398.372 * (10 * 0.9997) = 11.95 kW$$

$$Torque_{máquina} = 3 \frac{V_1}{\sqrt{3}} * \frac{CE}{\omega_s} = 3 * 398.372 * \frac{(10 * 51.5921)}{188.5} \approx 3.3 MNm$$

$s = -\frac{CD}{CE} = \frac{0.9997}{51.5921} = -0.019$ . El deslizamiento de la máquina según el diagrama circular, la operación en el modo generador esta dentro de los márgenes de 0 y -1.

$$\eta = \frac{AE}{DE} = \frac{50.5924}{54.3905} = 0.93$$

$$f.p. = \cos(\hat{V}_1 I_1) = \cos(36^\circ) = 0.809$$

$$Q = P * \tan(\theta) = P_{sal} * \tan(36) = 439.294 kVAR$$

$$I_2 = O'E = 10 * 55.6498 = 556.5 \angle 18^\circ A$$

Estos resultados fueron obtenidos para la operación a corriente nominal. De esta evaluación se observa que la máquina no esta entregando toda la potencia, ella tiene una pérdida total de

$$\sum p_{\text{pérdids}} = P_{rot} + P_{cob_1} + P_{cob_2} \approx 46.07 kW$$

$P_{in} - P_{sal} = 45.392 kW$ , hay una diferencia de 0.678 kW, esta es debido a las aproximaciones.

No toda la potencia suministrada al generador es utilizada, se pierde una parte. Tampoco esta operando a la potencia nominal de 864kW.

La potencia de entrada del mismo depende del motor primario que hace girar la máquina por encima de la velocidad sincrónica y por lo tanto repercute en la potencia de salida del generador.

También se debe notar que el generador esta trabajando con un deslizamiento bastante pequeño y negativo, el signo negativo es lo que da lugar a la generación de energía, como fue planteado en el capítulo dos. La máquina también tiene una eficiencia muy alta y un factor de potencia relativamente alto. El factor de potencia no es igual a la unidad como fue planteado en los datos, (ver el anexo 2), esto es debido a que no se tomó en consideración el trabajo de los inversores para la regulación de las potencias. Pero la configuración DFIG con convertidor entre generador y red, sí permite obtener factor de potencia de uno, [13].

Pues, el diagrama circular permite obtener las características electromecánicas del generador.

#### 4.3- Comportamiento de la maquina frente a cortocircuitos (trifásicos)

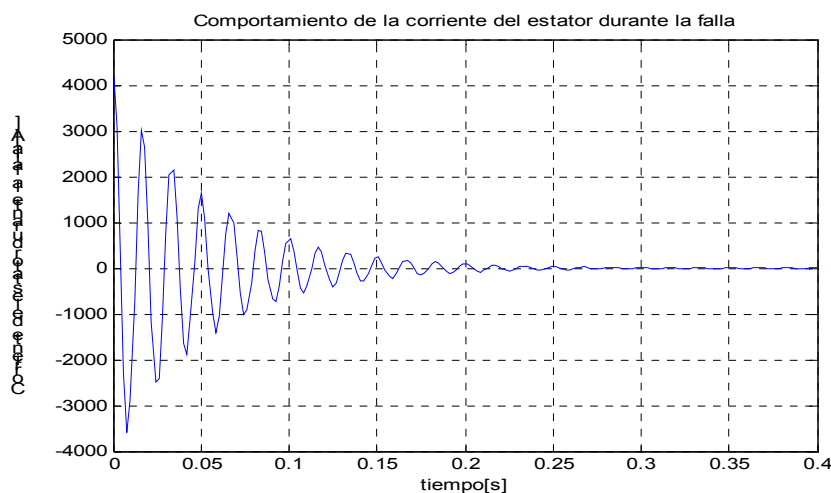
Para determinar el comportamiento de las máquinas en este régimen, fueron realizadas varias simulaciones, en dos conjuntos:

1. Manteniendo constante la potencia en su valor nominal, se realizaron tres corridas para la tensión en  $U_n$ ,  $0.9 \cdot U_n$  y  $1.1 \cdot U_n$ .
2. Manteniendo constante la tensión en su valor nominal, se realizaron tres corridas para la potencia en  $0.5 \cdot P_n$ ,  $0.8 \cdot P_n$  y  $1.25 \cdot P_n$ .

Se muestran las características obtenidos a continuación.

##### Conjunto 1.

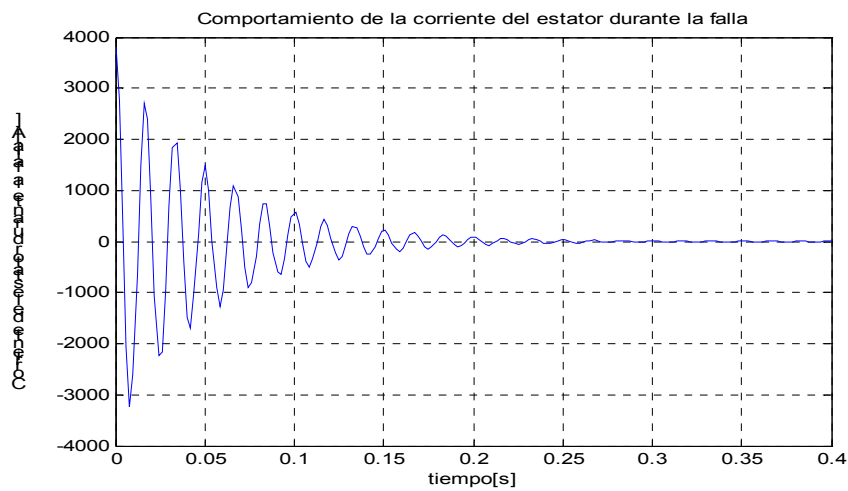
##### Corrida para $U = U_n$ a $P_n$



**Figura 4.1 Comportamiento de la corriente durante la falla a  $U_n$  y  $P_n$**

Para la condición indicada, es posible notar que la corriente en el estator durante la falla sube a valores de 5.5 veces la corriente nominal en las primeras etapas de la falla para condiciones nominales de trabajo, en la figura 4.1. Llega cerca al valor permisible el cual se ha establecido a seis veces el nominal. Pero esta corriente se amortigua rápidamente y ya a los 0.1s, se encuentra cercana a su valor nominal y a los 0.2s se cae hasta cero. Como el constante de tiempo de cortocircuito de esta maquina es igual a 0.0532s, se cae aproximadamente en 3 veces el constante de tiempo.

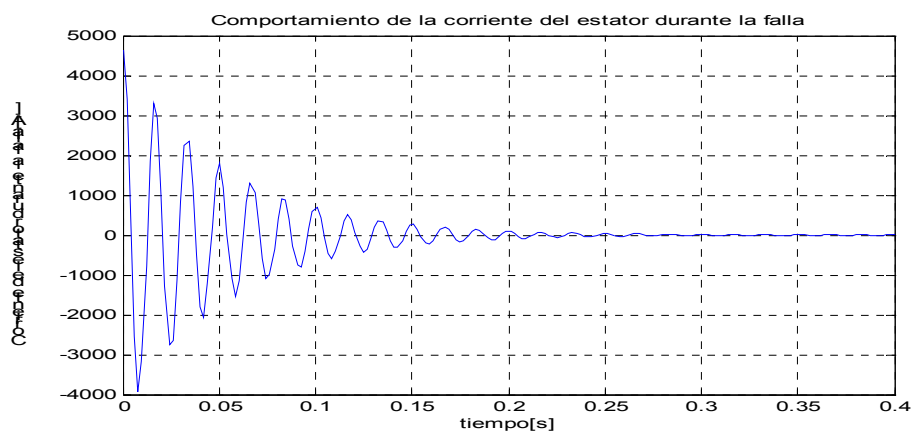
### Corrida para $U = 0.9 \cdot U_n$ a $P_n$



**Figura 4.2** Comportamiento de la corriente durante la falla a  $0.9U_n$  y  $P_n$

Aquí en la figura 4.2, la corriente de falla inicial es aproximadamente 5 veces la nominal, e incluso se amortigua de manera más rápida.

### Corrida para $U = 1.1 \cdot U_n$ a $P_n$



**Figura 4.3** Comportamiento de la corriente durante la falla a  $1.1U_n$  y  $P_n$

En la figura 4.3, la corriente de falla inicial llega a más de 6 veces la nominal y luego se amortigua.

De manera general, para el generador operando a potencia nominal, la magnitud de la corriente de cortocircuito está en dependencia de la tensión en los bornes del estator. Para valores de tensión menores que la nominal la magnitud de la corriente es menor que para

fallas ocurriendo con una operación a tensión nominal y esta magnitud aumentó con un aumento en la tensión de operación.

Pues un control adecuado de la tensión en los bornes del estator controlará las magnitudes de corrientes de cortocircuitos trifásicos apareciendo en las cercanías del estator.

## Conjunto 2

### Corrida para $P=0.5 \cdot P_n$ a $U_n$

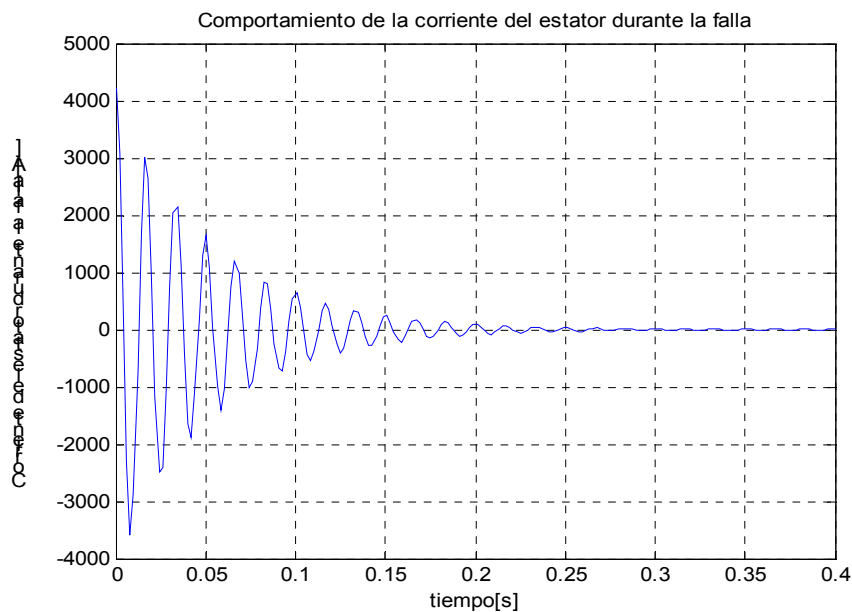
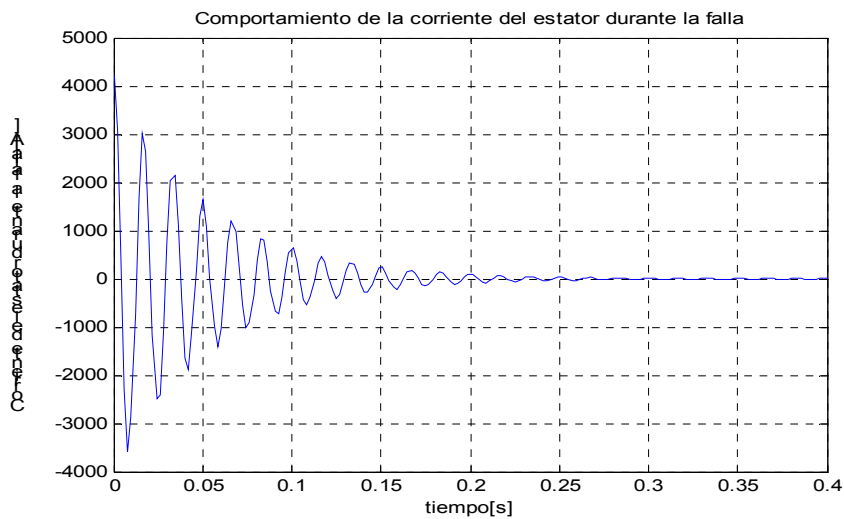


Figura 4.4 Comportamiento de la corriente durante la falla a  $0.5P_n$  y  $U_n$

La figura 4.4 muestra que la corriente de falla es alrededor de 5.7 veces la nominal para el 50% de la potencia nominal operando a tensión nominal.

