

**Universidad de Costa Rica  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Eléctrica**

**IE0409 Análisis de Sistemas**

**Simulación y análisis de un modelo de aerogenerador de  
inducción y uno sincrónico**

**por**

**Belinda Brown Ramírez, carné B61254  
Pablo Gómez Acuña, carné B73201  
Roberto Sánchez Cárdenas, carné B77059**

**II-2019**

## **Resumen**

Este documento presenta el estudio de aerogeneradores, se habla de la historia de los mismos y se estudian dos modelos matemáticos de aerogeneradores propuestos por Ugalde-Loo, Ekanayake y Jenkins 2013, el análisis se orienta en modelos que se ajustan a las dimensiones, parámetros y características de control del sistema, para ello se dividió la simulación en dos partes: se utilizó Matlab para simular los modelos en variables de estado provistos por los autores. Los resultados obtenidos en las simulaciones son diferentes a los obtenidos por los autores en el paper utilizado, sin embargo esto se debe a la diferencia entre los experimentos realizados. Se logró obtener las simulaciones de las corrientes por el rotor y estator de dos diferentes modelos, a esos se les realizó un profundo análisis en el que se pudo ver que las gráficas mantienen cierta estabilidad y en algunos casos mantienen patrones.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>5</b>
1.1. Objetivos . . . . .	5
1.1.1. Objetivos específicos . . . . .	5
1.1.2. Metodología . . . . .	6
<b>2. Marco teórico</b>	<b>7</b>
2.1. Historia del uso de energía eólica y los aerogeneradores . . . . .	7
2.2. Actualidad . . . . .	9
2.3. Construcción y funcionamiento . . . . .	10
<b>3. Modelado y simulación</b>	<b>14</b>
3.1. Modelos elegidos . . . . .	14
3.1.1. Nomenclatura . . . . .	14
3.1.2. Aerogenerador de inducción . . . . .	15
3.1.3. Aerogenerador sincrónico . . . . .	25
<b>4. Análisis</b>	<b>37</b>
4.1. Aerogenerador de inducción . . . . .	37
4.1.1. Red débil: $V_{ASC} = 16$ MVA . . . . .	38
4.1.2. Red fuerte: $V_{ASC} = 40$ MVA . . . . .	38
4.1.3. Diagrama de Bode . . . . .	39
4.2. Aerogenerador de sincrónico . . . . .	40
4.2.1. Red débil: $V_{ASC} = 16$ MVA . . . . .	40
4.2.2. Red fuerte: $V_{ASC} = 40$ MVA . . . . .	40
<b>5. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>42</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	42
5.2. Recomendaciones . . . . .	42

# Índice de figuras

2.1. Aerogenerador de corriente directa. Texas, años 70. (Nelson 2009) . . . . .	8
2.2. Crecimiento de la capacidad de generación eólica. (Nelson 2009) . . . . .	8
2.3. Distribución de velocidad del viento en un año y de la probabilidad de Weibull a las mismas. (López 2012) . . . . .	9
2.4. Configuración de una turbina eólica montada sobre su eje vertical (Tong 2010) . . . . .	10
2.5. Generadores eólicos verticales (Tong 2010) . . . . .	12
3.1. Resultados de la simulación del aerogenerador de inducción caso débil A . . . . .	20
3.2. Resultados de la simulación del aerogenerador de inducción caso débil B . . . . .	21
3.3. Resultados de la simulación del aerogenerador de inducción caso débil C . . . . .	22
3.4. Resultados de la simulación del aerogenerador de inducción caso fuerte A . . . . .	23
3.5. Resultados de la simulación del aerogenerador de inducción caso fuerte B . . . . .	24
3.6. Resultados de la simulación del aerogenerador de inducción caso fuerte C . . . . .	25
3.7. Resultados de la simulación del aerogenerador de sincrónico caso débil A . . . . .	31
3.8. Resultados de la simulación del aerogenerador de sincrónico caso débil B . . . . .	32
3.9. Resultados de la simulación del aerogenerador de sincrónico caso débil C . . . . .	33
3.10. Resultados de la simulación del aerogenerador de sincrónico caso fuerte A . . . . .	34
3.11. Resultados de la simulación del aerogenerador de sincrónico caso fuerte B . . . . .	35
3.12. Resultados de la simulación del aerogenerador de sincrónico caso fuerte C . . . . .	36
4.1. Resultado del diagrama de Bode para el primer caso de 16MVA para el aerogenerador de inducción . . . . .	39

# Índice de cuadros

3.1.	Tabla con la nomenclatura utilizada . . . . .	15
3.2.	Tabla de variables de red débil $V_{ASC}$ (short circuit level) = 16MVA . . . . .	19
3.3.	Tabla de variables de red fuerte $V_{ASC}$ (short circuit level) = 40MVA . . . . .	19
3.4.	Tabla de variables de red débil $V_{ASC}$ (short circuit level) = 16MVA . . . . .	30
3.5.	Tabla de variables de red fuerte $V_{ASC}$ (short circuit level) = 40MVA . . . . .	30
4.1.	Valor final de la corriente del estator en eje d para diferentes velocidades de rotor para red débil . . . . .	40
4.2.	Valor pico y final de corriente del estator en eje q para diferentes velocidades de rotor para red débil . . . . .	40
4.3.	Valor final de la corriente del estator en eje d para diferentes velocidades de rotor para red fuerte . . . . .	41
4.4.	Valor pico y final de corriente del estator en eje q para diferentes velocidades de rotor para red fuerte . . . . .	41

# Capítulo 1

## Introducción

En la actualidad se encuentra presente un continuo avance en la tecnología de sistemas de energía. La creación e implementación de aerogeneradores requiere de un debido análisis para obtener el correcto funcionamiento de los mismos, gracias a esto se consideran variables como flujo de potencia, tensiones y estabilidad transitoria también se consideran relaciones diversas entre campo eólico y sistemas eléctricos. Es una consideración la presencia de diferentes modelados de estos sistemas, como lo son modelos de análisis generales y en contraparte los detallados. Estos son últimos se enfocan en analizar el proceso intermedio para determinar la salida siendo el cómo sucede la obtención de la salida una parte fundamental y en modelos generales el estudio se centra en la relación existente entre la entrada y salida, entre otros aspectos.(IEC s.f.)

Dado las condiciones de estudio, se considera la posibilidad de necesitar varias simulaciones con diferentes aproximaciones en la metodología. Contemplando características de estabilidad del sistema se realiza un análisis tanto en pequeña señal como el comportamiento a gran escala puesto que los aerogeneradores funcionan con respecto a la velocidad del viento lo que requiere un estudio de variabilidad como de interrelación. (NERC s.f.) Asimismo, se requiere de modelos de flujo de energía que contemple el estado estable, consideren el cortocircuito y los modelos dinámicos. Finalmente, se consideran las herramientas de Matlab con el fin de simular el comportamiento mediante un modelo matemático desarrollado a partir de variables de estado con la intención de visualizar la conducta del sistema bajo el efecto de condiciones variables de viento.

### 1.1. Objetivos

Implementar las capacidades de representar los aerogeneradores mediante modelos de análisis y simulación.

#### 1.1.1. Objetivos específicos

- Estudiar por medio de fundamentos físicos y matemáticos el modelo del autogenerador.
- Determinar la respuesta del sistema lineal en la frecuencia y en el dominio del tiempo junto con sus características correspondientes haciendo uso de modelos.

- Visualizar el comportamiento de los aerogeneradores por medio de herramientas: MATLAB y Simulink.

### **1.1.2. Metodología**

Para un correcto desarrollo del proyecto se tomó la decisión de seguir una serie de pasos para llevar un orden y lograr tanto un buen desempeño como buenos resultados.

1. Revisión de artículos sobre el modelado y simulación de aerogeneradores con sus respectivos modelos en variables de estado, idealmente lineal, en la plataforma IEEE Xplore.
2. Evaluar la viabilidad del proyecto con respecto a los modelos de aerogeneradores encontrados, para no tener inconvenientes a la hora de la simulación.
3. Realizar una investigación sobre el tema para lograr un mejor entendimiento del mismo.
4. Utilización de Matlab para lograr una buena simulación con resultados correctos.
5. Análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas en Matlab.

## Capítulo 2

# Marco teórico

### 2.1. Historia del uso de energía eólica y los aerogeneradores

El viento es una de las formas más antiguas de las cuales los seres humanos han obtenido energía y han logrado transformarla, se tiene registros de que esta fue utilizada en época tan antiguas como 5000 años ac, cuando se solía utilizar botes de velas para moverse a lo largo del río Nilo. Para los años 200 ac, en China se utilizaban bombas de agua que funcionaban con la energía del viento y en el Medio Este era utilizada para mover aspas que trituraban granos. (EIA 2019)

Durante siglos, la energía eólica fue una de las más utilizadas, en gran parte esto se debió a la disponibilidad del recurso eólico. Entre 1850 y 1970, más de 6 millones de máquinas mecánicas movidas por viento eran utilizadas en los Estados Unidos para llevar agua para el ganado y los hogares, estas solían poseer una capacidad de hasta un caballo de fuerza (Nersesian 2010). Sus aplicaciones han ido evolucionando con el paso del tiempo, en épocas antiguas se aprovechaba la energía cinética del viento simplemente para mover partes mecánicas, mientras que en épocas modernas se ha logrado convertir esta energía cinética a energía mecánica para generar electricidad.

El primero molino de viento capaz de generar electricidad fue construido por Charles F. Brush en 1888, en Cleveland, Ohio. Este tenía aspas con un diámetro de 17 metros y una cola cuya función era posicionar el molino frente al viento. Este estaba conectado a un dispositivo capaz de transformar la energía mecánica en electricidad en forma de corriente directa. Sin embargo, no fue hasta 1891 que se logró mejorar el diseño de este tipo de molino, cuando Poul La Cour logró generar 25 kW con un molino de 4 aspas. El uso de este tipo de generadores se comenzó a expandir principalmente a las zonas rurales, donde no llegaba el tendido eléctrico. (Nersesian 2010)

Durante el siglo XX, los generadores eólicos utilizados no estaban conectados a la red eléctrica, estos se utilizaban principalmente en hogares y granjas para cargar baterías, iluminación eléctrica, radios, entre otros.





Figura 2.1: Aerogenerador de corriente directa. Texas, años 70. (Nelson 2009)

El uso de generadores eólicos comenzó a decaer posterior a la Primera Guerra Mundial, esto se debió a que los precios de los combustibles fósiles comenzó a caer y su popularidad aumentó. Otro factor fue la Gran Depresión del 29, cuando los gobiernos comenzaron a expandir el tendido eléctrico a las zonas rurales con el fin de reactivar la economía. A pesar de esto, los avances en generación eólica no terminaron aquí. (Nersesian 2010)

En 1931 se construyó en Rusia una turbina eólica capaz de generar 100 kW. Esta constaba con un rotor de 30m de diámetro colocado sobre una torre de de 30m de altura. Se dice que podría generar hasta 280,000 kWh/año. (Nelson 2009)

Uno de los proyectos más exitosos fue realizado en Dinamarca, donde en 1942 se logró construir turbinas con aspas de 13,5m de diámetro capaz de generar corriente directa y una potencia de 45kW. En 1952 se logró rediseñar para entregar corriente alterna. (Nelson 2009)

En 1982 se comenzó a construir granjas eólicas en California, capaces de ser conectadas a la red eléctrica. En la siguiente figura se muestra una gráfica con el crecimiento en capacidad de generación entre 1983-2007. (Nelson 2009) En ella se puede observar cómo el crecimiento se dio principalmente en Estados Unidos y Europa.

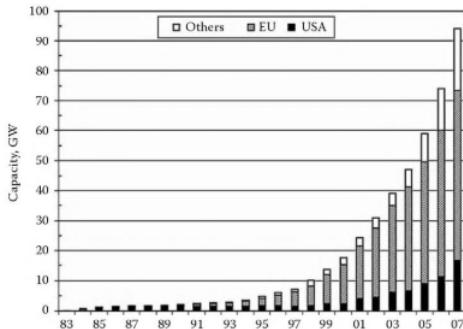


Figura 2.2: Crecimiento de la capacidad de generación eólica. (Nelson 2009)

## 2.2. Actualidad

Los avances en la tecnología logrados en el último siglo han mejorado en gran medida la capacidad de extraer energía de medios renovables, actualmente las turbinas eólicas son capaces de generar gran capacidad de energía. Una turbina pequeña puede llegar a generar hasta 100 kW, mientras que las más grandes son capaces de generar hasta 10 MW.

Ha sido estimado que los avances realizados en las dinámicas de las estructuras así como en la aerodinámica del sistema y la mayor investigación en micro-meteorología para poder determinar que zonas tienen mayor potencial energético a ayudado a aumentar hasta a un 5 % anual el incremento de la energía proporcionada por los generadores eólicos.

Se ha optado por contruir granjas eólicas en los océanos debido a la riqueza en recurso eólico que hay en estas zonas, se ha visto que estas operan más horas al año que las instaladas en tierra firme.(Tong 2010)

Esta riqueza del recursos eólico presente en las zonas costeras se da gracias a la densidad de aire presente en estas zonas. El conocimiento de las proporciones de densidad y velocidad del aire permite calcular el potencial energético que puede presentar el aerogenerador además del la energía anual que puede llegar a producir.