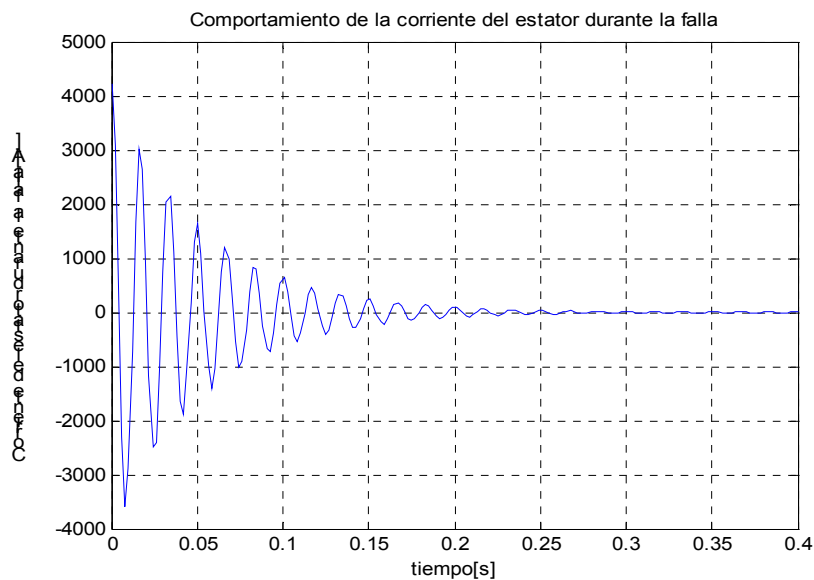
### Corrida para $P = 0.8 \cdot P_n$ a $U_n$



**Figura 4.5 Comportamiento de la corriente durante la falla a  $0.8P_n$  y  $U_n$**

La corriente de falla en la figura 4.5 es aproximadamente 5.6 veces la nominal para una operación al 80% de la capacidad del generador. Pues en comparación a la operación al 50% se ha disminuido la magnitud de la corriente de cortocircuito.

#### **Corrida para $P = 1.25 \cdot P_n$ a $U_n$**



**Figura 4.6 Comportamiento de la corriente durante la falla a  $1.25P_n$  y  $U_n$**

En la figura 4.6, similar al caso anterior la magnitud de la corriente de cortocircuito se encuentra alrededor de 5.6 veces la nominal. *Interesante es de notar que la corriente de falla no haya sido de mayor magnitud frente a un aumento en la entrega de potencia.*

Entre los dos conjuntos de corridos realizados suele decir que la tensión de operación del generador tiene más efecto sobre la magnitud de la corriente de cortocircuito que la potencia que se esta entregando al ocurrir la falla.

Con estos resultados es importante mantener la tensión en los bornes del estator en un margen permitido para poder reducir los niveles de corrientes que podrán ocurrir en los generadores.

#### 4.4- Comportamiento frente a la desconexión brusca de la red.

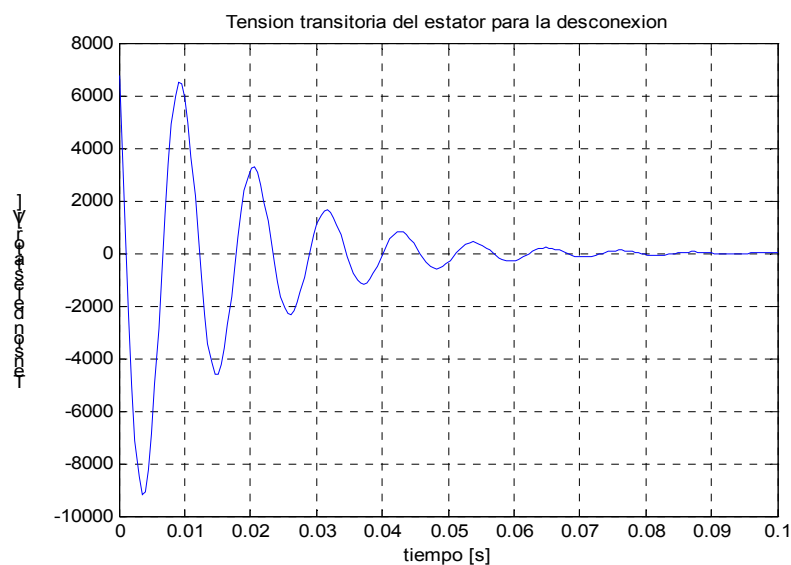
Para determinar el comportamiento de las maquinas en este régimen, también fueron realizados varias simulaciones, en dos conjuntos igual que en el régimen de falla:

1. Manteniendo constante la potencia en su valor nominal, se realizaron tres corridas para la tensión en  $U_n$ ,  $0.9 \cdot U_n$  y  $1.1 \cdot U_n$ .
2. Manteniendo constante la tensión en su valor nominal, se realizaron tres corridas para la potencia en  $0.5 \cdot P_n$ ,  $0.8 \cdot P_n$  y  $1.25 \cdot P_n$

Se muestran las características obtenidos a continuación.

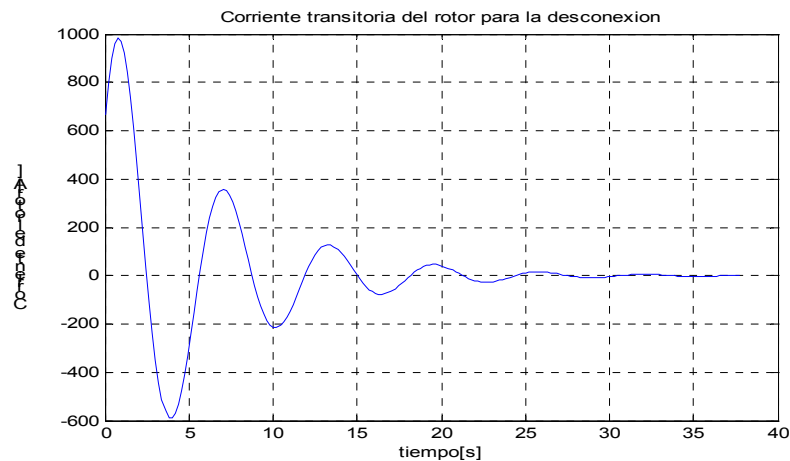
##### Conjunto 1

##### Corrida para $U = 0.9 \cdot U_n$ a $P_n$



**Figura 4.7 Comportamiento de la tensión del estator durante la desconexión a  $0.9U_n$  y  $P_n$**

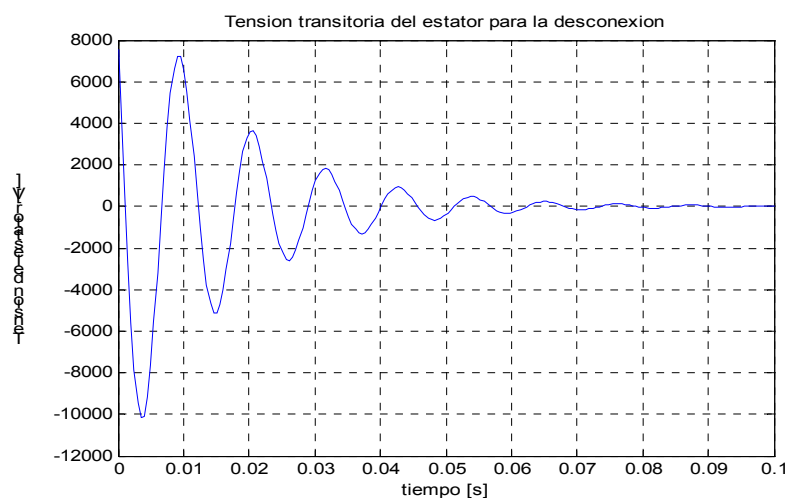
En la figura 4.7, se nota que al desconectar el generador de la red, se produce una subida súbita de la tensión en el estator. Este valor de tensión es más de 8 veces el valor nominal. Este podrá resultar muy dañino para el generador si dura para tiempos muy largos.



**Figura 4.8 Comportamiento de la corriente del rotor durante la desconexión a  $0.9U_n$  y  $P_n$**

La corriente de cortocircuito en el rotor, figura 4.8, al desconectar el generador es alrededor de 3 veces la nominal del rotor para la condición simulada.

#### **Corrida para $U = U_n$ a $P_n$**



**Figura 4.9 Comportamiento de la tensión del estator durante la desconexión a  $U_n$  y  $P_n$**

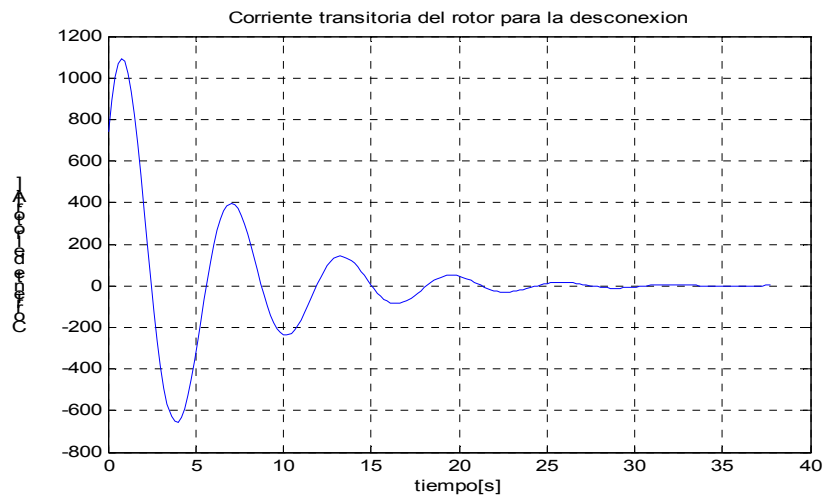


Figura 4.10 Comportamiento de la corriente del rotor durante la desconexión a  $U_n$  y  $P_n$

### Corrida Para $U = 1.1 \cdot U_n$ a $P_n$

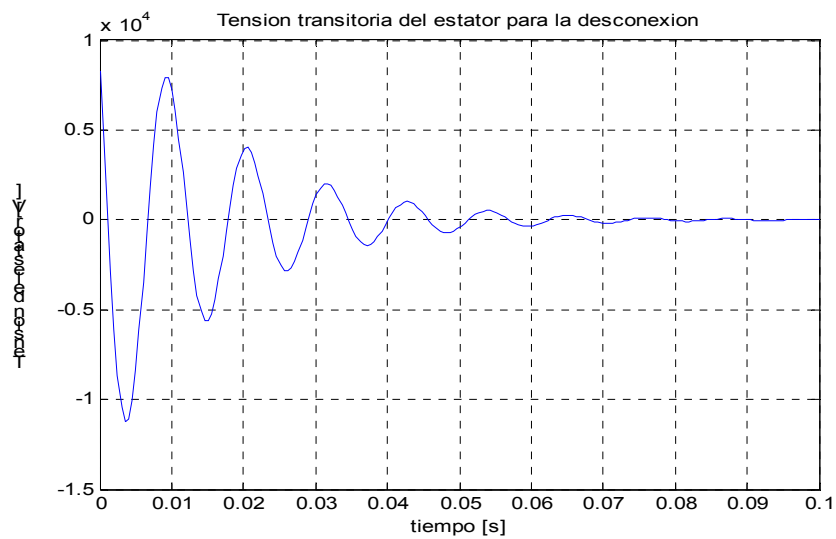
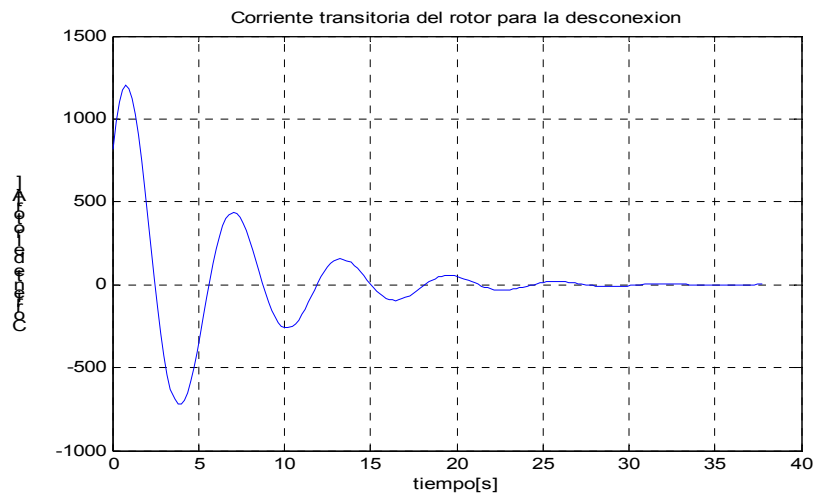


Figura 4.11 Comportamiento de la tensión del estator durante la desconexión a  $1.1U_n$  y  $P_n$

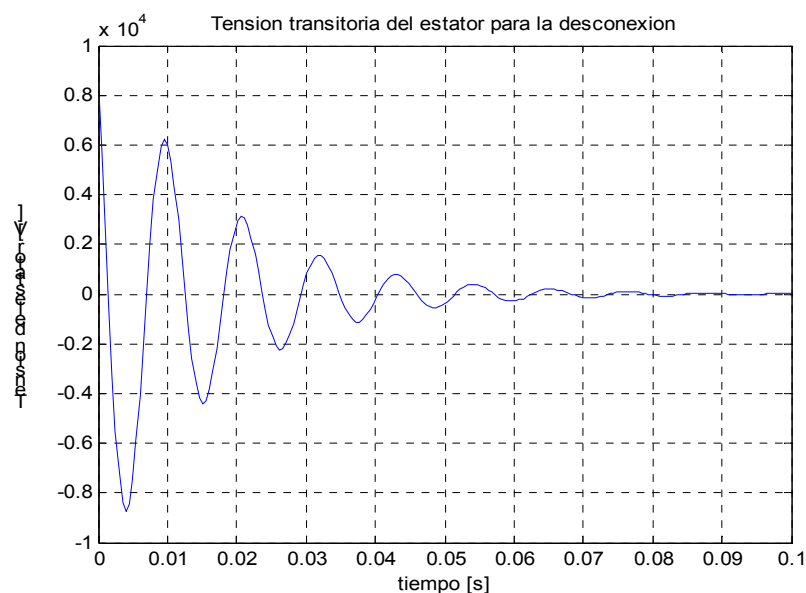


**Figura 4.12 Comportamiento de la corriente del rotor durante la desconexión a  $1.1U_n$  y  $P_n$**

De los resultados del conjunto 1 es observado que para mayores valores de tensión en el estator, se produce mayores valores de tensión y corriente transitorios, con el generador operando a potencia nominal.

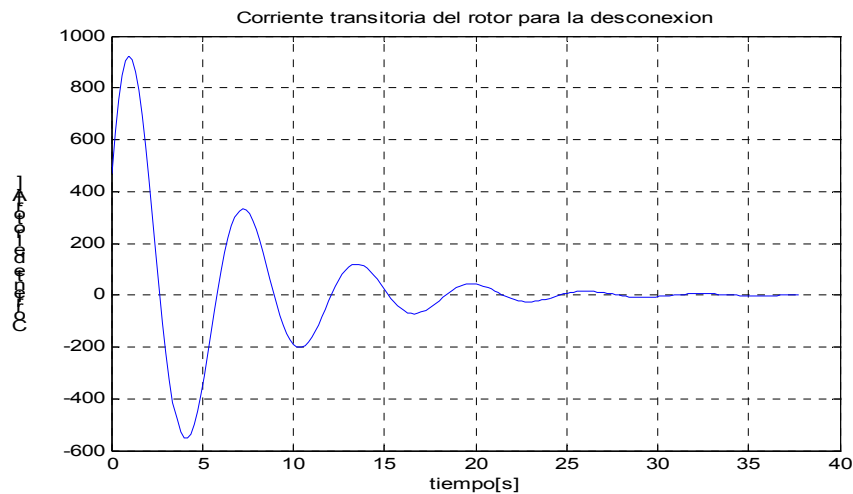
## Conjunto 2

### Corrida para $P = 0.5 \cdot P_n$ a $U_n$



**Figura 4.13 Comportamiento de la tensión del estator durante la desconexión a  $0.5P_n$  y  $U_n$**

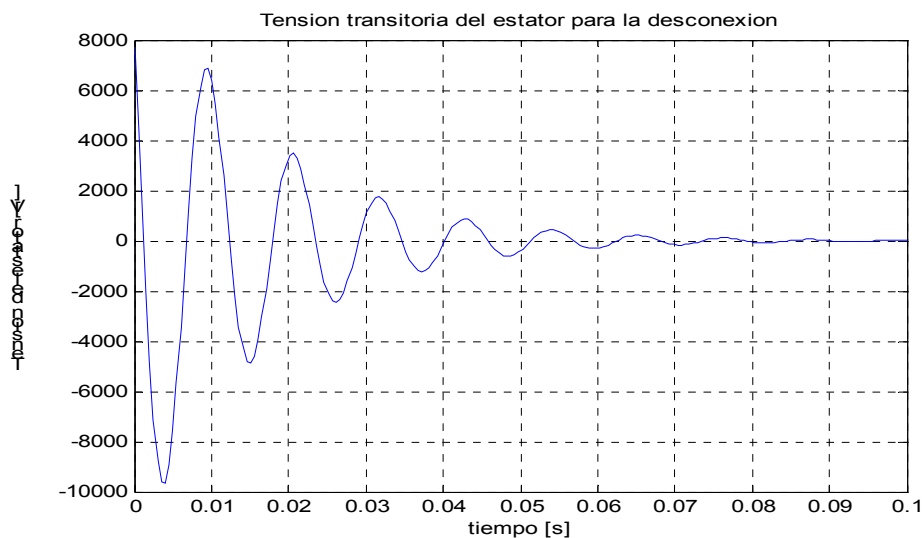
La tensión transitoria en la figura 4.13, está en el orden de 10 veces la nominal, para una operación del generador al 50% de su capacidad a plena carga.



**Figura 4.14 Comportamiento de la corriente del rotor durante la desconexión a  $0.5P_n$  y  $U_n$**

La corriente del rotor, figura 4.14 mantiene valores de 30% mayor el valor nominal para tiempos de hasta 5 segundos y luego disminuyó.

#### **Corrida para $P = 0.8 \cdot P_n$ a $U_n$**



**Figura 4.15 Comportamiento de la tensión del estator durante la desconexión a  $0.8P_n$  y  $U_n$**

Para las condiciones simuladas en la figura 4.15 se presenta valores de tensión transitoria de más de 8 veces el valor nominal.

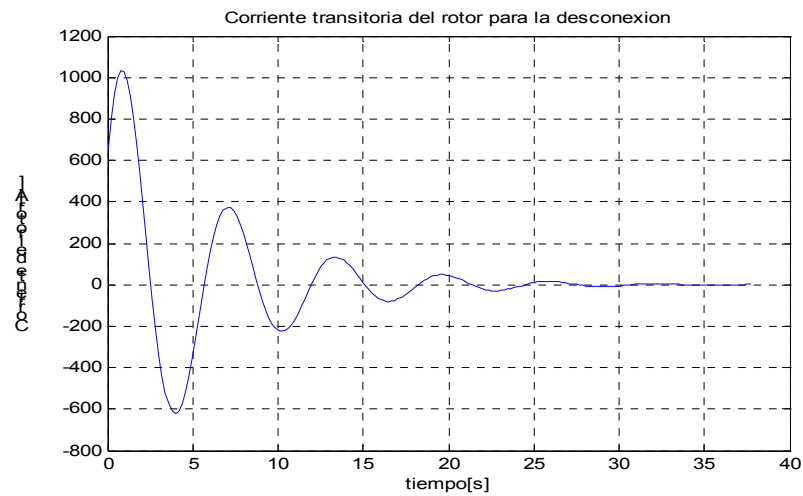


Figura 4.16 Comportamiento de la corriente del rotor durante la desconexión a  $0.8P_n$  y  $U_n$

### Corrida para $P = 1.25 \cdot P_n$ a $U_n$

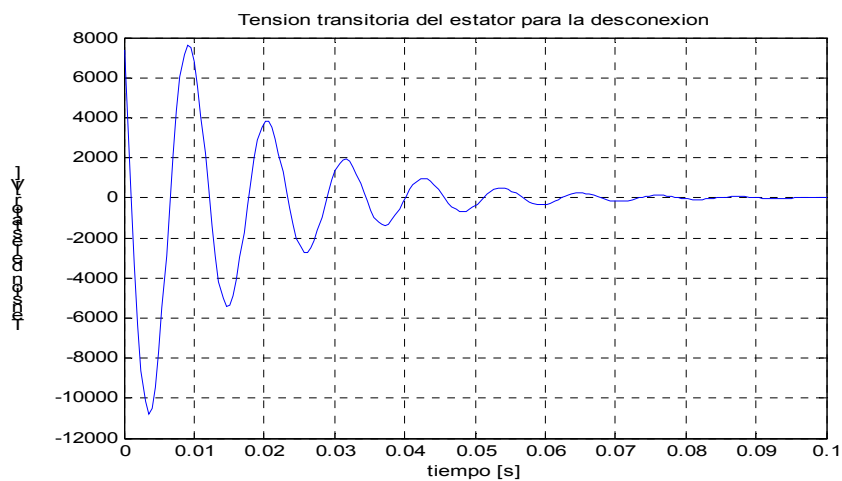
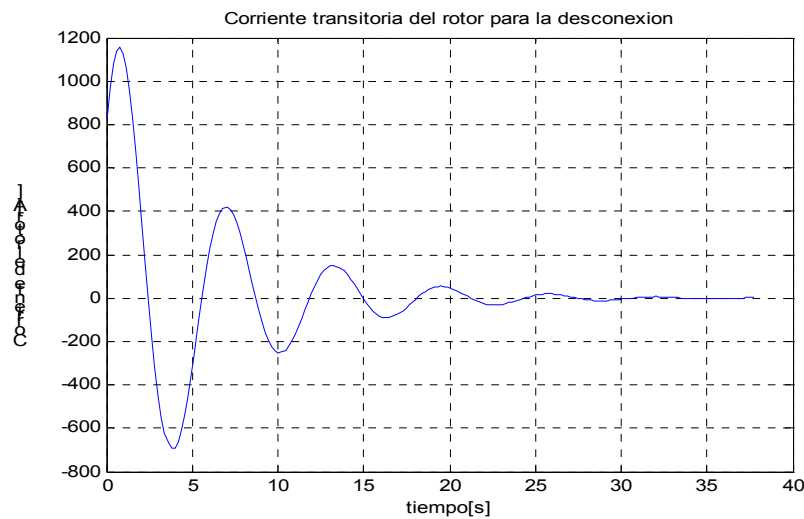


Figura 4.17 Comportamiento de la tensión del estator durante la desconexión a  $1.25P_n$  y  $U_n$



**Figura 4.18 Comportamiento de la corriente del rotor durante la desconexión a  $1.25P_n$  y  $U_n$**

Se puede notar que bajo este régimen las tensiones tienden a subir hasta diez veces su valor nominal, independientemente del valor de la tensión al cual esta trabajando o nivel de potencia que se esta entregando. Pero a la vez se nota que las corrientes nunca llegan a dos veces la nominal. Como la corriente es la que genera calor y puede ser mas perjudicial a la maquina, puede ser que estas condiciones sean aceptables para la maquina. Se ve también que las tensiones llegan dentro de valores aceptables (aproximadamente la nominal) a los 0.5s al producir la desconexión,  $\approx 3$  veces el constante de tiempo (0.01628s) en este caso.