Para conocer el potencial energético de generadores eólicos a través de las características del aire se utiliza la formula de probabilidad de Weibull:

$$p_v = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.1)$$

En donde:

- v: velocidad del viento (m/s).
- c: valor aproximado a la velocidad anual (m/s).
- k: factor de forma y simetría que caracteriza la estructura.
- p(v): factor de probabilidad de Weibull.

Generalmente la distribución de probabilidad de la velocidad del viento y el interés energético se conoce con la ecuación 2.1.(López 2012)

En la figura 2.3 se puede observar la gráfica de la probabilidad del potencial energético en contra de la velocidad del viento.

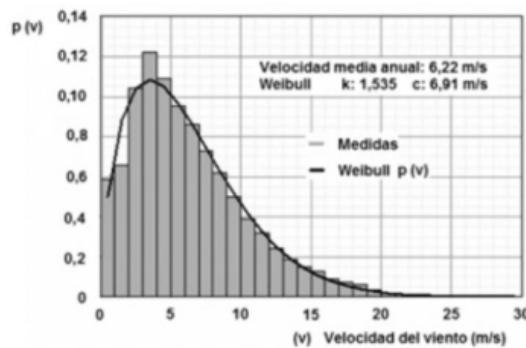


Figura 2.3: Distribución de velocidad del viento en un año y de la probabilidad de Weibull a las mismas. (López 2012)

## 2.3. Construcción y funcionamiento

La energía eólica es una derivación de la energía cinética procedente del aire.

La gran mayoría de turbinas eólicas utilizan una configuración montada sobre su eje horizontal con tres aspas. Estas son montadas en una torre de gran altura que permite que las aspas no colisionen con otro objeto. Las principales partes de una turbina y su configuración se muestran en la Figura 2.4.

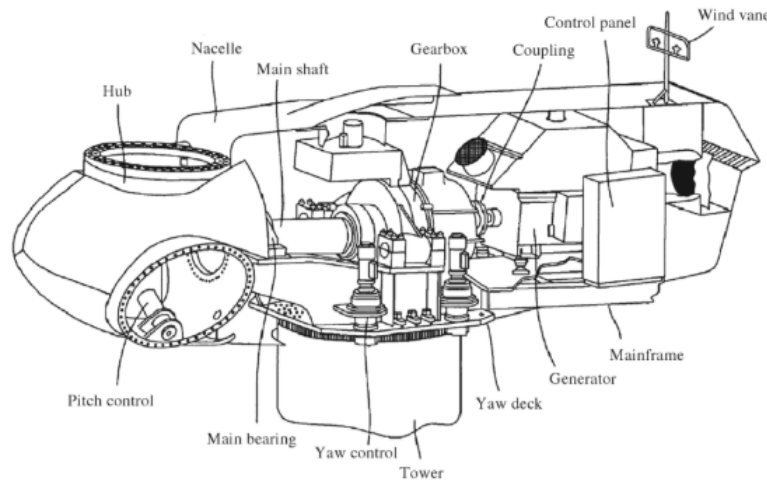


Figura 2.4: Configuración de una turbina eólica montada sobre su eje vertical (Tong 2010)

Cuando las aspas giran, estas activan el lazo de control (Pitch control), cuya función es brindar información de la velocidad de viento y rotación de las aspas. Simultáneamente comienza a girar el eje principal (Main Shaft) y los engranajes (Gearbox), haciendo llegar energía mecánica al generador. El generador es el dispositivo encargado de transformar la energía mecánica en electricidad. La veleta de viento indica la dirección del viento y envía esta información al panel de control. Con la información obtenida del lazo de control y la veleta, el panel de control es capaz de rotar la turbina de manera que se aproveche el viento de mejor manera, este también es el encargado de controlar la velocidad máxima a la que pueden rotar las aspas sin dañarse. (Tong 2010)

Los distintos aerogeneradores se pueden clasificar por diferentes características como la configuración del generador de la turbina o el flujo de aire hacia las aspas del aerogenerador, así como la capacidad del generador entre otras cualidad de las cuales se especifican sus funciones.

- **Por su orientación:** La orientación, de las aspas, más común es la horizontal ya que presenta una mayor eficiencia en el uso de las turbinas al aprovechar más la energía potencial de la caída del aspa así como la energía cinética del aire. Por otro lado los aerogeneradores con el eje de rotación perpendicular al suelo, tienen una menor eficiencia en la creación de energía pero su ventaja es la de poder utilizar el viento en cualquier dirección. Este tipo de generadores eólicos se pueden ver en la imagen 2.5.
- **Por la capacidad del generador:** Las turbinas generadoras de energía se pueden llegar a clasificar como: micro, pequeñas, medianas, largas y muy largas, en donde se define como micro turbina a

aquella que generen menos a unos cuantos kilowatts. Por otro lado las turbinas que presentan una generación menor a los 100kW son definidas como pequeñas, y estas son utilizadas generalmente en aplicaciones individuales como residencias o granjas.

Los generadores más comunes son los que tienen un rango de 100kW a 1MW y son los considerados de turbinas medianas. Contiguas a estas las turbinas largas llegan a tener un rango de 1 MW a 10MW y recientemente son las de más fabricación para generación masiva de energía.

Las turbinas extra largas que tienen una generación de energía mayor a los 10MW, las cuales se investiga en que campo tendrían una mayor eficiencia gracias a su gran costo de fabricación.

- **Control directo u orientado:** El control orientado permite, gracias a una caja de cambios conectada a la turbina, dependiendo del aire presente en el momento ayuda a siempre mantener una rotación rápida en el generador. El control orientado de un generador se utiliza generalmente en generadores más pequeños ya que este sistema ayuda a bajar los costos, el peso y el tamaño de las estructuras. Por otro lado el control directo elimina la caja de cambios y conecta las aspas directamente al generador, por lo que la eficiencia, y la simplicidad del diseño aumentan. Estas son usadas en estructuras muy grandes. (Tong 2010)

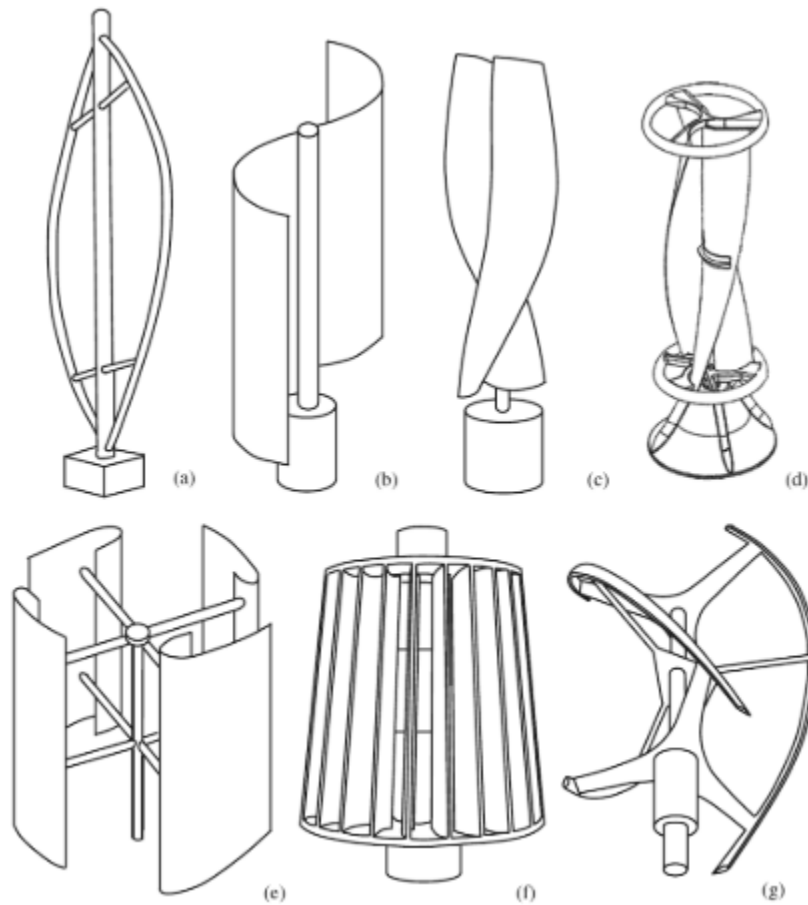


Figura 2.5: Generadores eólicos verticales (Tong 2010)

Como una de las partes más importantes de su funcionamiento estaba la potencia consumida por el sistema.

El coeficiente de eficiencia de la potencia generada por el sistema se plantea en dos etapas de las cuales la energía del viento termina como energía eléctrica. La primera etapa consiste en la conversión de la energía cinética del viento en energía mecánica. La principal estructura de la primera etapa son las aspas las cuales son las encargadas de transmitir al generador la energía mecánica obtenida del viento. Generalmente la eficiencia de esta etapa ronda el rango de 30 al 45 por ciento.

Por otro lado la segunda etapa es donde en el aerogenerador la energía mecánica obtenida es convertida en energía eléctrica. La eficiencia de esta etapa se ve por distintas características del sistema:

- **La eficiencia de la caja de cambios:** Esta eficiencia depende de la fricción que llegan a tener los dientes de engranaje además del rodamiento de los mismos.
- **La eficiencia del aerogenerador:** Este está enlazado a pérdidas eléctricas y mecánicas como los cables utilizados y la fricción.

- **La eficiencia eléctrica:** Esta se enlaza a la conversión, los interruptores, los controles y los cables.

La eficiencia en su segunda etapa se puede observar mediante la ecuación:

$$\eta_T = \eta_{gear}\eta_{gen}\eta_{ele} \quad (2.2)$$

En donde se toman los distintos coeficientes de eficiencia y se multiplican a la eficiencia de la primera etapa.

## Capítulo 3

# Modelado y simulación

### 3.1. Modelos elegidos

Para este proyecto se siguieron los lineamientos estipulados por el profesor del curso de Análisis de Sistemas: Jose David Rojas. Entre ellos se pedía buscar un modelo previamente diseñado, con el fin de familiarizar al estudiantado con diferentes softwares de modelado y simulación. El software elegido fue Matlab, debido al auge que tiene esta herramienta a día de hoy.

Los modelos elegidos fueron creados por los autores Carlos E. Ugalde-Loo, Janaka B. Ekanayake y Nicholas Jenkins y publicados por la IEEE en la revista IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS en el año 2013 como un artículo llamado Modelado en Variables de Estado de Aerogeneradores para el Estudio de Sistemas de Potencia (State-Space Modeling of Wind Turbine Generators for Power System Studies) (Ugalde-Loo, Ekanayake y Jenkins 2013).

Los modelos en variables de estado diseñados modelan generadores eólicos sincrónicos y de inducción, y estos fueron diseñados de manera que este pueda ser utilizado para correr con velocidades de viento variables.

#### 3.1.1. Nomenclatura

A lo largo de este documento se trabajará con la notación mostrada a continuación.

Variable	Significado
$\omega_b, f_b$	Frecuencias base
$\vec{\omega}_s, \vec{\omega}_r, s$	Estator, velocidad angular del rotor y desliz
$\vec{T}_m, \vec{T}_e$	Torque mecánico y electromagnético
H	Inercia constante
Máquina de inducción	
$\vec{i}_{ds}, \vec{i}_{qs}, \vec{i}_{dr}, \vec{i}_{qr}$	Corrientes de estator y rotor
$\vec{e}_d, \vec{e}_q, \vec{v}_{ds}, \vec{v}_{qs}, \vec{v}_{dr}, \vec{v}_{qr}$	Voltajes internos, de estator y rotor
$\vec{R}_s, \vec{R}_r$	Resistencias de estator y rotor
$\vec{X}_{ss}, \vec{X}_{rr}, \vec{X}_m$	Reactancia de estator, rotor y magnetización
Máquina sincrónica	
$\vec{i}_{ds}, \vec{i}_{qs}, \vec{i}_{fd}, \vec{i}_{kd}, \vec{i}_{kq1}, \vec{i}_{kq2}$	Corrientes de estator, campo y embobinado amortiguador
$\vec{R}_s, \vec{R}_{fd}, \vec{R}_{kd}, \vec{R}_{kq1}, \vec{R}_{kq2}$	Resistencias de estator, campo y embobinado amortiguador
$\vec{X}_d, \vec{X}_q, \vec{X}_{fd}, \vec{X}_{kd}, \vec{X}_{kq1}, \vec{X}_{kq2}$	Reactancias de estator, campo y embobinado amortiguador
$\vec{X}_{md}, \vec{X}_{mq}$	Reactancias mutuas

Cuadro 3.1: Tabla con la nomenclatura utilizada

### 3.1.2. Aerogenerador de inducción

Con el fin de realizar un modelado, se requiere del uso de una representación de espacios de estado, los cuales se representan de manera general y se conocen como ecuaciones dinámicas como se muestra en las ecuaciones 1 y 2.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \quad (3.2)$$

Los vectores de estados, entradas y salida se describen en las las ecuaciones 3.3, 3.4 y 3.5.

$$\mathbf{x} = [\vec{i}_{ds}, \vec{i}_{qs}, \vec{i}_{dr}, \vec{i}_{qr}]^T \quad (3.3)$$

$$\mathbf{u} = [\vec{V}_{ds}, \vec{V}_{qs}, \vec{V}_{dr}, \vec{V}_{qr}]^T \quad (3.4)$$

$$\mathbf{y} = [\vec{i}_{dr}, \vec{i}_{qr}]^T \quad (3.5)$$

Por otro lado, las matrices del sistema, control, salida y de avance definidas por 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9. Donde A se conoce como la matriz de estados nxn, B matriz de entrada nxp, C matriz de salida qxn y D matriz de acción de salida qxp.