#### **4.5- Comportamiento ante la conexión de la maquina a la red**

Para la determinación del comportamiento de la máquina en este régimen, se realizaron cinco corridas a deslizamientos de 0.15%, 0.45%, 0.65%, 0.86% y 1%. Los resultados obtenidos y sus análisis se presentan a continuación.

##### **Corrida a 0.15%**

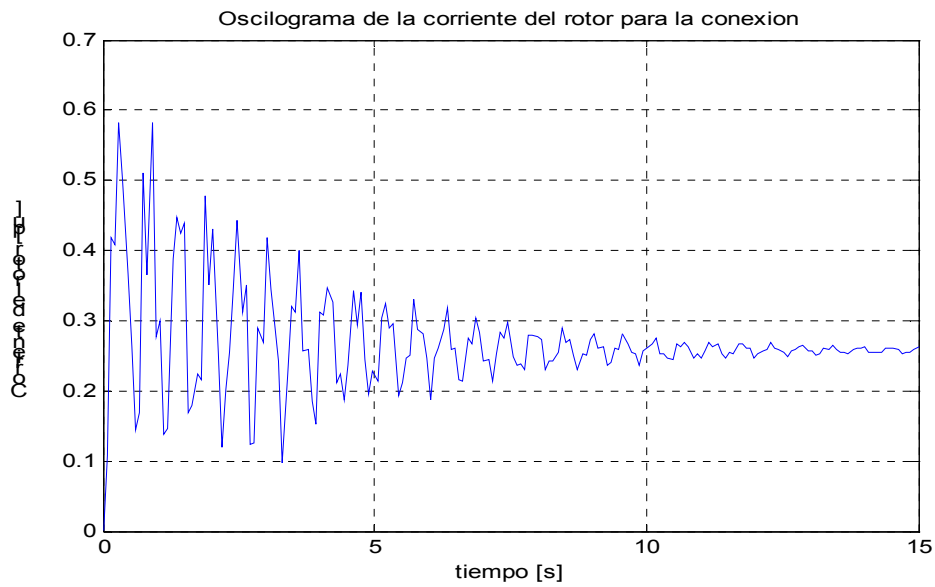


Figura 4.19 Comportamiento de la corriente del rotor al conectar el generador a  $s = 0.15\%$ .

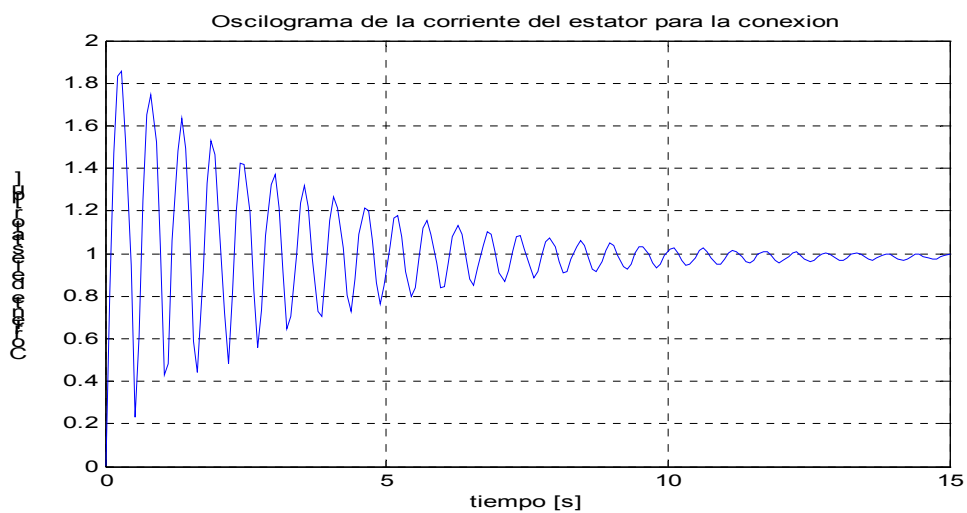


Figura 4.20 Comportamiento de la corriente del estator al conectar el generador a  $s = 0.15\%$ .

### Corrida a 0.45%

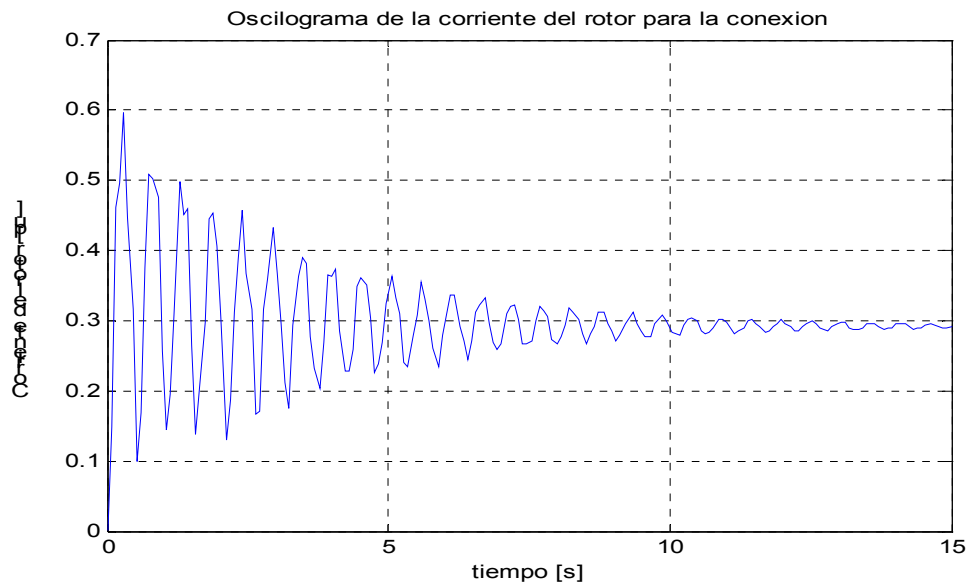


Figura 4.21 Comportamiento de la corriente del rotor al conectar el generador a  $s = 0.45\%$ .

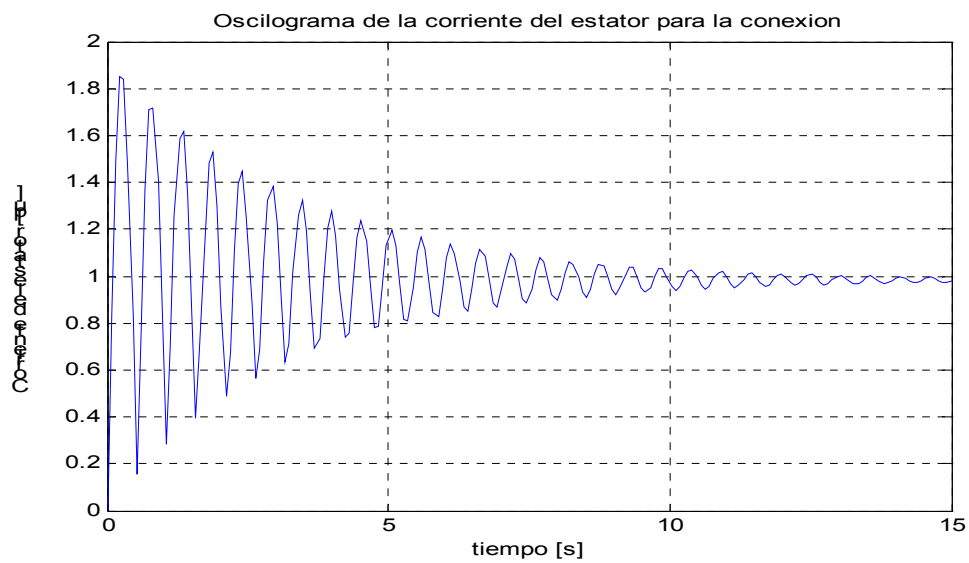
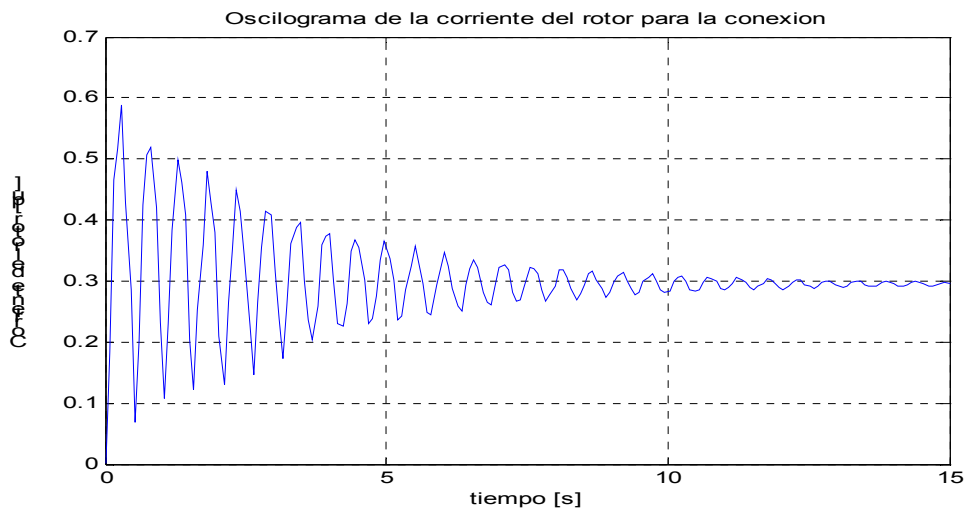
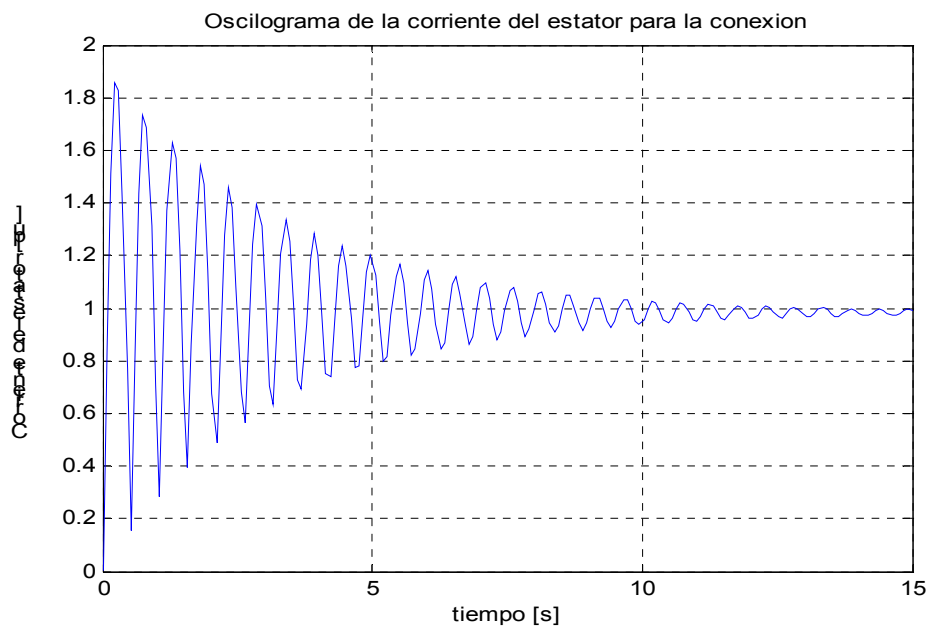
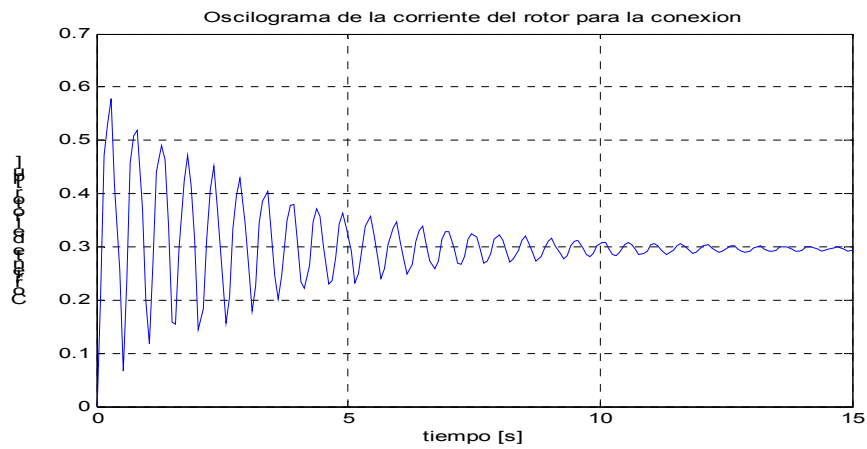
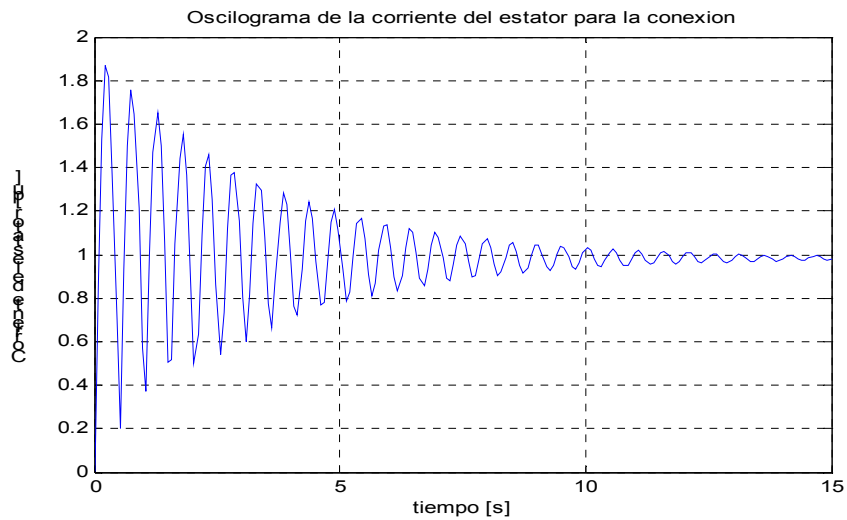
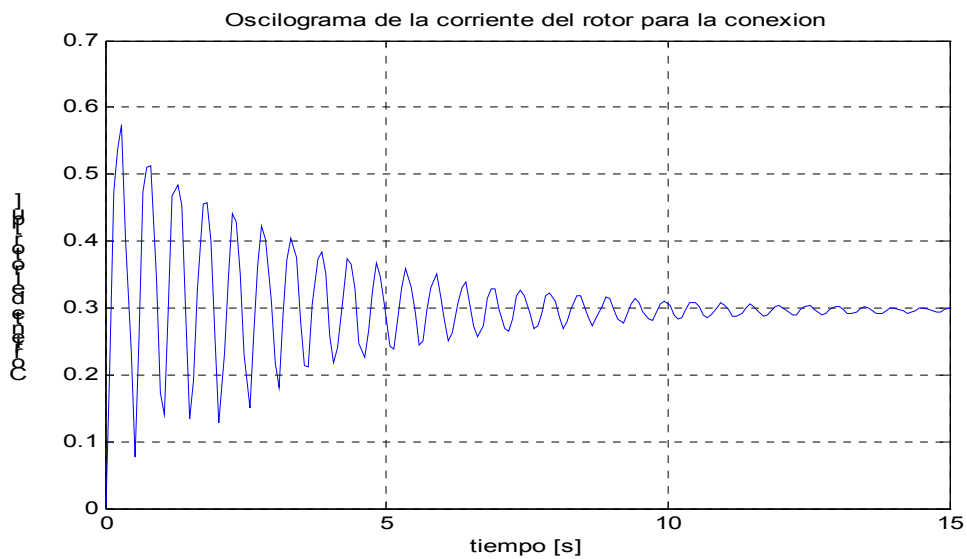


Figura 4.22 Comportamiento de la corriente del estator al conectar el generador a  $s = 0.45\%$ .

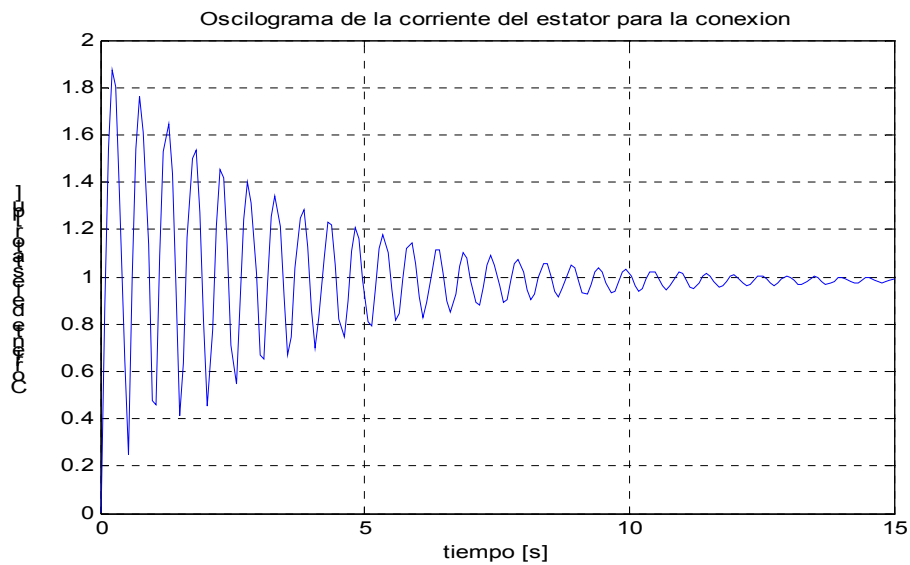
**Corrida a 0.65%****Figura 4.23 comportamiento de la corriente del rotor al conectar el generador  $s = 0.65\%$ .****Figura 4.24 comportamiento de la corriente del estator al conectar el generador  $s = 0.65\%$ .**

**Corrida a 0.86%****Figura 4.25 comportamiento de la corriente del rotor al conectar el generador a  $s = 0.86\%$ .****Figura 4.26 comportamiento de la corriente del estator al conectar el generador a  $s = 0.86\%$ .**

## Corrida a 1%



**Figura 4.27** comportamiento de la corriente del rotor al conectar el generador a  $s = 1\%$ .



**Figura 4.28** comportamiento de la corriente del estator al conectar el generador a  $s = 1\%$ .

Para realizar las simulaciones, se asume que la velocidad de giro al cual se realiza la conexión se mantiene constante durante el proceso.

Se puede apreciar de las corridas realizadas, (figuras 4.19 a 4.28), que a medida que incrementa la velocidad de giro al cual se realiza la conexión (simulado por el incremento de deslizamiento):

1. La magnitud de la corriente no se afecta
2. Las oscilaciones de las corrientes antes de que se establezcan son mayores.
3. El tiempo en el cual se establece tiende a aumentar

Se observe que en el instante  $t = 0$ , las corrientes son iguales a cero. Y después alcanzan sus valores máximos que suelen ser alrededor de 1.8 veces el valor estable, y a medida que tiene lugar el amortiguamiento de las componentes aperiódicas y periódicas  $I_{aper}$  y  $I_{per}$ , las corrientes van aproximándose asintóticamente a su valor permanente,  $I_{est}$ .

Como se ha establecido, los coeficientes de amortiguamiento dependen esencialmente de la velocidad angular del rotor. Entonces a medida que vaya incrementando la velocidad de giro, más tiempo tardará en atenuarse a su valor estable.

## Conclusiones

---

De manera general se puede concluir que la simulación matemática de los generadores asincrónicos puede suministrar un pronóstico acerca de su comportamiento frente a los fenómenos de:

1. su conexión a la red
2. su desconexión brusca de la red
3. la aparición de un cortocircuito trifásico en sus terminales.

Se plantea las siguientes conclusiones:

- Al ocurrir fallas trifásicas en los terminales del estator de los generadores, producen elevados valores de corrientes, entre 5 a 6 veces los valores nominales pero para tiempos muy cortos.
- Bajo el régimen de desconexión de los generadores de la red las tensiones tienden a subir hasta diez veces su valor nominal, independientemente del valor de la tensión al cual está trabajando o nivel de potencia que se está entregando los generadores. Pero a la vez se nota que las corrientes nunca llegan a mucho más de 3 veces las nominales.
- Según la simulación del proceso de la conexión del generador a la red se notó que mientras mayor sea el deslizamiento de la máquina más tiempo toma para que la corriente en el instante de conexión se estabilice.
- El diagrama circular permite obtener las características electromecánicas del generador.

## Recomendaciones

---

1. A partir del estudio de la falla trifásica en los bornes de la maquina, se recomienda que se instalen a las máquinas, protecciones de sobrevoltaje rigurosas. Se ha mostrado que mientras más alto sea el voltaje, más altos llegan a ser los valores de la corriente inicial de la falla. Se recomienda un ajuste alrededor del 10 % por encima de la nominal o menor esto es por qué, las condiciones que rigen el funcionamiento de la máquina son la tensión y la potencia que entregue y se ha mostrado que la potencia no influye mucho en el valor de la corriente de falla, sino la tensión, y ya en el 10% por encima ya se encuentran corrientes de falla potencialmente perjudiciales.
2. Se recomienda estudios para mejorar las estrategias de control del voltaje de la red en general porque este también ayudará a proteger las máquinas y a la vez mejorará la satisfacción del los clientes, quines son los mas importantes al final.
3. También se recomienda que se realice estudios más profundos sobre el efecto de la desconexión brusca de la máquina. Según el criterio de los autores de este documento (todavía ingenieros en formación) el efecto de la desconexión brusca como tal esta en los bordes de aceptables, pero pensamos que sería útil un estudio realizado por especialistas con experiencia para mejor determinar sus efectos sobre las máquinas y que puedan hacer mejores recomendaciones a cerca de su protección frente a este fenómeno.
4. Se recomiendan mas estudios acerca de la conexión de la máquina a la red eléctrica con el fin de determinar bajo que condiciones se pueda conectar la máquina a la red eléctrica. Se sabe que siempre que hay una estación generadora entra la red, se producen afectaciones al sistema general, principalmente en las cercanías a la estación. Los estudios pueden brindar soluciones, conociendo bien el sistema al cual se va a conectar, para la disminución de dichas afectaciones que se producirán.