$$\mathbf{A} = \frac{\omega_b}{\vec{X}_{ss}\vec{X}_{rr}\sigma} \begin{bmatrix} -\vec{R}_s\vec{X}_{rr} & \alpha_1\vec{\omega}_s & -\vec{R}_r\vec{X}_m & -\beta_r\omega_s \\ -\alpha_1\vec{\omega}_s & -\vec{R}_s\vec{X}_{rr} & \beta_r\omega_s & -\vec{R}_r\vec{X}_m \\ -\vec{R}_s\vec{X}_m & \beta_s\omega_s & -\vec{R}_r\vec{X}_{ss} & -\alpha_2\vec{\omega}_s \\ -\beta_s\omega_s & -\vec{R}_s\vec{X}_m & \alpha_2\vec{\omega}_s & -\vec{R}_r\vec{X}_{ss} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$



$$\mathbf{B} = \frac{\omega_b}{\vec{X}_{rr}\vec{X}_{ss}\sigma} \begin{bmatrix} -\vec{X}_{rr} & 0 & \vec{X}_m & 0 \\ 0 & -\vec{X}_{rr} & 0 & \vec{X}_m \\ -\vec{X}_m & 0 & \vec{X}_{ss} & 0 \\ 0 & -\vec{X}_m & 0 & -\vec{X}_{ss} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Donde:

$$\begin{aligned} s &= \frac{\vec{\omega}_s - \vec{\omega}_r}{\vec{\omega}_s} & \alpha_2 &= \vec{X}_m^2 - s\vec{X}_{ss}\vec{X}_{rr} \\ \alpha_1 &= \vec{X}_{ss}\vec{X}_{rr} - s\vec{X}_m^2 & \beta_s &= \vec{X}_m\vec{X}_{ss}(1-s) \\ & & \beta_r &= \vec{X}_m\vec{X}_{rr}(1-s) \\ \alpha_1 &= \vec{X}_{ss}\vec{X}_{rr} - s\vec{X}_m^2 & \sigma &= \frac{1 - \vec{X}_m^2}{\vec{X}_{rr}\vec{X}_s s} \end{aligned}$$

La ecuación del rotor mecánico viene dada por 3.10.

$$\frac{d}{dt}\vec{\omega}_r = \frac{1}{2H}(\vec{T}_m - \vec{T}_e) \quad (3.10)$$

Donde:

$$\vec{T}_e = \vec{X}_m(\vec{i}_{dr}\vec{i}_{ds} - \vec{i}_{qr}\vec{i}_{qs})$$

Con lo que respecta las turbinas de viento se tienen las ecuaciones 3.11 y 3.12.

$$\vec{v}_{dr} = \vec{v}_{qr} = 0 \quad (3.11)$$

$$\vec{\mathbf{u}} = [\vec{v}_{ds} \quad \vec{V}_{qs}]^T \quad (3.12)$$

Entonces sabemos que B de la ecuación 3.7 quedaría como la ecuación 3.13.

$$\mathbf{B} = \frac{\omega_b}{\vec{X}_{ss}\vec{X}_{rr}\sigma} \begin{bmatrix} -\vec{X}_{rr} & 0 & \vec{X}_m & 0 \\ 0 & -\vec{X}_{rr} & 0 & \vec{X}_m \end{bmatrix}^T \quad (3.13)$$

La salida viene dada por la ecuación ??

$$\mathbf{y} = [\vec{i}_{ds} \quad \vec{i}_{qs}]^T \quad (3.14)$$

Entonces C se modifica por:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

## Código de Matlab para la simulación del modelo de aerogenerador de inducción

```
clear; clc; cla
%Constantes que se toman al principio del texto
fb=50; %frecuencia base
wb=2*pi*fb; %frecuencia angular base
Xm=3.95279;
Rs=0.0048; %resistencia del estator
Rr=0.00549; %resistencia del rotor
Tm = 0.8064; %torque mecanico
Xrr=0.02; %reactancia de magnetizacion
Xss=0.09241;

%condiciones
wr=input(" velocidad angular del rotor (wr): ");
%velocidad angular del rotor

s=input(" s : "); %s de cada network
ids=input(" ids : "); %ids de cada caso
iqs=input(" iqs : "); %iqs de cada caso
idr=input(" idr : "); %idr de cada caso
iqr=input(" iqr : "); %iqr de cada caso
a=input(" Vds : "); %Vds de cada caso
b=input(" Vqs : "); %Vqs de cada caso
c=input(" Vdr : "); %Vdr de cada caso
d=input(" Vqr : "); %Vqr de cada caso

%variables dependientes

ws= wr/(s-1); %velocidad angular del estator
alpha1=(Xss*Xrr)-(s*(Xm)^2);
alpha2=Xm^2-s*Xss*Xrr;
Bs=Xm*Xss*(1-s);
Br=Xm*Xrr*(1-s);
o=(1-Xm^2)/(Xss*Xrr);
H=wb/(Xss*Xrr*o);

%matrices
A=H*[-Rs*Xrr, alpha1*ws, -Rr*Xm, -Br*ws; -alpha1*ws, -Rs*Xrr, Br*ws, -Rr*Xm; -Rs*Xm,
Bs*ws, -Rr*Xss, -alpha2*ws; -Bs*ws, -Rs*Xm, alpha2*ws, -Rr*Xss];

B=H*[-Xrr, 0, Xm, 0; 0, -Xrr, 0, Xm; -Xm, 0, Xss, 0; 0, -Xm, 0, Xss];

C=[0, 0, 1, 0; 0, 0, 0, 1];
D=0;
```

```

dt = 0.07;

F=ss(A,B,C,D);
t=0:dt:30;
%las entradas cambian por caso
Vds=(a*(t >=1));
Vqs=(b*(t >=1));
Vdr=(c*(t >=1));
Vqr=(d*(t >=1));

u=[Vds;Vqs;Vdr;Vqr];
lsim(F,u,t)
y=F
%salidas
%idr
y1=y(1,:);
%iqr
y2=y(2,:);

```

Se realizaron pruebas para niveles de red y cada una con 3 diferentes casos como se muestra en la siguiente tabla de condiciones:

Red débil  $V_{ASC}$  (short circuit level) = 16MVA  
 $s = -0,0055$

	Caso A	Caso B	Caso C
$w_r$	0.8	1.1	1.29
$i_{ds}$	-0.035	-0.084	-0.151
$i_{qs}$	0.343	0.649	0.959
$i_{dr}$	0.217	0.166	0.096
$i_{qr}$	0.367	0.693	1.024
$V_{ds}$	-0.06	-0.114	0.1169
$V_{qs}$	0.9983	0.993	0.986
$V_{dr}$	-0.025	0.025	0.105
$V_{qr}$	0.206	-0.097	-0.28

Cuadro 3.2: Tabla de variables de red débil  $V_{ASC}$  (short circuit level) = 16MVA

Red fuerte  $V_{ASC}$  (short circuit level) = 40MVA  
 $s = -0,0055$

	Caso A	Caso B	Caso C
$w_r$	0.8	1.1	1.29
$i_{ds}$	-0.024	-0.055	-0.097
$i_{qs}$	0.35	0.661	0.977
$i_{dr}$	0.229	0.197	0.154
$i_{qr}$	0.367	0.693	1.024
$V_{ds}$	-0.035	-0.066	-0.098
$V_{qs}$	0.999	0.998	0.995
$V_{dr}$	-0.02	0.02	-0.085
$V_{qr}$	0.206	-0.0998	-0.286

Cuadro 3.3: Tabla de variables de red fuerte  $V_{ASC}$  (short circuit level) = 40MVA

### Resultados obtenidos de la simulación del modelo de aerogenerador de inducción

En esta sección de este documento se muestran los resultados que se obtuvieron al correr el código de la sección anterior.

#### 1. Red débil

$$V_{ASC} \text{ (short circuit level)} = 16MVA$$

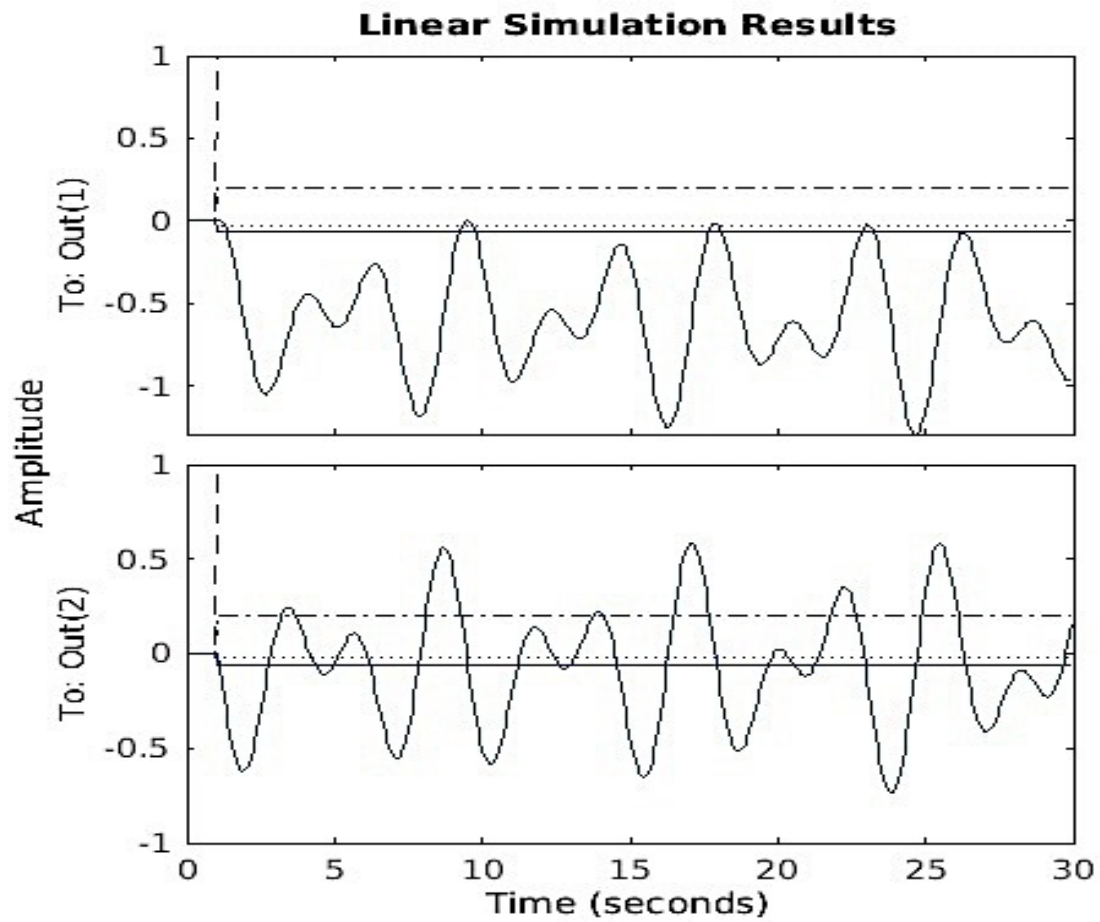


Figura 3.1: Resultados de la simulación del aerogenerador de inducción caso débil A

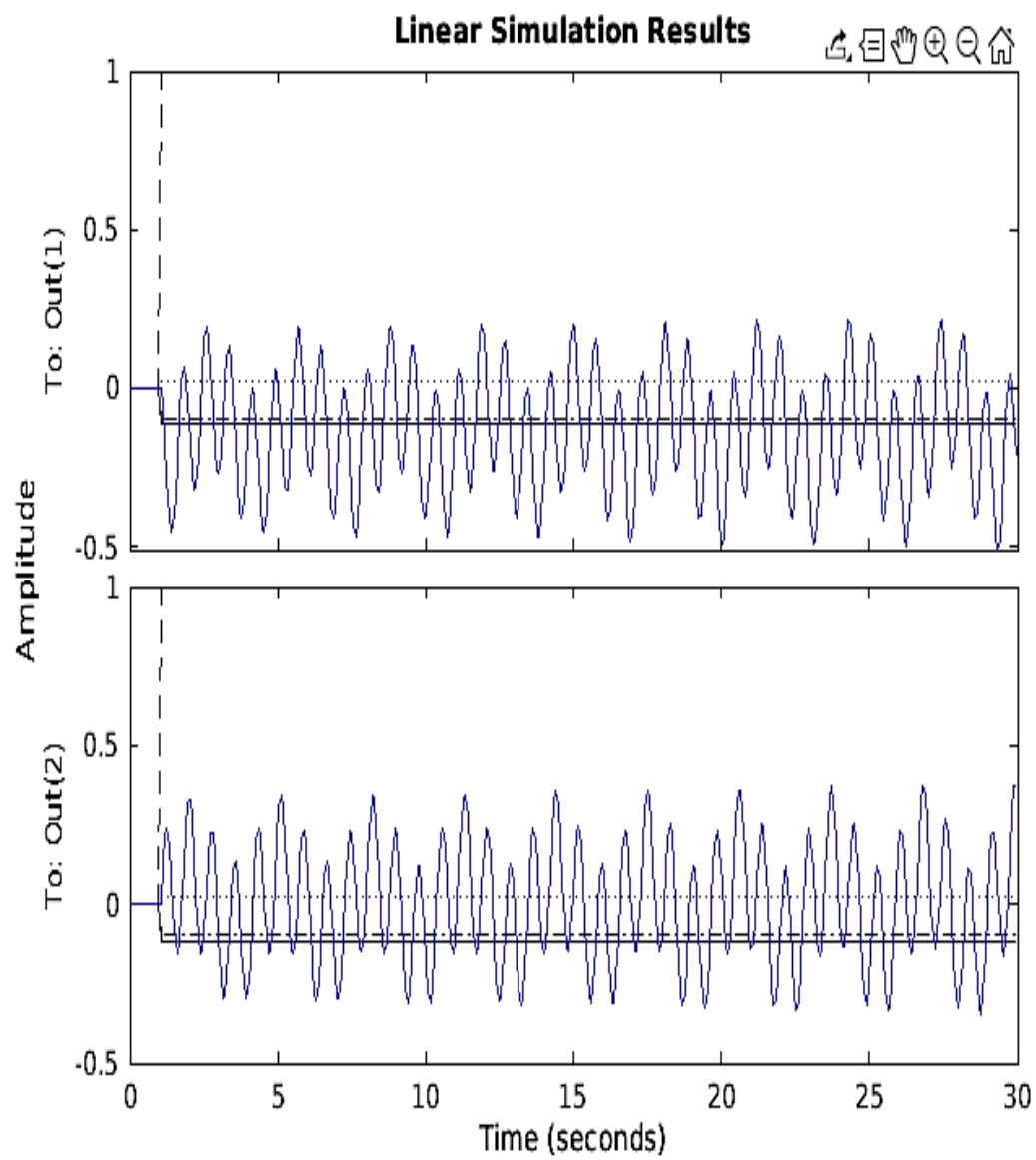


Figura 3.2: Resultados de la simulación del aerogenerador de inducción caso débil B

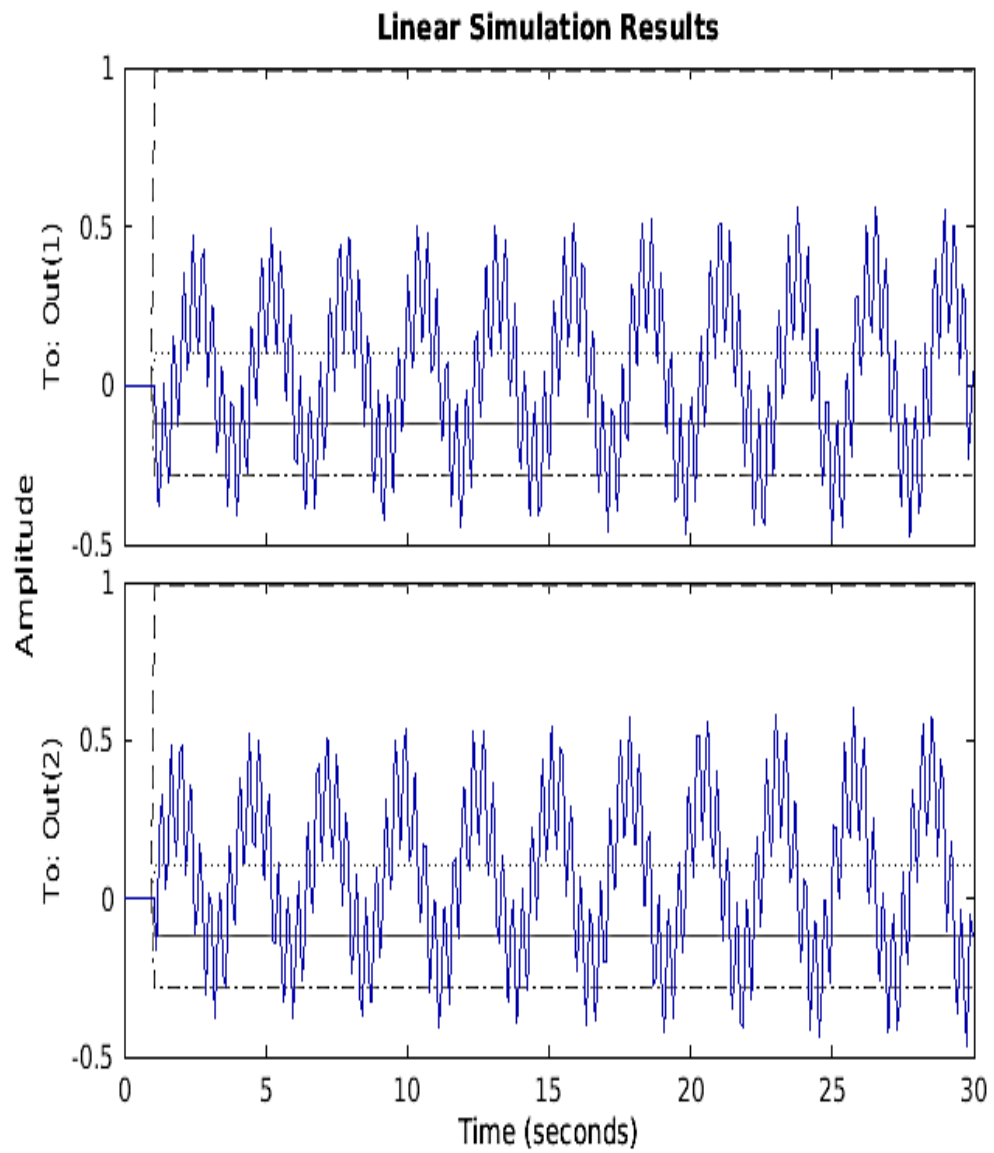


Figura 3.3: Resultados de la simulación del aerogenerador de inducción caso débil C

1. Red fuerte

$V_{ASC}$  (short circuit level) = 40MVA

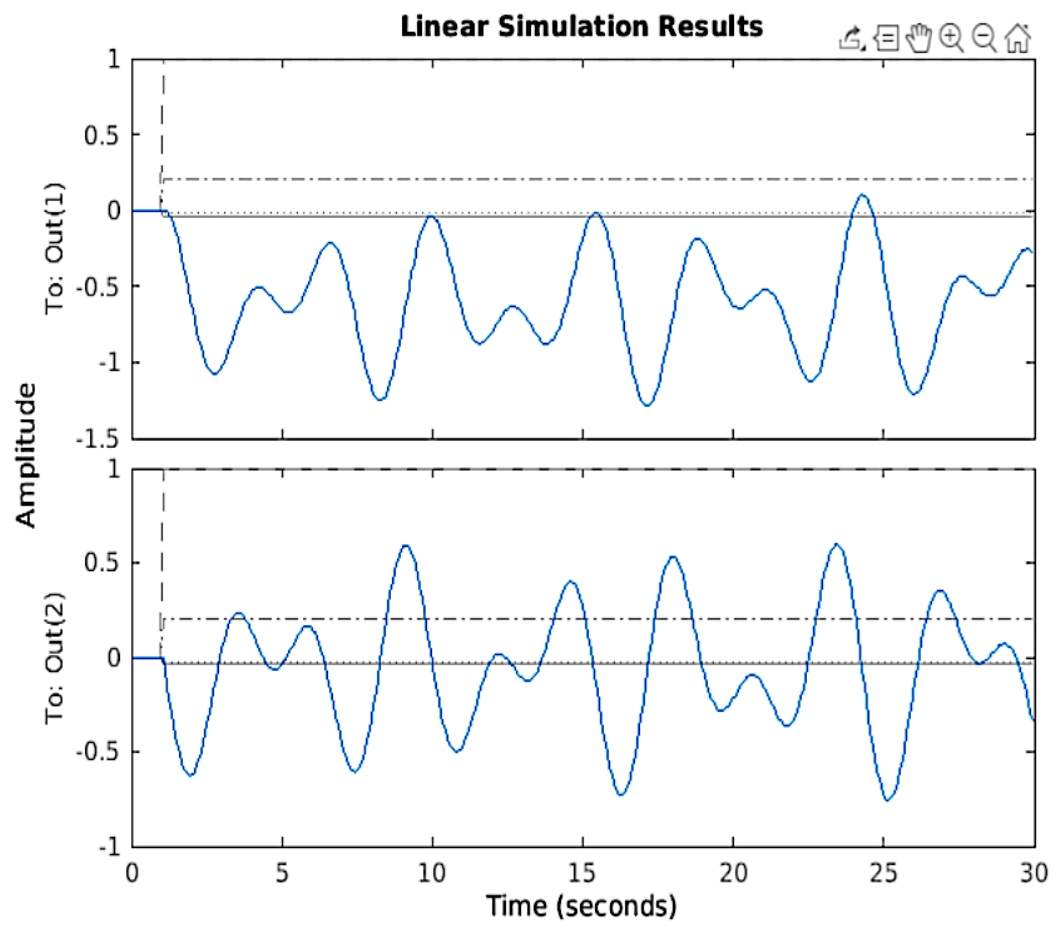


Figura 3.4: Resultados de la simulación del aerogenerador de inducción caso fuerte A



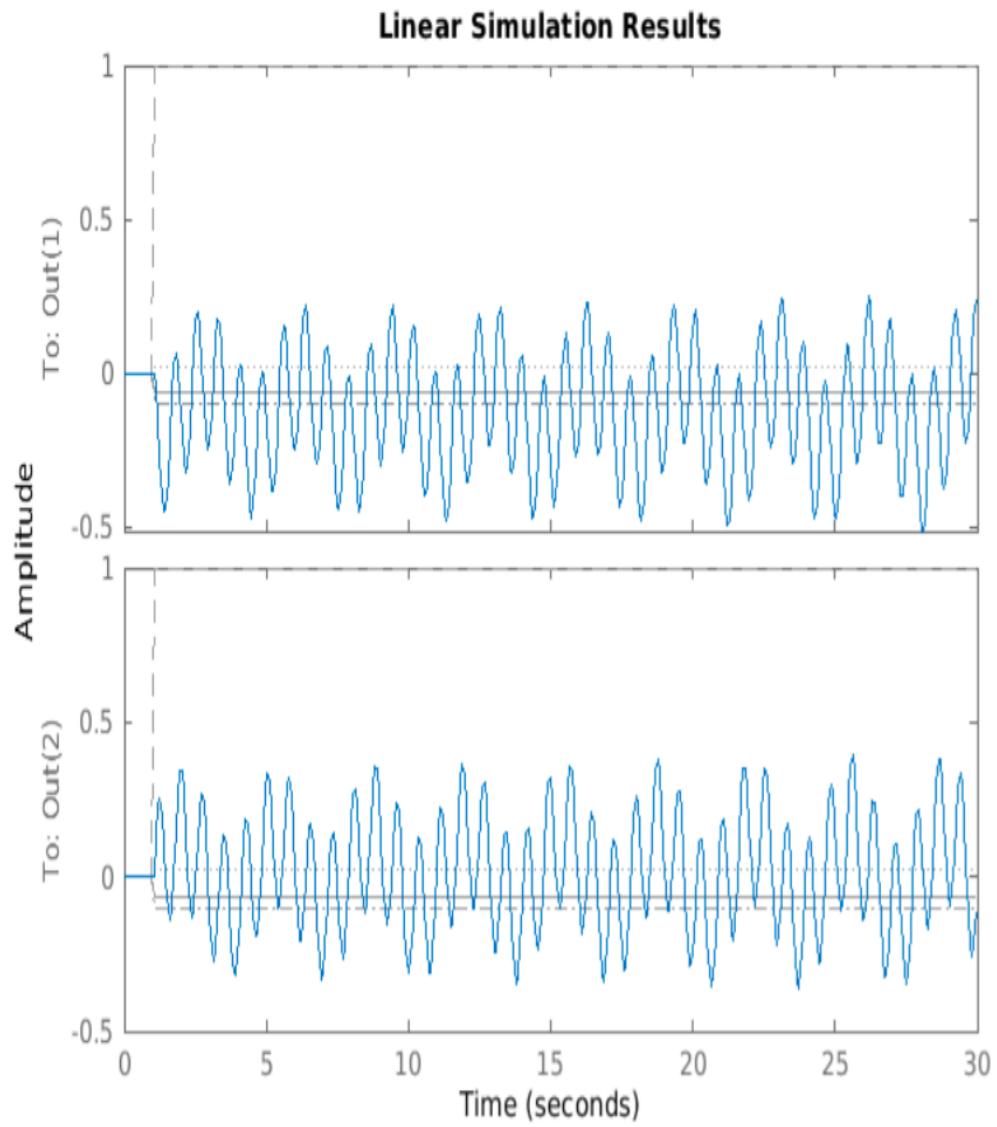


Figura 3.5: Resultados de la simulación del aerogenerador de inducción caso fuerte B