## Bibliografía

---

- [1] Durán E.M., "Metodología Para el Cálculo de los parámetros eléctricos de un sistema híbrido eólico \_ solar para redes aisladas." Trabajo de Diploma, Tutor: MSc. Wilber Acuña Rodríguez, 2005.
- [2] Fitzgerald A.E., Kingsley Jr. C.: "Electric Machinery, 2<sup>nd</sup> ed., Edition Revolucionaria, Vedado Habana, pp. 293-309, 1966.
- [3] Gálvez H.G, "Estado del Arte de la Energía Eólica en Cuba y el Mundo." Presentación en Power Point, Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES). Santiago de Cuba. C.P. 90800. Cuba
- [4] González M., [et al] "Modelos de Aerogeneradores para Estudios de estabilidad de Sistemas Eléctricos." Instituto de Investigación Tecnológica, Universidad Pontificia Comillas Alberto Aguilera 23, 28015 Madrid .
- [5] Ivanov Smolenski A.V.: "Máquinas Eléctricas (3 tomos)." Editorial Mir. Moscú. 1988.
- [6] Kostenko, M.P. y Piotrovski, L.M. "Máquinas Eléctricas (2 tomos)." Editorial Mir. Moscú. 1976.
- [7] McPherson G., "An Introduction to Electrical Machines and Transformers",
- [8] Mohan N., [et al], "Harmonics and Flicker Control in Wind Farms", University of Minnesota, 2002.
- [9] Vargas L. S, [et al], "Análisis Dinámico de la Operación de Parques Eólicos Interconectados al SIC", 7p, 2006.
- [10] Ramírez M.G., "Estudio de la Influencia de la Generación Eólica Sobre la red Eléctrica Local. "Trabajo de Diploma, Tutor: MSc. Wilber Acuña Rodríguez, 2005.
- [11] Rueda I.R. "Procesos transitorios en motores de inducción" Conferencias 9 y 10, Máquinas Eléctricas III.
- [12] Serrano D.P., "Modelación del Generador Asíncrono." Trabajo de Diploma, Tutores: Msc. Ignacio Romero Rueda y Msc. Wilber Acuña Rodríguez, 2005.

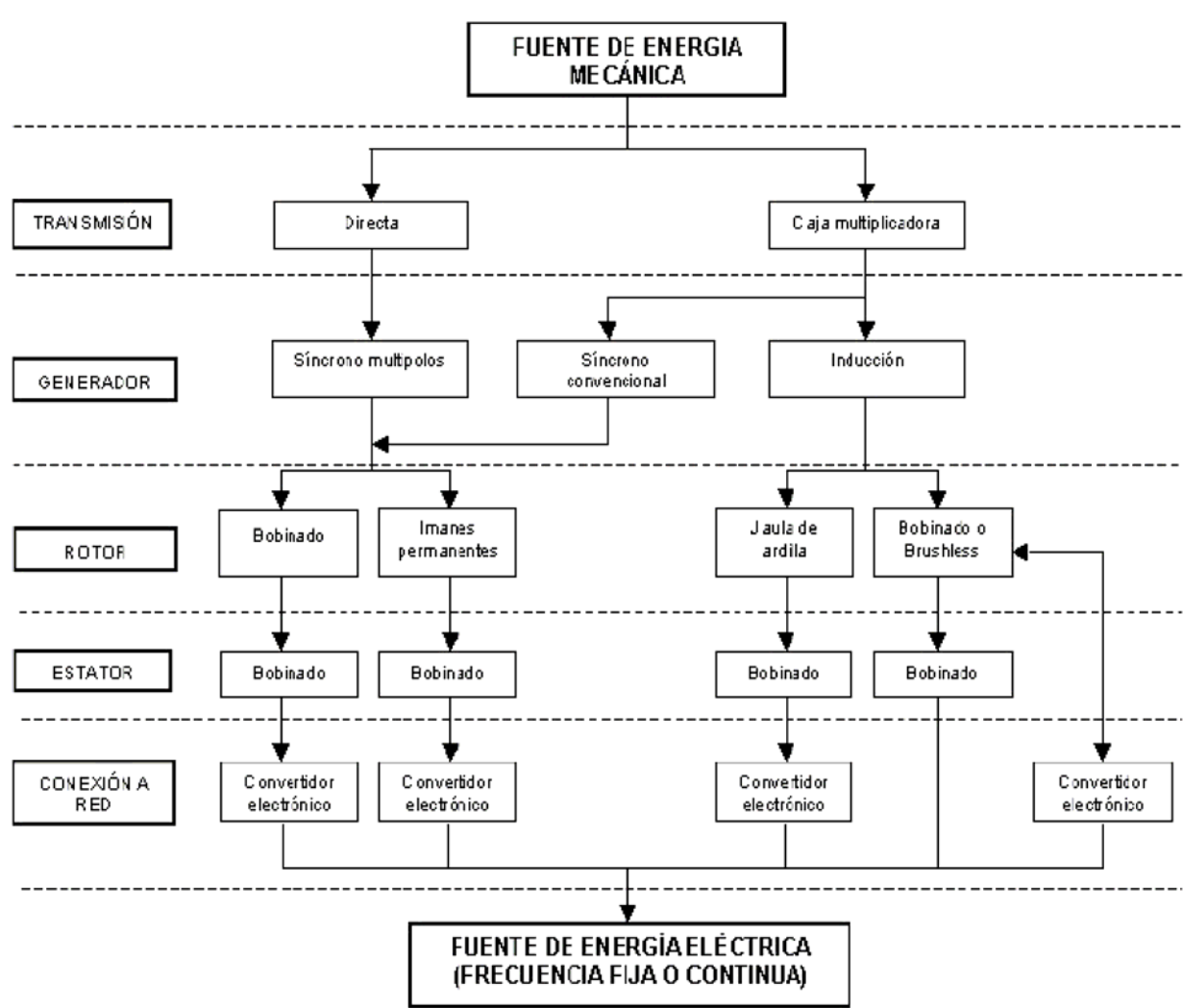
### **Sitios Web visitados:**

- [13] <http://agamenon.tsc.uah.es/Asignaturas/itiei/geer/apuntes/Tema%202.7-Infraestructura%20Electrica.pdf>.
- [14] [http://www.mct.gov.jm/energy\\_5.htm](http://www.mct.gov.jm/energy_5.htm)
- [15] <http://www.wwfja.com/energy/generation.html>
- [16] [http://www.elkraft.ntnu.no/norpie/10956873/Final%20Papers/054%20-%20Abram\\_DynamicResponseDFIG.PDF](http://www.elkraft.ntnu.no/norpie/10956873/Final%20Papers/054%20-%20Abram_DynamicResponseDFIG.PDF)
- [17] <http://canwea.ca/>
- [18] <http://www.infoeolica.com/>
- [19] <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/42b5e0aa5e5d3>.
- [20] <http://www.invenia.es/profit:2004.1414pdf>
- [21] [http://energetica21.com/articulos/ee/2005/ee\\_abr05\\_2.pdf](http://energetica21.com/articulos/ee/2005/ee_abr05_2.pdf)
- [22] [http://146.83.6.25/literatura/sistemas\\_potencia/aia-2006%20parques%20eolicos.pdf](http://146.83.6.25/literatura/sistemas_potencia/aia-2006%20parques%20eolicos.pdf)
- [23] [www.supergen-networks.org.uk](http://www.supergen-networks.org.uk)
- [24] <http://www.uni-duisburg.de/FB9/EAN/downloads/papers/erlich2007.pdf>.
- [25] <http://dpr.unitbv.ro/adept/asi/C4-4.pdf>.
- [26] <http://sppoasis.spp.org/documents/WPEK/uploads/ACF59AB.pdf>.
- [27] [http://bibliotecnica.upc.es/pfc/mostrar\\_dades\\_PFC.asp?id=36090](http://bibliotecnica.upc.es/pfc/mostrar_dades_PFC.asp?id=36090)

### Software utilizado

- 1). AUTOCAD 2004.
- 2). MATLAB 7.1
- 3). Paquete de Microsoft Office 2003.

MAPA DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA A ELÉCTRICA



## DATOS DEL AEROGENERADOR

---

Corriente nominal ( $I_n$ ) = 669 A

Tensión del rotor ( $U_{\text{rotor}}$ ) = 1851 V bloqueado.

Tensión del rotor ( $U_{\text{rotor}}$ ) = 150 V

Pot = 864 kW a plena carga

Pot en estator = 800 kW

Pot rot = 64 kW

Po = 17.8 kW

Qo = 260 kVAr

Corriente del rotor ( $I_{\text{rotor}}$ ) = 277 A

Corriente en vacío ( $I_0$ ) = 216 A

Momento nominal ( $M_n$ ) = 4244 Nm

Momento máximo ( $M_{\text{máx}}$ ) = 2.35 MNm

J = 54 kgm<sup>2</sup>

Factor de potencia (fp) = 1

Rendimiento a plena carga ( $\eta_{\text{plena carga}}$ ) = 95.6%

Velocidad sincrónica ( $n_s$ ) = 1800 r/min

Vel nom = 1944 r/min. Del rot del gen. (a que esta girando la maquina) trabajo

Caja multiplicadora = 32:1800 r/min

Fcaja = 61.74

Velocidad de conexión ( $V_c$ ) = 4 ms<sup>-1</sup>

Velocidad nominal ( $V_n$ ) = 14 – 15 ms<sup>-1</sup>

Velocidad de desconexión ( $V_d$ ) = 25 ms<sup>-1</sup>

Numero de polos (p) = 4

### Parámetros del circuito equivalente:

Resistencia del circuito del estator ( $R_1$ ) = 0.0159  $\Omega$  (115 °C)

Reactancia del circuito del estator ( $x_1$ ) = 0.0922  $\Omega$

Resistencia del circuito del rotor referido al estator ( $R_2'$ ) = 0.0112  $\Omega$

Reactancia del circuito del rotor referido al estator ( $x_2'$ ) = 0.130  $\Omega$

Resistencia del circuito magnético ( $R_m$ ) = 231  $\Omega$

Reactancia del circuito magnético ( $x_m$ ) = 7.99  $\Omega$

**Generadores asíncronos doblemente alimentados con convertidor entre generador y red**

Un generador asíncrono doblemente alimentado con convertidor entre generador y red tiene acoplado a la salida del rotor un doble convertidor con una capacidad del 30% de la potencia nominal del generador, para rectificar primero y ondular posteriormente, las corrientes retóricas e inyectarlas en la red,[13].

Al producirse una falla, se eleva bruscamente la corriente del rotor por efecto transformador, al elevarse la corriente del estator por la falla. La sobreintensidad tiene que pasar por el convertidor del lado de la red en su camino hacia la misma, por lo que si no se reduce su valor, puede resultar dañado el convertidor.

Hay varias formas de contrarrestar este efecto. Una es el llamado “Crowbar” activo, que consiste en provocar un cortocircuito a la salida del rotor conectando cuando se detecta el incremento de corriente y a través de tiristores, unas resistencias y convirtiendo el generador en uno tipo jaula de ardilla. Una vez desaparecida la falla se vuelve a la configuración inicial.