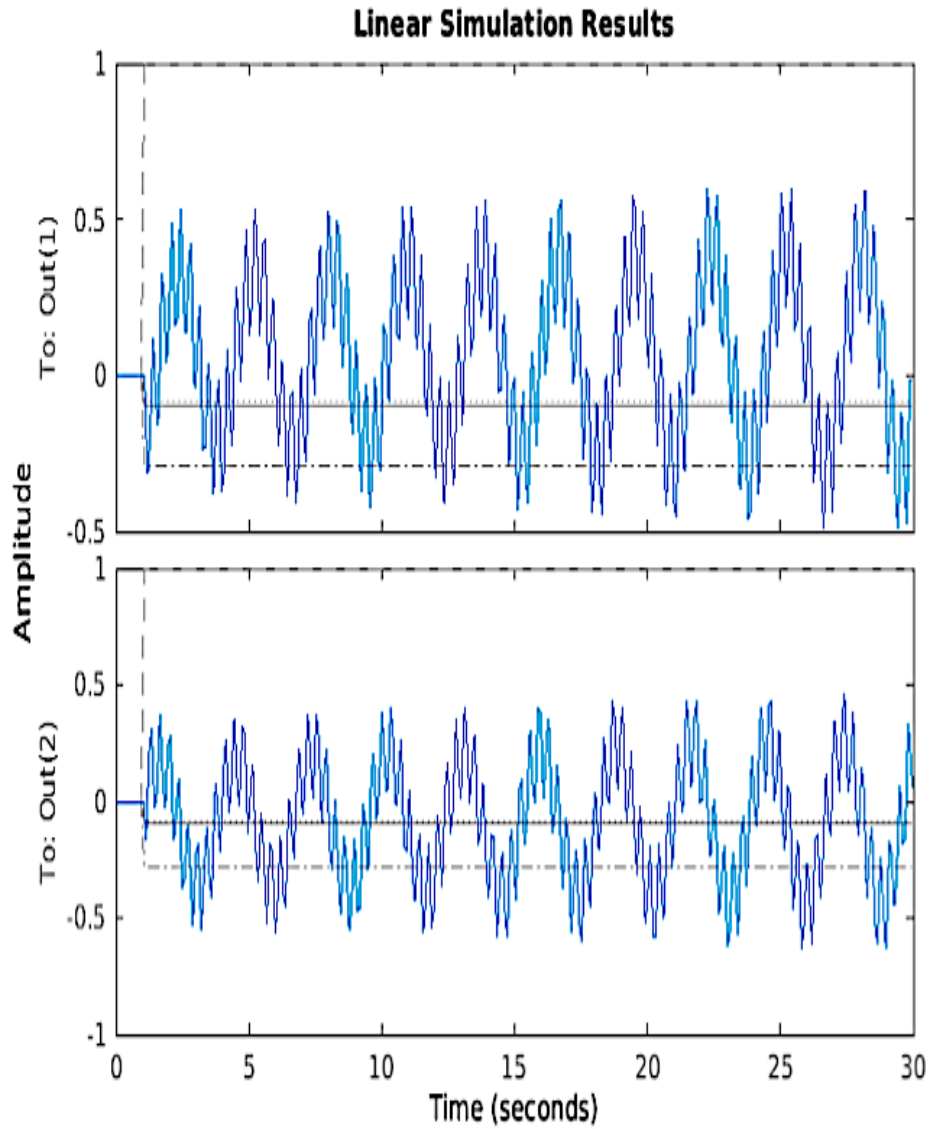


Figura 3.6: Resultados de la simulación del aerogenerador de inducción caso fuerte C

### 3.1.3. Aerogenerador sincrónico

Según el autor del modelo, este presenta un estator y un rotor trasientes. Por su parte, el rotor presenta dos embobinados en sus ejes q y d. La corriente de campo ( $\vec{i}_{fd}$ ) mencionada en la tabla de nomenclatura es utilizada para controlar el campo magnético generado por el rotor. (Ugalde-Loo, Ekanayake y Jenkins

2013)

### Modelo del aerogenerador sincrónico

Para el modelo del aerogenerador sincrónico se tienen los siguientes vectores que indican el estado, entrada y salidas. Estos se definen de la siguiente manera respectivamente:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \vec{i}_{ds} & \vec{i}_{qs} & \vec{i}_{fd} & \vec{i}_{kd} & \vec{i}_{kq1} & \vec{i}_{kq2} \end{bmatrix}^T \quad (3.16)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \vec{v}_{ds} & \vec{v}_{qs} & \vec{v}_{fd} \end{bmatrix}^T \quad (3.17)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \vec{i}_{ds} & \vec{i}_{qs} \end{bmatrix}^T \quad (3.18)$$

Es importante definir algunas variables que completan el modelo en variables de estado. De no definir las de esta manera, las matrices del modelo aumentarían su extensión considerablemente. Estas definiciones se utilizan en el modelo que se define al finalizar esta parte.

$$\vec{X}_{\sigma d} = (\vec{X}_d * \sigma_{1d})^{-1}$$

$$\vec{X}_{\sigma q} = (\vec{X}_q * \sigma_{1q})^{-1}$$

$$\vec{\sigma}_{1d} = \vec{X}_{1d} \vec{X}_{3d} - \vec{X}_{2d}^2$$

$$\vec{\sigma}_{1q} = \vec{X}_{1q} \vec{X}_{3q} - \vec{X}_{2q}^2$$

$$\vec{\sigma}_{2d} = \vec{X}_{fd} \vec{X}_{kd} - \vec{X}_{md}^2$$

$$\vec{\sigma}_{2q} = \vec{X}_{kq1} \vec{X}_{kq2} - \vec{X}_{mq}^2$$

$$\vec{\sigma}_{3d} = \vec{X}_{md} \vec{X}_{kd} - \vec{X}_{md}^2$$

$$\vec{\sigma}_{3q} = \vec{X}_{mq} \vec{X}_{kq2} - \vec{X}_{mq}^2$$

$$\vec{\sigma}_{4d} = \vec{X}_{md} \vec{X}_{fd} - \vec{X}_{md}^2$$

$$\vec{\sigma}_{4q} = \vec{X}_{mq} \vec{X}_{kq1} - \vec{X}_{mq}^2$$

$$\vec{X}_{1d} = \vec{X}_{fd} - \frac{\vec{X}_{md}^2}{\vec{X}_d}$$

$$\vec{X}_{1q} = \vec{X}_{kq1} - \frac{\vec{X}_{mq}^2}{\vec{X}_q}$$

$$\vec{X}_{2d} = \vec{X}_{md} - \frac{\vec{X}_{md}^2}{\vec{X}_d}$$

$$\vec{X}_{2q} = \vec{X}_{md} - \frac{\vec{X}_{mq}^2}{\vec{X}_q}$$

$$\vec{X}_{3d} = \vec{X}_{kd} - \frac{\vec{X}_{md}^2}{\vec{X}_d}$$

$$\vec{X}_{3q} = \vec{X}_{kq2} - \vec{X}_{mq}^2 \vec{X}_q$$

### Modelo en variables de estado del aerogenerador sincrónico

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\omega_b \vec{R}_s \sigma_{2d} \vec{X}_{\sigma d} & \omega_r \vec{X}_q \sigma_{2d} \vec{X}_{\sigma d} & -\omega_b \vec{R}_{fd} \sigma_{3d} \vec{X}_{\sigma d} & -\omega_b \vec{R}_{kd} \sigma_{4d} \vec{X}_{\sigma d} & -\omega_r \vec{X}_{mq} \sigma_{2d} \vec{X}_{\sigma d} & -\omega_r \vec{X}_{mq} \sigma_{2d} \vec{X}_{\sigma d} \\ -\omega_r \vec{L}_{sds} \sigma_{2q} \vec{X}_{\sigma q} & -\omega_b \vec{R}_s \sigma_{2d} \vec{X}_{\sigma q} & \omega_r \vec{X}_{md} \sigma_{2q} \vec{X}_{\sigma q} & \omega_r \vec{X}_{md} \sigma_{2q} \vec{X}_{\sigma q} & -\omega_b \vec{R}_{kq1} \sigma_{3q} \vec{X}_{\sigma q} & -\omega_b \vec{R}_{kq2} \sigma_{4q} \vec{X}_{\sigma q} \\ -\omega_b \vec{R}_s \sigma_{3d} \vec{X}_{\sigma d} & \omega_r \vec{X}_q \sigma_{3d} \vec{X}_{\sigma d} & -\omega_b \vec{R}_{fd} \vec{X}_d \vec{X}_{3d} \vec{X}_{\sigma d} & \omega_b \vec{R}_{kd} \vec{X}_d \vec{X}_{2d} \vec{X}_{\sigma d} & -\omega_r \vec{X}_{mq} \sigma_{3d} \vec{X}_{\sigma d} & -\omega_r \vec{X}_{mq} \sigma_{3d} \vec{X}_{\sigma d} \\ -\omega_b \vec{R}_s \sigma_{4d} \vec{X}_{\sigma d} & \omega_r \vec{X}_q \sigma_{4d} \vec{X}_{\sigma d} & \omega_b \vec{R}_{fd} \vec{X}_d \vec{X}_{2d} \vec{X}_{\sigma d} & -\omega_b \vec{R}_{kd} \vec{X}_d \vec{X}_{1d} \vec{X}_{\sigma d} & -\omega_r \vec{X}_{mq} \sigma_{4d} \vec{X}_{\sigma d} & -\omega_r \vec{X}_{mq} \sigma_{4d} \vec{X}_{\sigma d} \\ -\omega_r \vec{X}_d \sigma_{3q} \vec{X}_{\sigma q} & -\omega_b \vec{R}_s \sigma_{3q} \vec{X}_{\sigma q} & \omega_r \vec{X}_{md} \sigma_{3q} \vec{X}_{\sigma q} & \omega_b \vec{X}_{md} \sigma_{3q} \vec{X}_{\sigma q} & -\omega_b \vec{R}_{kq1} \vec{X}_q \vec{X}_{3q} \vec{X}_{\sigma q} & \omega_b \vec{R}_{kq2} \vec{X}_q \vec{X}_{2q} \vec{X}_{\sigma q} \\ -\omega_r \vec{X}_d \sigma_{4q} \vec{X}_{\sigma q} & -\omega_b \vec{R}_s \sigma_{4q} \vec{X}_{\sigma q} & \omega_r \vec{X}_{md} \sigma_{4q} \vec{X}_{\sigma q} & \omega_r \vec{X}_{md} \sigma_{4q} \vec{X}_{\sigma q} & \omega_b \vec{R}_{kq1} \vec{X}_q \vec{X}_{2q} \vec{X}_{\sigma q} & -\omega_b \vec{R}_{kq2} \vec{X}_q \vec{X}_{1q} \vec{X}_{\sigma q} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$\mathbf{B} = -\omega_b \begin{bmatrix} \sigma_{2d} \vec{X}_{\sigma d} & 0 & \sigma_{3d} \vec{X}_{\sigma d} & \sigma_{4d} \vec{X}_{\sigma d} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{2q} \vec{X}_{\sigma q} & 0 & 0 & \sigma_{3q} \vec{X}_{\sigma q} & \sigma_{4q} \vec{X}_{\sigma q} \\ -\sigma_{3d} \vec{X}_{\sigma d} & 0 & -\vec{X}_d \vec{X}_{3d} \vec{X}_{\sigma d} & \vec{X}_d \vec{X}_{2d} \vec{X}_{\sigma d} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (3.20)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Finalmente, las matrices definidas previamente y los vectores de estado, entrada y salida se sustituyen en la Ecuación 3.1. y Ecuación 3.2.

### Código de Matlab para la simulación del modelo de aerogenerador sincrónico

```
%constantes
clear; clc; cla
%Constantes
fb=50; %frecuencia base
wb=2*pi*fb; %frecuencia angular base
Rs=0.004;
Rr=0.000549;
Xm=3.95279;
Rfd=0.2696;
Rkd=0.2696;
Xd=0.453;
Rkq2= 0.00549;
Rkq1= 0.00549;
Xmd=0.2;
Xmq=0.2;
Xss=0.4;
Xrr=0.0549;
Xkq1=0.549;
Xkq2=0.549;
Xkd=2696;
```

```
Xq=0.453;
Xfd=0.2696;
```

```
%condiciones
wr=input(" velocidad angular del rotor (wr) : "); %velocidad angular del rotor
s=input(" s : "); %s de cada network
a=input(" Vds : "); %Vds de cada caso
b=input(" Vqs : "); %Vqs de cada caso
c=input(" Vdf : "); %Vdf de cada caso
```

```
%dependientes
ws= wr/(s-1); %velocidad angular del estator
alpha1=(Xss*Xrr)-(s*(Xm)^2);
alpha2=Xm^2-s*Xss*Xrr;
Bs=Xm*Xss*(1-s);
Br=Xm*Xrr*(1-s);
o=(1-Xm^2)/(Xss*Xrr);
X1d=Xfd-Xmd^2/Xd;
X1q=Xkq1-Xmq^2/Xq;
X2d=Xmd-Xmd^2/Xd;
X2q=Xmq-Xmq^2/Xq;
X3d=Xkd-Xmd^2/Xd;
X3q=Xkq2^2-Xmq*Xq;
o1d=X1d*X3d-X2d^2;
o1q=X1q*X3q-X2q^2;
```

```
Xod=1/(Xd*o1d);
Xoq=1/(Xq*o1q);
```

```
o2d=Xfd*Xkd-Xmd^2;
o2q=Xkq1*Xkq2-Xmq^2;
o3d=Xmd*Xkd-Xmd^2;
o3q=Xmq*Xkq2-Xmq^2;
o4d=Xmd*Xfd-Xmd^2;
o4q=Xmq*Xkq1-Xmq^2;
```

```

A=[-wb*Rs*o2d*Xod, wr*Xq*o2d*Xod, -wb*Rfd*o3d*Xod, -wb*Rkd*o4d*Xod, -wr*Xmq*o2d*Xod,
    -wr*Xmq*o2d*Xod; -wr*Rs*o2q*Xoq, -wb*Rs*o2d*Xoq, wr*Xmd*o2q*Xoq, wr*Xmd*o2q*Xoq,
    -wb*Rkq1*o3q*Xoq, -wb*Rkq2*o4q*Xoq; -wb*Rs*o3d*Xod, wr*Xq*o3d*Xod, -wb*Rfd*Xd*X3d*Xod,
    wb*Rkd*Xd*X2d*Xod, -wr*Xmq*o3d*Xod, -wr*Xmq*o3d*Xod; -wb*Rs*o4d*Xod,
    wr*Xq*o4d*Xod, wb*Rfd*Xd*X2d*Xod, -wb*Rkd*Xd*X1d*Xod, -wr*Xmq*o4d*Xod,
    -wr*Xmq*o4d*Xod; -wr*Xd*o3q*Xoq, -wb*Rs*o3q*Xoq, wr*Xmd*o3q*Xoq, wr*Xmd*o3q*Xoq,
    -wb*Rkq1*Xq*X3q*Xoq, wb*Rkq2*Xq*X2q*Xoq; -wr*Xd*o4q*Xoq, -wb*Rs*o4q*Xoq,
    wr*Xmd*o4q*Xoq, wr*Xmd*o4q*Xoq, wb*Rkq1*Xq*X2q*Xoq, -wb*Rkq2*Xq*X1q*Xoq];

```

```

bmatriz=[o2d*Xod,0,o3d*Xod,o4d*Xod,0,0;0,o2q*Xoq,0,0,o3q*Xoq,o4q*Xoq;
    -o3d*Xod,0,-Xd*X3d*Xod,Xd*X2d*Xod,0,0];

```

```

B = -wb*transpose(bmatriz);

```

```

C=[1,0,0,0,0,0;0,1,0,0,0,0];

```

```

D=0;

```

```

dt = 0.0001;

```

```

F=ss(A,B,C,D);

```

```

t=0:dt:30;

```

```

Vds=(a*(t>=1));

```

```

Vqs=(b*(t>=1));

```

```

Vfd=(c*(t>=1));

```

```

u=[Vds;Vqs;Vfd];

```

```

lsim(F,u,t)

```

```

pause(0.1);

```

```

y=F

```

```

%salidas

```

```

%ids

```

```

y1=y(1,:);

```

```

%iqs

```

```

y2=y(2,:);

```

Del mismo modo, se realizaron pruebas para niveles de red y cada una con 3 diferentes casos como se muestra en la siguiente tabla de condiciones:

Red débil  $V_{ASC}$  (short circuit level) = 16MVA  
 $s = -0,0051$

	Caso A	Caso B	Caso C
$w_r$	0.8	1.1	1.29
$V_{ds}$	-0.06	-0.114	0.1169
$V_{qs}$	0.9983	0.993	0.986
$V_{df}$	-0.025	0.025	0.105

Cuadro 3.4: Tabla de variables de red débil  $V_{ASC}$  (short circuit level) = 16MVA

Red fuerte  $V_{ASC}$  (short circuit level) = 40MVA  
 $s = -0,0051$

	Caso A	Caso B	Caso C
$w_r$	0.8	1.1	1.29
$V_{ds}$	-0.035	-0.066	-0.098
$V_{qs}$	0.999	0.998	0.995
$V_{df}$	-0.02	0.02	-0.085

Cuadro 3.5: Tabla de variables de red fuerte  $V_{ASC}$  (short circuit level) = 40MVA

### Resultados de la simulación del modelo de aerogenerador sincrónico

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de correr el código mostrado en la sección anterior.

#### 1. Red débil

$V_{ASC}$  (short circuit level) = 16MVA

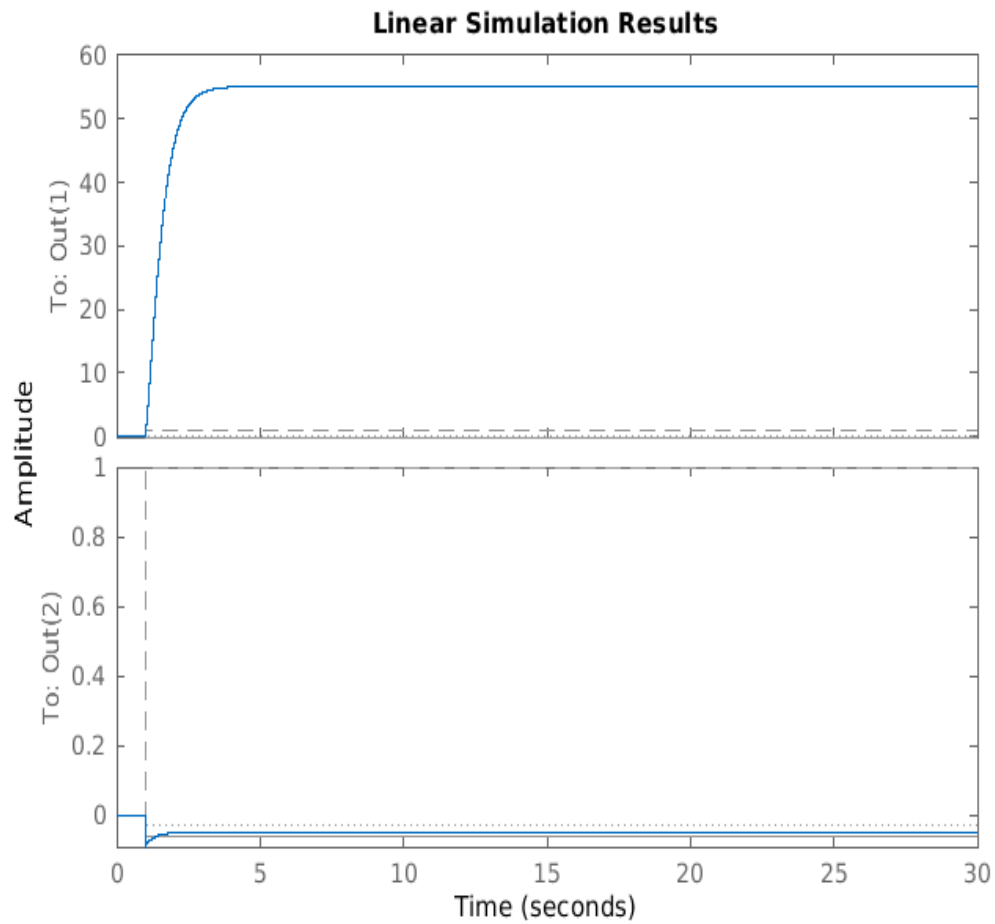


Figura 3.7: Resultados de la simulación del aerogenerador de sincrónico caso débil A



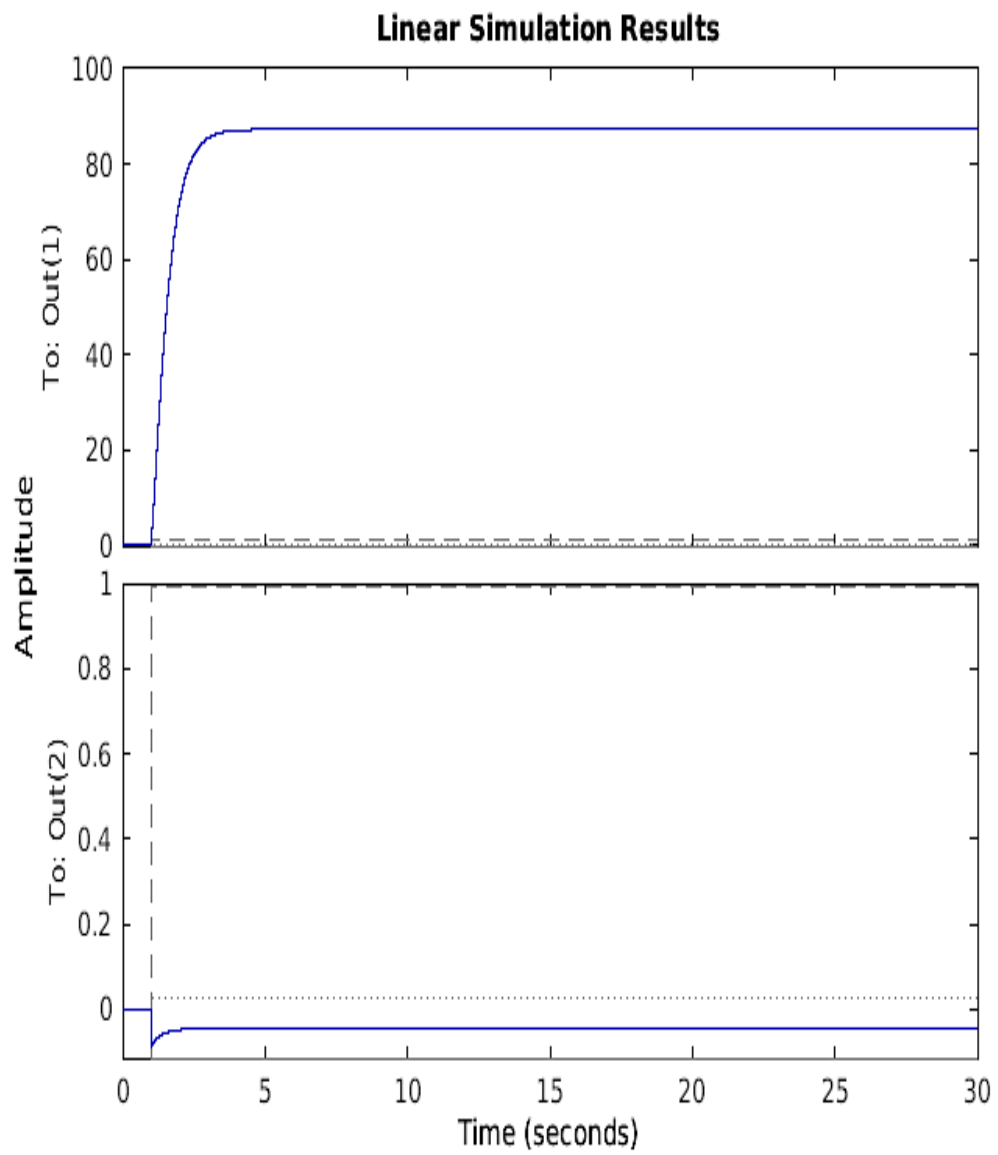


Figura 3.8: Resultados de la simulación del aerogenerador de sincrónico caso débil B

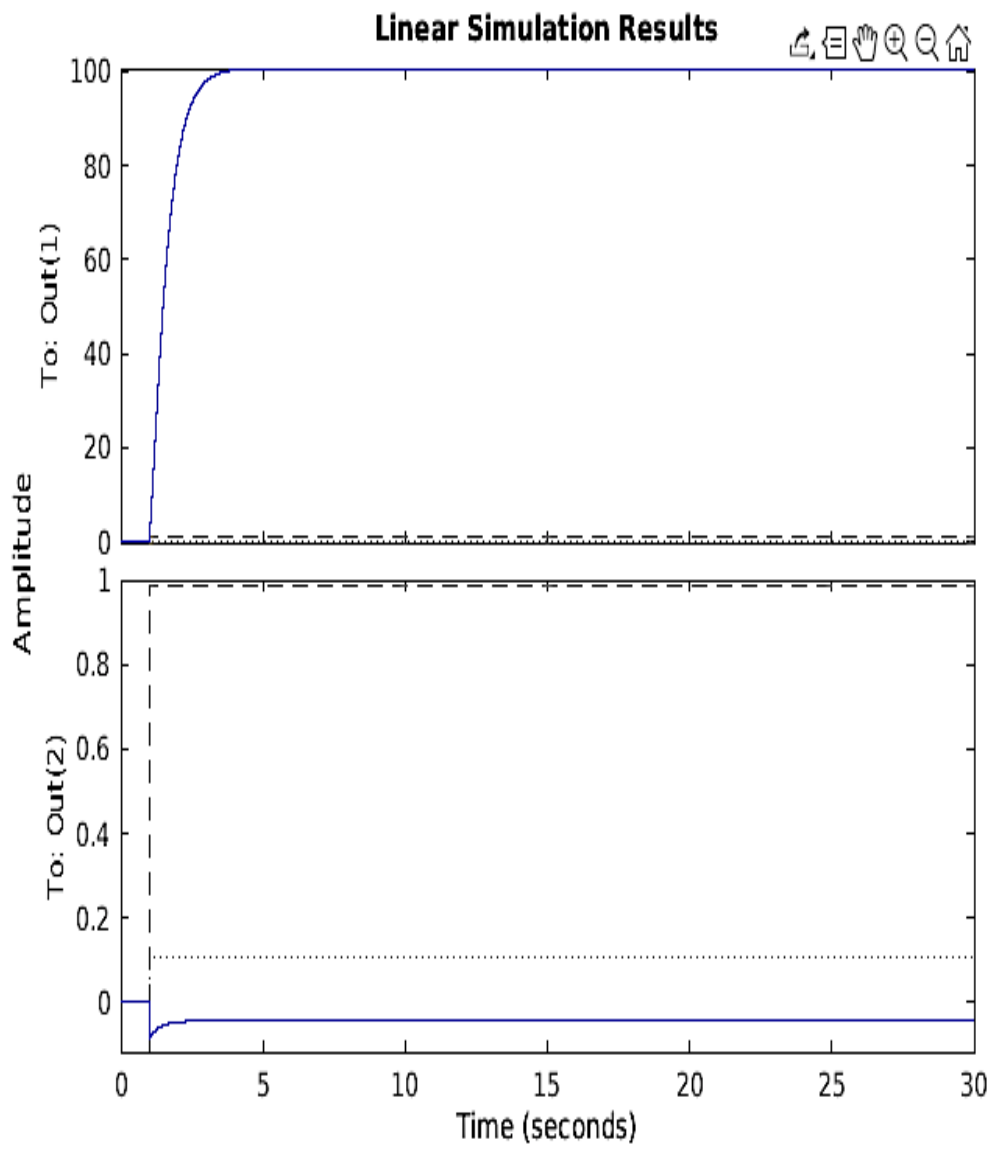


Figura 3.9: Resultados de la simulación del aerogenerador de sincrónico caso débil C