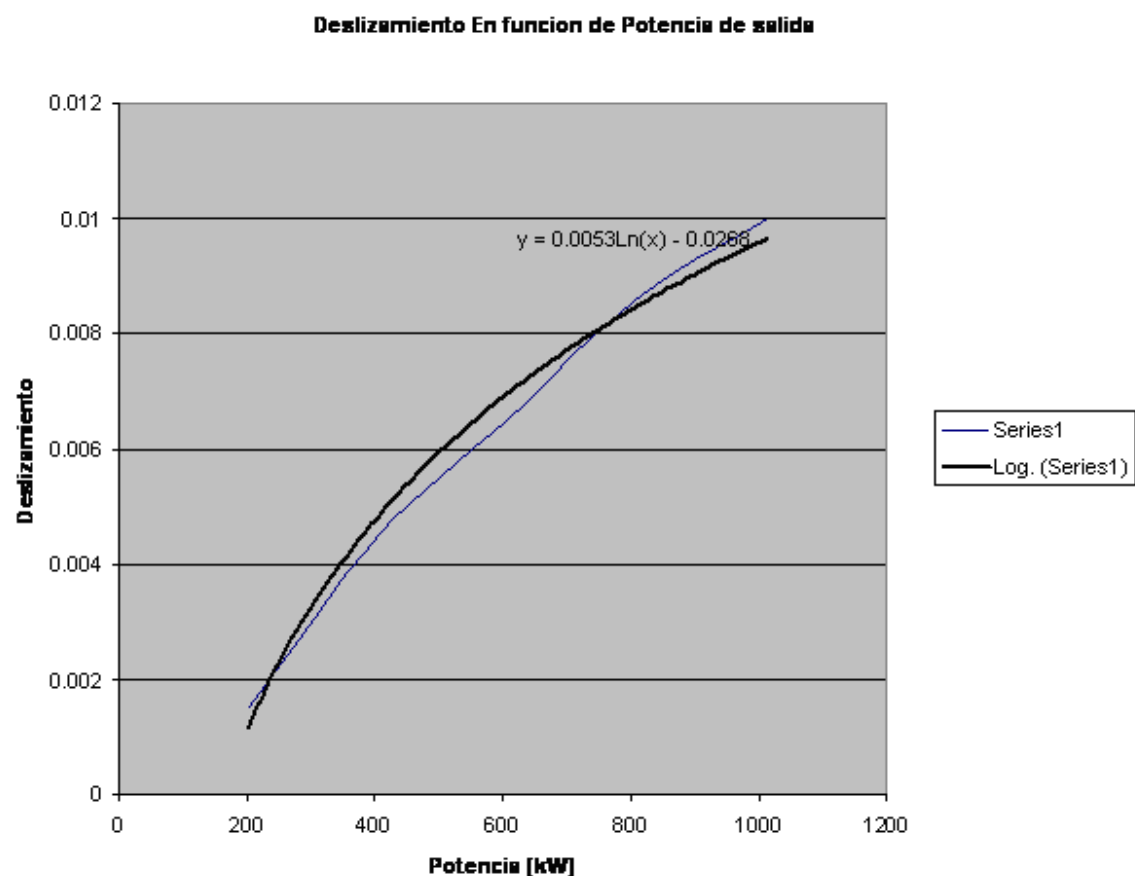
Otro sistema consiste en insertar, al inicio de la falla, unas resistencias en el bus de continua entre los convertidores del lado rotor y lado red, o usarse en lugar de resistencias, unos elementos tipo superconductores o baterías de almacenamiento, para conseguir que la tensión de continua no sobrepase sus límites nominales, devolviendo la energía a la red una vez sobrepasada la falla. Además el propio convertidor produce energía reactiva que ayuda a la recuperación de la tensión una vez despejada la falla.

*ANEXOS IV: CARACTERÍSTICA MECÁNICA DE LOS AEROGENERADORES Y SU CURVA DE AJUSTE.*

CARACTERISTICA MECANICA DE LOS AEROGENERADORES Y SU CURVA DE AJUSTE

**Tabla A4.1 Características mecánicas de los aerogeneradores**

| Carga, % | P, kW  | I, A | S, % | Cos φ | Rend η |
|----------|--------|------|------|-------|--------|
| 25       | 202,5  | 265  | 0,15 | 0,65  | 93,1   |
| 50       | 405,0  | 408  | 0,45 | 0,84  | 95,6   |
| 75       | 607,5  | 570  | 0,65 | 0,90  | 96,3   |
| 100      | 810,0  | 745  | 0,86 | 0,92  | 96,2   |
| 125      | 1012,5 | 930  | 1,00 | 0,92  | 96,2   |



**Figura A4.1 Curva de ajuste par las características dadas.**

### Procedimiento para la construcción del diagrama circular

---

- 1 Se dibuja una línea para representar la referencia  $V_1$
- 2 Escogiendo una escala conveniente de corriente y origen O, dibuja  $I_{nl}$  atrasando a  $V_1$  en el ángulo de factor de potencia a en vacío, ubicando a O'
- 3 Desde O y O' se dibujan las líneas OAA' y O'Q, cada una perpendicular a  $V_1$
- 4 Desde O, se dibuja la corriente a rotor bloqueado  $I_{1BR}$  en la misma escala que  $I_{nl}$ , atrasando  $V_1$  por el ángulo de factor de potencia a rotor bloqueado ( el cual es la corriente a rotor bloqueado a frecuencia y tensión nominal. Normalmente,  $I_{1BR}$  será 20 veces o más  $I_{nl}$ ). El extremo de  $I_{1BR}$  ubica a H
- 5 Desde el punto de  $I_{nl}$  hasta el extremo de  $I_{BR}$ , se dibuja O'H aproximadamente igual a  $I_{2BR}$ . Se mide  $I_{2BR}$  para encontrar su magnitud en amperes.
- 6 Desde H, se dibuja una línea paralela a  $V_1$  y perpendicular a OAA' y O'Q hasta que corte estas líneas. Se marcan A' y F en estos puntos
- 7 Teniendo a  $I_{2BR}$  y a  $r_1$ , calcula  $FG = I_{2BR}^2 \cdot r_1 / V_1$ . Dibuja la línea O'G.
- 8 Se construya un bisector perpendicular a O'H. Como O'H es una cuerda del círculo, este bisector pasará por el centro del círculo en P. Con radio OP o PH, se dibuja el círculo.

Para analizar el funcionamiento bajo carga de la maquina en régimen generador, solamente es necesario un parámetro, por ejemplo la corriente de línea. Si la corriente de línea es conocida, el punto E se puede encontrar al hacer un arco de radio  $I_1$ , con centro en O, y E es la intersección de este arco con el círculo. Después se dibuja la línea AE y se ubican B, C y D. Ver anexos. Para la realización del diagrama circular se utilizó el software AUTOCAD.

---

### Procedimiento para la construcción del diagrama circular

---

- 1 Se dibuja una línea para representar la referencia  $V_1$
- 2 Escogiendo una escala conveniente de corriente y origen O, dibuja  $I_{nl}$  atrasando a  $V_1$  en el ángulo de factor de potencia a en vacío, ubicando a O'
- 3 Desde O y O' se dibujan las líneas OAA' y O'Q, cada una perpendicular a  $V_1$
- 4 Desde O, se dibuja la corriente a rotor bloqueado  $I_{1BR}$  en la misma escala que  $I_{nl}$ , atrasando  $V_1$  por el ángulo de factor de potencia a rotor bloqueado ( el cual es la corriente a rotor bloqueado a frecuencia y tensión nominal. Normalmente,  $I_{1BR}$  será 20 veces o más  $I_{nl}$ ). El extremo de  $I_{1BR}$  ubica a H
- 5 Desde el punto de  $I_{nl}$  hasta el extremo de  $I_{BR}$ , se dibuja O'H aproximadamente igual a  $I_{2BR}$ . Se mide  $I_{2BR}$  para encontrar su magnitud en amperes.
- 6 Desde H, se dibuja una línea paralela a  $V_1$  y perpendicular a OAA' y O'Q hasta que corte estas líneas. Se marcan A' y F en estos puntos
- 7 Teniendo a  $I_{2BR}$  y a  $r_1$ , calcula  $FG = I_{2BR}^2 \cdot r_1 / V_1$ . Dibuja la línea O'G.
- 8 Se construya un bisector perpendicular a O'H. Como O'H es una cuerda del círculo, este bisector pasará por el centro del círculo en P. Con radio OP o PH, se dibuja el círculo.

Para analizar el funcionamiento bajo carga de la maquina en régimen generador, solamente es necesario un parámetro, por ejemplo la corriente de línea. Si la corriente de línea es conocida, el punto E se puede encontrar al hacer un arco de radio  $I_1$ , con centro en O, y E es la intersección de este arco con el círculo. Después se dibuja la línea AE y se ubican B, C y D. Ver anexos. Para la realización del diagrama circular se utilizó el software AUTOCAD.

---

## ANEXO VI: CODIGOS (INSTRUCCIONES) DE LOS PROGRAMAS SIMULADOS

---

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               Un programa para determinar la variación de la tensión en la red
%   Desconexion ----          (proceso transitorio), cuando se produzca la desconexión de la máquina
%                               bajo un régimen de carga dado. Los datos de entrada son la potencia
%                               total que está entregando la máquina en el momento de la desconexión y
%                               la tensión en la red.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear;
clc;
%t=1:0.01:180/pi, ad=sin(t), plot(ad)
npts = 200; t=linspace(0,0.1,npts);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Datos a entrar por el usuario %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
prompt={'Potencia nominal, (kW)', 'Tension nominal, (V)', 'frecuencia nominal (Hz)', '# pares de polos (p)'};
dlgTitle=['Datos nominales'];
def={'850', '690', '60', '2'};
lineNo=1;
ent0=inputdlg(prompt,dlgTitle,lineNo,def);
Pn =str2double(ent0{1});Un=str2double(ent0{2});f=str2double(ent0{3});p=str2double(ent0{4});
prompt={'R1, (ohms)', 'R2 ref, (ohms)', 'X1, (ohms)', 'X2 ref, (ohms)', 'Rm, (ohms)', 'Xm, (ohms)'};
dlgTitle=['Parametros del circuito equivalente'];
def={'0.2268', '0.12528', '0.51252', '0.76878', '185.1', '9.8554'};
lineNo=1;
ent=inputdlg(prompt,dlgTitle,lineNo,def);
R1 =str2double(ent{1});R2pr =str2double(ent{2});X1=str2double(ent{3});X2pr=str2double(ent{4});
Rm=str2double(ent{5});Xm=str2double(ent{6});
prompt={'Tension de desconexion, (U1), (% de Un)', 'Potencia de salida, (Psal [0 hasta 1.25Pn])'};
dlgTitle=['Condiciones de la desconexion'];
def={'0.9', '0.8'};
```

## ANEXO VI: CODIGOS (INSTRUCCIONES) DE LOS PROGRAMAS SIMULADOS

---

```
lineNo=1;
ent1=inputdlg(prompt,dlgTitle,lineNo,def);
Udesc =str2double(ent1{1});Pdesc =str2double(ent1{2});
wn=2*pi*f;wt=wn*t;
U1=Udesc*(Un/sqrt(3)).*exp(j*(wt));
Psal=Pdesc*Pn ;
s = (0.0053*log(Psal)-0.0268);% deslizamiento
%%%%%%%%%% Determinación de la potencia electromagnética, Pem %%%%%%%%%%%%%%%
Pem=abs(3*U1.^2*(R2pr/s))/((R1+(R2pr/s))^2+(X1+X2pr)^2) ;
%%%%%%%%%%%%% Determinacion de las perdidas del cobre del rotor %%%%%%%%%%%%%%%
pcob2=abs(s*Pem) ;
%%%%%%%%%%%%% Determinacion de la corriente en el rotor %%%%%%%%%%%%%%%
Zm=(Rm*j*Xm)/(Rm+j*Xm);
Z1=R1+j*X1;
Z2elect=R2pr/s+j*X2pr;
I2=U1.*(Zm/(Z1+Zm+Zm*Z2elect+Z1*Z2elect));
%%%%%%%%%%%%% Determinacion de la f.e.m E2 %%%%%%%%%%%%%%%
Rmec=R2pr*((1-s)/s);
E2=Z2elect*I2+Rmec*I2;
%%%%%%%%%%%%% determinacion de la corriente del estator %%%%%%%%%%%%%%%
Zeqt=(Zm+Z2elect)/(Z1*Zm+Zm*Z2elect+Z1*Z2elect)
I1= U1*Zeqt ;
%%%%%%%%%Determinacion de la corriente de magnetizacion %%%%%%%%%%
I0=I1+I2;
%%%%%%%%% Determinacion de la f.e.m E1 %%%%%%%%%%%%%%%
E1=-Zm*I0;
%% Determinacion de la potencia mecanica que se entrega a la maquina%%
```

## ANEXO VI: CODIGOS (INSTRUCCIONES) DE LOS PROGRAMAS SIMULADOS

---