1. Red fuerte

$V_{ASC}$  (short circuit level) = 40MVA

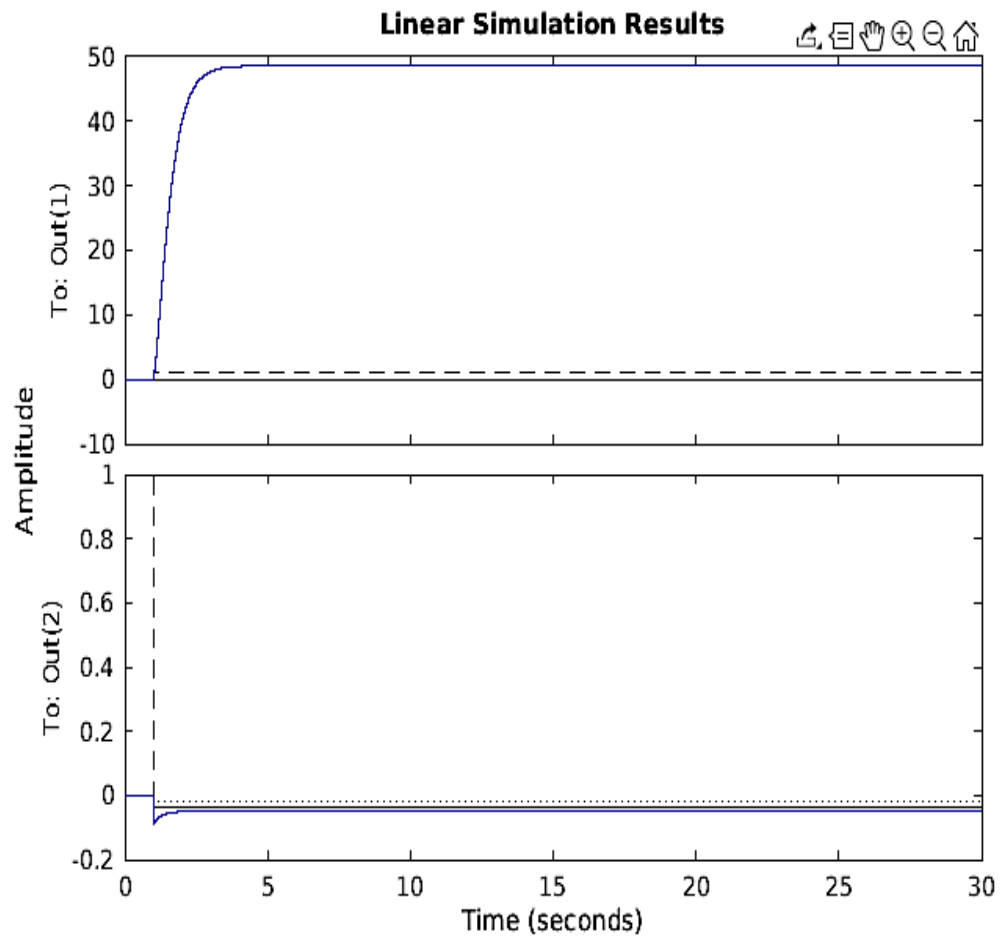


Figura 3.10: Resultados de la simulación del aerogenerador de sincrónico caso fuerte A

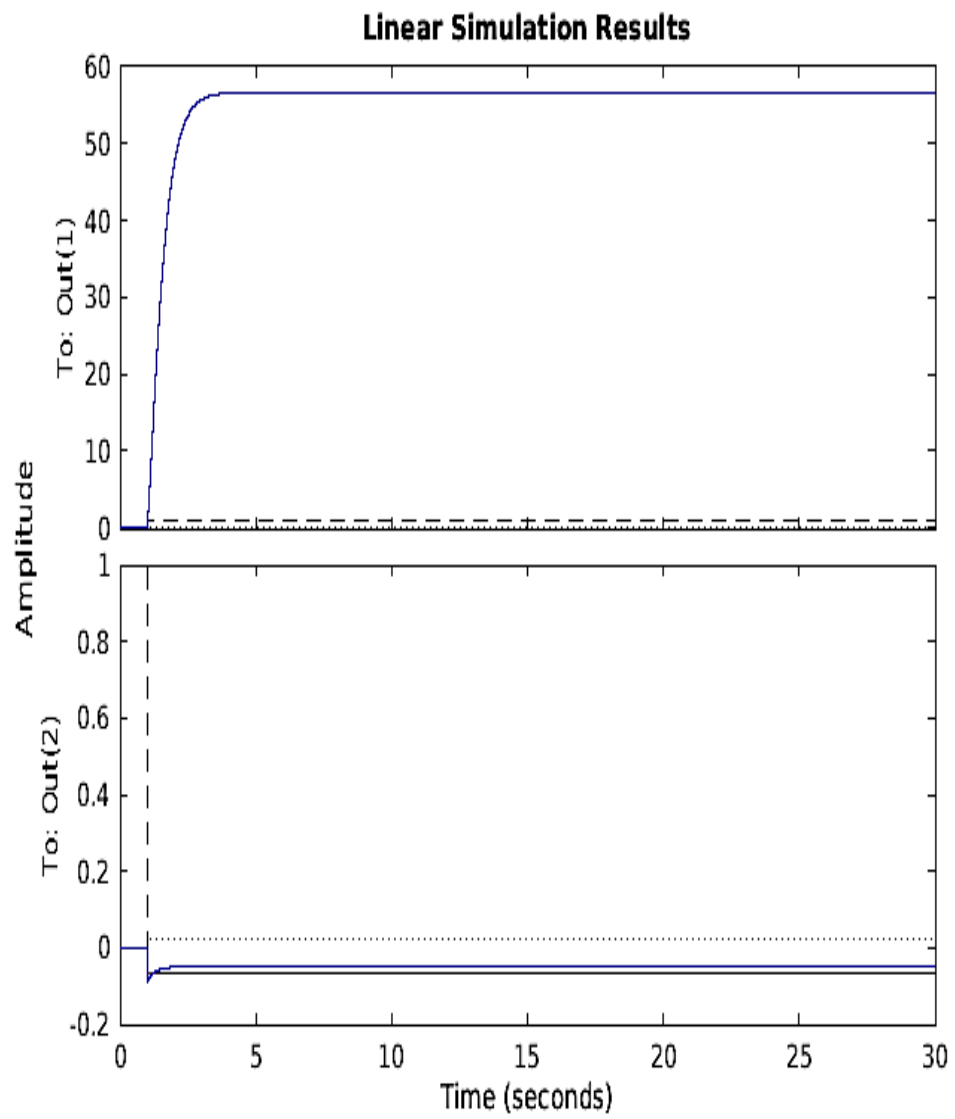


Figura 3.11: Resultados de la simulación del aerogenerador de sincrónico caso fuerte B

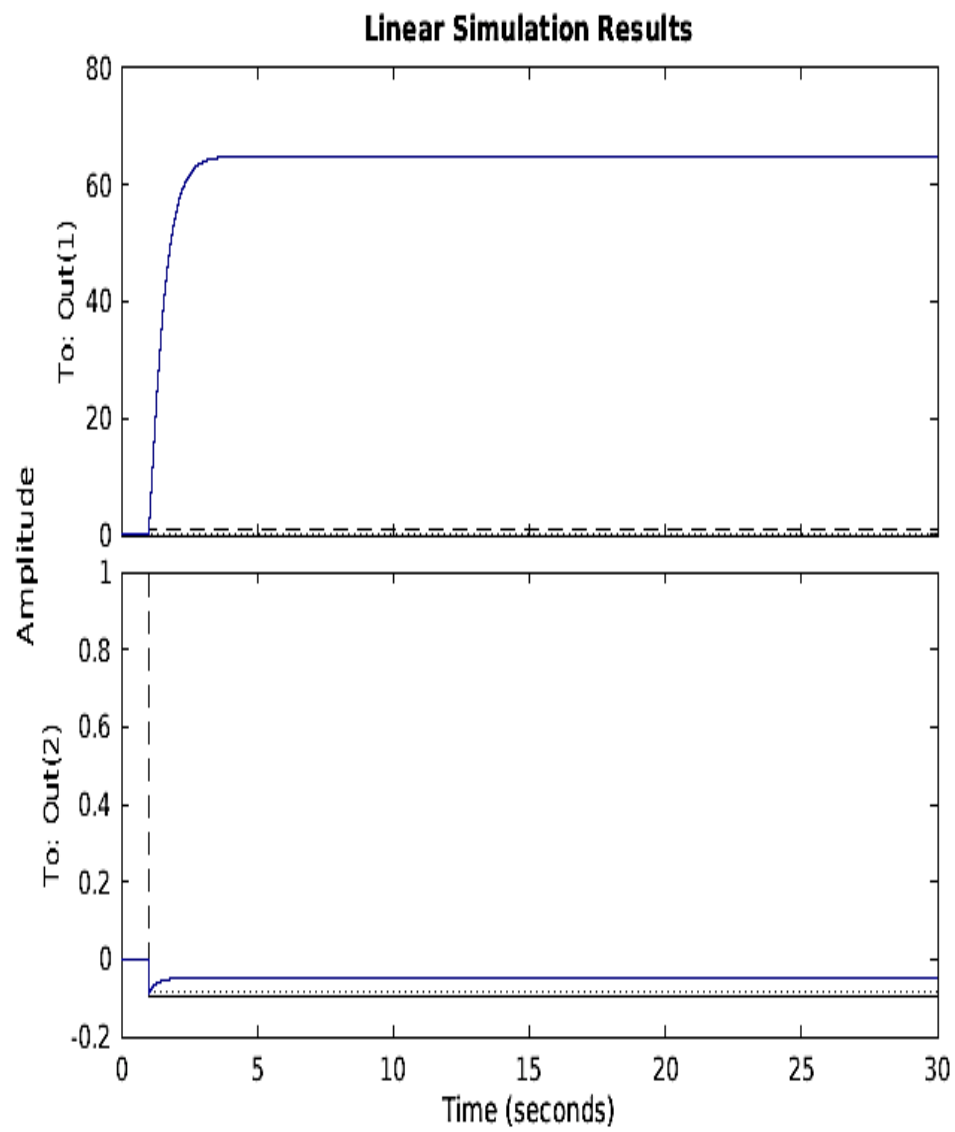


Figura 3.12: Resultados de la simulación del aerogenerador de sincrónico caso fuerte C

# Capítulo 4

## Análisis

Este capítulo trata el análisis de los resultados obtenidos a la hora de correr los códigos mostrados en cada sección del capítulo 3. En ambos casos se obtiene como salidas las corrientes del rotor y del estator para el caso del generador de inducción y el sincrónico respectivamente, esto es un punto clave para entender las diferencias entre las gráficas mostradas en el artículo de Ugalde-Loo, Ekanayake y Jenkins 2013, puesto que estas muestran los resultados del torque, slip y algunas tensiones del sistema.

Ambos modelos se encuentran linealizados para el estudio de estos sistemas, en caso de no estar linealizados se tendría que lidiar con las velocidades variables que puede llegar a tener el rotor.

Las simulaciones presentadas no toman en cuenta los sistemas de control que debe tener el generador, por este motivo puede que ciertas corrientes no logren la estabilidad dependiendo de las condiciones con las que se trabaje.

### 4.1. Aerogenerador de inducción

En esta sección se presenta el análisis de resultados de las simulaciones realizadas en Matlab para el generador de inducción. Las gráficas de resultados del generador de inducción se muestran en la sección 3.1.2. Al observar cada una de las gráficas y comparar los casos de red débil y fuerte, se puede llegar a la conclusión de que cada una de ellas es muy similar cuando se comparte la velocidad angular entre simulaciones.

Con el fin de realizar este análisis se consideran las siguientes suposiciones:

1. La corriente del estator es negativa cuando fluye hacia la máquina.
2. Las ecuaciones se derivan dentro del marco sincrónico de referencia.
3. El eje  $q$  es  $90^\circ$  por encima del eje  $d$ .

Dado que el modelo no es lineal se realizaron modificaciones usando las ecuaciones 3.1 y 3.2 con el fin de simular las corrientes de salida del estator. Tomando en cuenta que el análisis tanto para la red de  $V_{ASC} = 16$  MVA siendo esta considera como red debil y otra de  $V_{ASC} = 40$  MVA para una red fuerte fueron linealizados al rededor de un punto de operación específico siendo estos especificados en cada tabla de variables para cada caso.

Dado que al implementar un PVDq se genera dos corrientes y voltajes para los dos ejes, se tiene que a partir de lo mencionado anteriormente, se considera para un análisis de estabilidad de pequeñas señales ( $\vec{w}_r$ ) siendo esta la variable de estado para la velocidad del rotor.

#### 4.1.1. Red débil: $V_{ASC} = 16 \text{ MVA}$

Tomando en cuenta que los datos de tabla 3.2 son los valores de distintos puntos de operación, tenemos que la velocidad del rotor comparando los casos A, B, C entre sí van aumentando, así como las dos corrientes del estator, la corriente del eje q del rotor, la tensión del eje d del rotor. En contraposición la corriente d del rotor, ambas tensiones del estator y la tensión q del rotor van disminuyendo.