```
Pmec=abs((1-s)/s)*pcob2);
##### Condiciones iniciales para el cálculo del proceso transitorio#####
Ws=(2*pi*f)/p ;%velocidad sincronica de la maquina
Lm=Xm/Ws ;%inductancia mutua de la maquina
L2=X2pr/(2*pi*f) ;
k2=Lm/L2 ;
I2inic=I2+k2*I1 ;%corriente inicial de la desconexiion
T20=L2/R2pr;
w=(1-s)*Ws ;%velocidad del rotor
%w=2*pi*f;
Flinic=Lm*I2inic ;%flujo inicial del estator
Ulinic=(j*w-(1/T20))*Flinic ;%tension inicial de la desconexion
y=j*w*Flinic;
for i = 1:npts
    a(i)=-t(i)/T20 ;
    b(i)=j*w*t(i);
    c(i)=j*(Ws-w)*t(i);
    eabp(i)=exp(a(i))*exp(c(i));
    eapb(i)=exp(a(i))*exp(b(i));
    I2desc(i)=I2inic(i)*eabp(i);
    U1desc(i)=Ulinic(i)*eapb(i);
end
%I22=abs(I2desc);
%U11=abs(U1desc);
##### Visualizacion de las variables #####
figure(1)
plot(2*pi*f*t,I2desc);grid
```

```
xlabel('tiempo[s]')
ylabel('Corriente del rotor[A]')
title('Corriente transitoria del rotor para la desconexion')
```

```
figure(2)
plot(t,Uldesc);grid
xlabel('tiempo [s]')
ylabel ('Tension del estator [V]')
title ('Tension transitoria del estator para la desconexion')
```

%%%%%%%%%% FIN DEL PROGRAMA %%%%%%%%%%%

# Simulación de un corto circuito trifásico en los terminales

## ANEXO VI: CODIGOS (INSTRUCCIONES) DE LOS PROGRAMAS SIMULADOS

---

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      Cortocircuito en los terminales del estator
%
%      Objetivo: visualizar el cambio de la corriente del estator durante un
%      cortocircuito trifásico.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear;
clc;
npts = 200; t=linspace(0,0.4,npts);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Datos a entrar por el usuario %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
prompt={'Potencia nominal, (kW)','Tension nominal, (V)','frecuencia nominal (Hz)','# pares de polos (p)'};
dlgTitle=['Datos nominales'];
def={'850','690','60','2'};
lineNo=1;
ent0=inputdlg(prompt,dlgTitle,lineNo,def);
Pn =str2double(ent0{1});Un =str2double(ent0{2});f=str2double(ent0{3});p=str2double(ent0{4});
prompt={'R1, (ohms)','R2 ref, (ohms)','X1, (ohms)','X2 ref, (ohms)','Rm, (ohms)','Xm, (ohms)'};
dlgTitle=['Parametros del circuito equivalente'];
def={'0.2268','0.12528','0.51252','0.76878','185.1','9.8554'};
lineNo=1;
ent=inputdlg(prompt,dlgTitle,lineNo,def);
R1 =str2double(ent{1});R2pr =str2double(ent{2});X1=str2double(ent{3});X2pr=str2double(ent{4});
Rm=str2double(ent{5});Xm=str2double(ent{6});
Prompt ={'Tension de desconexion, (U1), (% de Un)','Potencia de salida, (Psal [0 hasta 1.25Pn])'};
dlgTitle =['Condiciones de la desconexion'];
def={'0.9','0.8'};
lineNo=1;
ent1=inputdlg(prompt,dlgTitle,lineNo,def);
Udesc =str2double(ent1{1});Pdesc =str2double(ent1{2});
```

## ANEXO VI: CODIGOS (INSTRUCCIONES) DE LOS PROGRAMAS SIMULADOS

---

```
wn=2*pi*f;wt=wn*t;
U1=Udesc*(Un/sqrt(3)).*exp(j*(wt));
Psal=Pdesc*Pn ;
s = (0.0053*log(Psal)-0.0268);% deslizamiento
Ws=(2*pi*f)/p ;%velocidad sincronica de la maquina
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Pem=abs(3*(U1.^2)*(R2pr/s))/((R1+(R2pr/s))^2+(X1+X2pr)^2) ;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
pcob2=abs(s*Pem) ;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Determination de la corriente en el rotor %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Zm=(Rm*j*Xm)/(Rm+j*Xm);
Z1=R1+j*Xm;
Z2elect=R2pr/s+j*X2pr;
I2=U1.*(Zm/(Z1+Zm+Zm*Z2elect+Z1*Z2elect));;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Determination de la f.e.m E2 %%%%%%%%%
Rmec=R2pr*((1-s)/s);
E2=Z2elect*I2+Rmec*I2;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
determination de la corriente del estator %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
I1= U1.*(Zm+Z2elect/(Z1*Zm+Zm*Z2elect+Z1*Z2elect)) ;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
CONDICIONES INICIALES DE LA FALLA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
L11=(Xm+X1)/Ws;
L22=(Xm+X2pr)/Ws;
L12=Xm/Ws;
Lpr=L11-(L12^2/L22);
Xpr=Ws*Lpr;
T0=(L22/R2pr);
T=T0*(Lpr/L11);
```



## ANEXO VI: CODIGOS (INSTRUCCIONES) DE LOS PROGRAMAS SIMULADOS

---

```
R1=r1/Zbase;%Rbase;
X1=x1/Zbase;%Xbase;
R2pr=r2pr/Zbase;%Rbase;
X2=x2pr/Zbase;%Xbase;
Wbase=wn;
Ws=(wn/p);    %velocidad sincronica de la maquina
L1=(X1/wn);L2=(X2/wn);
Xm=xm/Zbase;%Xbase;
Lm=(Xm/wn); %reactancia magnetica e inductancia mutua de la maquina
%%%%%%%%%%%%%% coeficientes de acoplamientos %%%%%%%%%%%%%%%
k1=Lm/L1/Wbase;    %%coeficiente de acoplamiento del estator, valor en pu
k2=Lm/L2/Wbase;    %%coeficiente de acoplamiento del rotor
k=k1*k2/Wbase;    %%coeficiente de acoplamiento resultante
%%%%%%%%%%%%%% coeficientes de dispersión %%%%%%%%%%%%%%%
sigma1=1-k1;sigma2=1-k2;sigma=1-k;
%%%%%%%%%%%%%% Condiciones iniciales para el cálculo del proceso transitorio%%%%%%%%%%%%%%
if t==0;
    U1m=0;
else
    U1m=Un/sqrt(3)/Ubase;%%%%%%%%U1m=1
end
% U1m=U1/sqrt(3);% en t=0+
U1=U1m;
I1inic=0;% initial stator current
I2inic=0 ;%initial rotor current

L1pr=sigma*L1;L2pr=sigma*L2; % inductancias transitorias
```

## ANEXO VI: CODIGOS (INSTRUCCIONES) DE LOS PROGRAMAS SIMULADOS

---

```
%L1pr=L1-Lm^2/L2;
%%% deslizamientos criticos%%%
sk1=(R1/(Ws*L1pr))/Wbase;sk2=R2pr/(Ws*L2pr)/Wbase;sk=0.5*(sk1+sk2);

T1pr=L1pr/R1;T2pr=L2pr/R2pr; % constantes de tiempo

w=(1-s)*Ws;%velocidad del rotor
%%%%%%%%%%%%%% Caso para una velocidad angular cercana a la sincrónica%%%%%%%%%%%%%%
k21aper=j*k1*sk2*Ws/w; k12per=-j*k2*sk1*Ws/w;
%%%%%%%%%%%%%%corrientes estables%%%%%%%%%%%%%%
ce1=sigma*sk2+j*s; ce2=j*Ws*L1pr; ce3=sk2+s*sk1; ce4=j*(s-sigma*sk1*sk2);
ce5=j*Ws*L2pr; ce6=-k1*j*s;
I1est=U1.*ce1/(ce2*(ce3+ce4));
I2est=U1.*ce6/(ce5*(ce3+ce4));
%I1est=(U1.*(sigma*sk2+j*s))/(j*Ws*L1pr*((sk2+s*sk1)+j*(s-sigma*sk1*sk2)));
%I2est=(U1.*-k1*j*s)/(j*Ws*L2pr*((sk2+s*sk1)+j*(s-sigma*sk1*sk2)));
%%%%%%%%%%%%%% componentes libres %%%%%%%%%%%%%%%
cl1=1-k2*k21aper; cl2=sigma*(k12per*k21aper-1); cl3=1-k1*k12per; cl4=I1est-I1inic; cl5=(k1/k2)*(k2-k12per);
cl6=I2est-I2inic; cl7=k12per-k2; cl8=k1-k21aper; cl9=(k1/k2)*(1-k2*k21aper);cl10=k2*(k21aper-k1);
cl11=k1*(1-k2*k21aper); cl12=k2*(1-k1*k12per);cl13=k1*(k12per-k2);
I1aper=(cl1/cl2)*(cl3*cl4+cl5*cl6);
I1per=(cl7/cl2)*(cl8*cl4+cl9*cl6);
I2aper=I1aper*(cl10/cl11);
I2per=I1per*(cl12/cl13);
%%raíces de la ecuación característica, para una velocidad angular cercana a la sincrónica%%
cp1=sk*Ws; cp2=0.5*Ws; cp3=4*(1-sigma)*sk*sk; cp4=w^2*Ws^-2;
cd1=0.5*w;
```

## ANEXO VI: CODIGOS (INSTRUCCIONES) DE LOS PROGRAMAS SIMULADOS

---

```
Paperalfa=-cp1-cp2*sqrt(cp3-cp4);%=Taper^-1
Pperalfa=-cp1+cp2*sqrt(cp3-cp4);%=Tper^-1
Paperbeta=cd1-cp2*sqrt(cp4-cp3);
Pperbeta=cd1+cp2*sqrt(cp4-cp3);
Paperalfa0=Paperalfa;
Pperalfa0=Pperalfa;
Paperbeta0=Paperbeta-Ws;
Pperbeta0=Pperbeta-Ws;
Paper0=Paperalfa0+j*Paperbeta0;
Pper0=Pperalfa0+j*Pperbeta0;
Paper=Paperalfa+j*Paperbeta;
Pper=Pperalfa+j*Pperbeta;

%%%%%%%%%%%% Visualización %%%%%%%%%%%%%%
for k=1:npts
    I1(k)=I1est+I1aper*exp(Paper*t(k))+I1per*exp(Pper*t(k));
    I2(k)=I2est+I2aper*exp(Paper*t(k))+I2per*exp(Pper*t(k));
end
    I11=abs(I1);
    I22=abs(I2);
figure(1)
plot(t,I11);grid;
xlabel('tiempo [s]');
ylabel('Corriente del estator [pu]');
title('Oscilograma de la corriente del estator para la conexion');
figure(2)
plot(t,I22);grid;
```

```
xlabel('tiempo [s]');  
ylabel('Corriente del rotor [pu]');  
title('Oscilograma de la corriente del rotor para la conexion');  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% FIN DEL PROGRAMA %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```