Los resultados de los tres casos se encunetran en las figuras 3.1, 3.2 y 3.3. De esa manera, se observa que en la gráfica 3.1 se observa que para la corriente de salida del rotor del eje d tiene un valor positivo en un intervalo corto pero la gráfica se comporta de manera general como una sinusoidal con valor absoluto la cual contiene ruido, y su periodo de intersección muestra que sucede cada vez aumentando superiociudad donde se observa que aproximadamente el primer valor de corte es de 10 s, seguido de aproximadamente 17.5 s y porteriormente en 22.5 s. Por otro lado, la corriente de salida del rotor del eje q se muestra como una senusoidal con ruido iniciando en un amplitud negativa y sus intersecciones con el eje de tiempo suceden con mucha mayor frecuencia de aproximadamente 6 intersecciones en un periodo de los primeros 10 s y conforme el tiempo transcurre estas intersecciones van disminuyendo.

Continuando con lo descrito anteriormente se observa que conforme se pasa de caso, siendo esto de caso A a B en comparación las intersecciones suceden con una frecuencia mayor que la del caso A y con una amplitud mayor al mismo. Por último, se analiza la comparación de la gráfica del caso A con la del caso C y se ve que el comportamiento entre las corrientes de salida es similar a lo sucedido en la comparación anterior.

Por ende, para la red con un  $V_{ASC} = 16 \text{ MVA}$  es posible describir el comportamiento de las corrientes del rotor de la siguiente manera: conforme los puntos de operación aumentan en valor las corrientes de salida del rotor en sus ejes aumentan, así como su periodo de duración en que la corriente posea un valor positivo y de manera general el valor de la corriente de salida del rotor del eje d es menor que la del eje q.

#### 4.1.2. Red fuerte: $V_{ASC} = 40 \text{ MVA}$

De igual manera considerando que las salidas de las corrientes a la hora de simularlas presentan ruido, se realiza el análisis para la red fuerte con los valores de punto de operación los cuales están descritos en la tabla 3.3, observando las gráficas de esta sección. De la gráfica 3.4 se puede deducir una tendencia de la corriente de salida del estator del eje d con un aumento en el tiempo en el la corriente posee un valor positivo así como un aumento en el periodo del mismo conforme el tiempo pasa. La forma de esta salida es sinusoidal con apariencia de valor absoluto negativo. Ahora bien, la corriente de salida del estator en el eje q muestra un comportamiento sinusoidal con amplitud inicial negativa con intervalos donde la corriente va a ser positiva y los cuales suceden con mayor continuidad.

Comparando la gráfica del denominado con fuerte A 3.4 en contraposición con la gráfica 3.5 y 3.6 se observa una tendencia al igual que en el análisis de la red débil en el sentido que conforme los puntos de operación aumentan en valor las corrientes de salida del rotor en sus ejes aumentan, así como su periodo

de duración en que la corriente posea un valor positivo y de manera general el valor de la corriente de salida del rotor del eje d es menor que la del eje q.

### 4.1.3. Diagrama de Bode

Para el diagrama de Bode se utiliza la función de Matlab `bode(function)` la cual permite calcular el diagrama esperado a partir de la simulación lineal realizada en matlab. El resultado obtenido es el esperado para el primer caso del aerogenerador de inducción con un  $V_{ASC} = 16MVA$  como se muestra en la imagen 4.1.

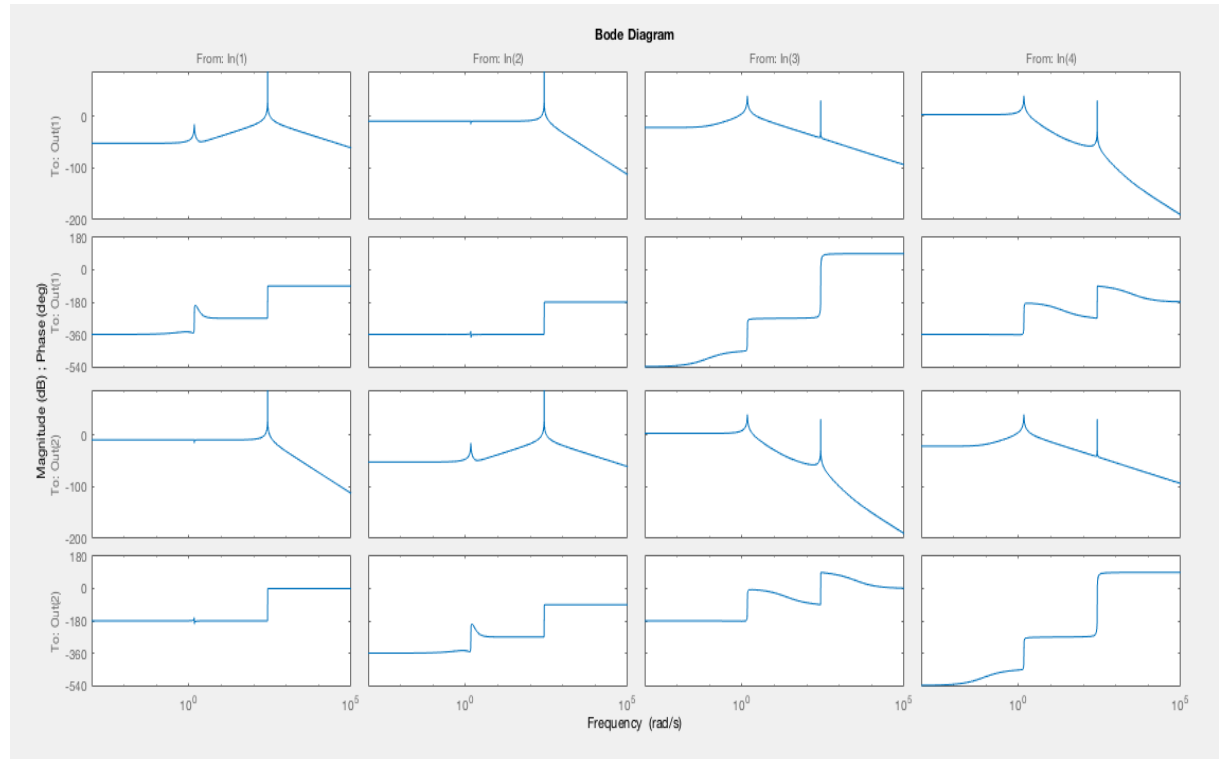


Figura 4.1: Resultado del diagrama de Bode para el primer caso de 16MVA para el aerogenerador de inducción

De la figura 4.1 se puede rescatar que se tienen distintas funciones de transferencia que complementan el sistema. Gracias al diagrama extraído de las diferentes funciones de transferencia definidas en Matlab, se puede llegar a obtener las ganancias del sistema y en que puntos la señal se atenúa o amplifica. Por otro lado también se puede analizar los puntos de estabilización del sistema además de cuantos polos llega a tener la función de transferencia obtenida a partir del modelado.



## 4.2. Aerogenerador de sincrónico

El modelo simulado en esta sección está linealizado para trabajar con pequeñas señales y lograr estabilidad con las mismas. Para cada caso se utilizaron los parámetros provistos por el autor. En ambos casos

### 4.2.1. Red débil: $V_{ASC} = 16 \text{ MVA}$

Los resultados de este modelo muestran la corriente por el estator del generador para el eje q y el eje d. Al analizar los 3 casos de red débil, para la corriente por el eje d se puede generalizar que todos tienen un retardo aproximado de 1s y que logran la estabilidad en 4s desde que se aplica una entrada. La principal diferencia entre las simulaciones realizadas para el caso de la corriente por el eje d, es el valor final de corriente al que llega al sistema.

En la siguiente tabla se muestra el valor final al que logra estabilizarse el sistema dependiendo de la velocidad del rotor.

	Caso A	Caso B	Caso C
$w_r$	0.8	1.1	1.29
$Y_f$	55.1	87.2	101

Cuadro 4.1: Valor final de la corriente del estator en eje d para diferentes velocidades de rotor para red débil

Conforme se aumenta la velocidad en el rotor, la corriente que logra el generador aumenta. Este es un resultado esperado puesto que conforme aumente la velocidad del viento y el rotor aumente de velocidad, se debería generar más corriente. Con pequeños cambios en la velocidad se obtiene aumentos significativos en la corriente.

La corriente por el eje q es sumamente pequeña comparada con la corriente del eje d. Esta mantiene el mismo retardo de 1s y la estabilidad se logra en aproximadamente 3.5s. Para este caso se muestra una tabla con el valor pico y el valor final de estabilidad.

	Caso A	Caso B	Caso C
$w_r$	0.8	1.1	1.29
$Y_p$	-0.0788	-0.0892	-0.0886
$Y_f$	-0.0483	-0.0451	-0.0429

Cuadro 4.2: Valor pico y final de corriente del estator en eje q para diferentes velocidades de rotor para red débil

El caso de la corriente por el eje q no tiene variaciones significativas. Es importante notar que estas corrientes son negativas, por lo que se toma como que entran al sistema.

### 4.2.2. Red fuerte: $V_{ASC} = 40 \text{ MVA}$

El comportamiento para este caso es muy similar que el de la red débil, este mantiene tanto el retardo como el tiempo de estabilización. Que se mantengan los mismos tiempos es algo esperado puesto que el sistema es el mismo y deben tener las mismas constantes de tiempo. Al igual que en el caso anterior, se muestran las tablas de valores finales a diferentes velocidades de rotor.

	Caso A	Caso B	Caso C
$w_r$	0.8	1.1	1.29
$Y_f$	48.6	56.7	64.9

Cuadro 4.3: Valor final de la corriente del estator en eje d para diferentes velocidades de rotor para red fuerte

Según lo obtenido, la red fuerte logra valores de corriente inferiores a los obtenidos en la red débil. Se cree que esta reducción en el valor final de la corriente es debida a que el generador logra una mayor generación de voltaje, por lo que la corriente requerida para llegar a la potencia deseada es inferior.

	Caso A	Caso B	Caso C
$w_r$	0.8	1.1	1.29
$Y_p$	-0.0898	-0.0716	-0.0894
$Y_f$	-0.0486	-0.0482	-0.0477

Cuadro 4.4: Valor pico y final de corriente del estator en eje q para diferentes velocidades de rotor para red fuerte

El comportamiento de la corriente por el eje q para la red fuerte es muy similar a la red débil. De la misma manera, la corriente se toma entrando al sistema.

## Capítulo 5

# Conclusiones y recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

- Se puede llegar a concluir que para la creación de energía eólica se tienen diferentes caminos y métodos que se pueden llegar a tomar dependiendo de la función que se quiera llegar a tener del mismo aerogenerador. Como se muestra en los diferentes modelos se tienen varios resultados dependiendo de la potencia consumida y de los parámetros establecidos para el sistema usado.
- En las simulaciones se toman las corrientes del estator y del rotor como las salidas del modelo lineal. Las respuestas de estas corrientes llegan a depender en su totalidad de la velocidad angular del rotor la cual depende de la velocidad del viento, y esta es la variable que llega a cambiar todos los demás parámetros.
- Se llega a denotar en el caso de una red débil como las corrientes del eje directo para el estátor aumentan (negativamente porque entra al sistema) conforme aumenta la velocidad angular del rotor. Al mismo tiempo la corriente del eje directo del rotor disminuyen conforme aumenta la velocidad angular del mismo.
- Para las corriente del eje de cuadrante se puede concluir que en el estátor se ve un aumento, a medida se aumente la velocidad angular del rotor. Esto mismo sucede en el rotor.
- El diagrama de Bode llega a mostrar los puntos de estabilidad del sistema para cada salida, dependiendo de cada entrada que se toma en cuenta en el modelo.

### 5.2. Recomendaciones

- Se recomienda para próximas modulaciones tomar más variables de estado del sistema para no estar obligados a estar constantemente cambiando constantes del sistema y que se dependa únicamente de datos recolectados como la velocidad del viento y la frecuencia base utilizada.
- También se toma como precaución tomar un análisis con más datos del diagrama de Boyle, para determinar la estabilidad en cada una de sus salidas dependiendo de la entrada para cada uno de los casos.

- Se aconseja tomar los torques mecánicos y electromagnéticos y analizar su comportamiento, ya que estos pueden llegar a generar ruidos a la hora de realizar el modelado y obtener su respuesta.

# Bibliografía

- EIA, U.S. Energy Information Administration (2019). *Wind explained: History of wind power*.
- IEC (s.f.). *Wind Turbine Generator Systems—Part 21: Measurement and Assessment of Power Quality Characteristics of Grid Connected Wind Turbines*. IEC 61400-21 ed. 2.
- López, Miguel Villarrubia (2012). *Ingeniería de la Energía Eólica*. first. MARCOMBO, S.A.
- Nelson, Vaughn (2009). *Wind Energy: Renewable Energy and the Environment*. Taylor Francis Group.
- NERC (s.f.). *North American Electric Reliability Corporation, Standard Models for Variable Generation*. Integration of Variable Generation Task Force 1–1.
- Nersesian, Roy L. (2010). *Energy for the 21st Century: A Comprehensive Guide to Conventional and Alternative Sources, Second Edition*.
- Tong, Wei (2010). *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*. WIT Press.
- Ugalde-Loo, C. E., J. B. Ekanayake y N. Jenkins (ene. de 2013). “State-Space Modeling of Wind Turbine Generators for Power System Studies”. En: *IEEE Transactions on Industry Applications* 49.1, págs. 223-232. doi: 10.1109/TIA.2012.2228836.