

IMPACTO DEL DESBALANCE DE TENSIÓN EN LA GENERACIÓN
EÓLICA

ARLEY ALONSO GUTIERREZ VARGAS
OSCAR LUIS MORALES MONTAÑO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRONICA
Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2010

IMPACTO DEL DESBALANCE DE TENSIÓN EN LA GENERACIÓN
EÓLICA

ARLEY ALONSO GUTIERREZ VARGAS
OSCAR LUIS MORALES MONTAÑO

Tesis de grado para optar al título de ingeniero electricista

Director

HERMANN RAÚL VARGAS TORRES
Dr. Ingeniero Electricista

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRONICA
Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2010

*DEDICO ESTE LIBRO A:
HELI ANTONIO GUTIERREZ
Y
FLOR MARINA GUTIERREZ
POR SU APOYO INCONDICIONAL
Y POR CREER EN MI*

ARLEY ALONSO GUTIERREZ VARGAS

*DEDICO ESTE LIBRO A:
A MIS PADRES
Y
A MIS HERMANOS
POR ACOMPAÑARME EN ESTA LUCHA*

OSCAR LUIS MORALES MONTAÑO

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. Hermann Raúl Vargas por su colaboración en el desarrollo de este trabajo de grado, por darnos la oportunidad de investigar en el grupo GISEL.

Agradecemos a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones por la formación obtenida a lo largo de estos años, por la calidad de sus profesores y trabajadores.

Índice general

| | |
|---|-----------|
| 1. Introducción | 18 |
| 1.1. Planteamiento del problema | 18 |
| 1.2. Objetivos | 19 |
| 1.2.1. Objetivo general | 19 |
| 1.2.2. Objetivos específicos | 19 |
| 1.3. Antecedentes | 19 |
| 1.4. Organización del libro | 20 |
| 2. Modelo matemático de una máquina de inducción | 21 |
| 2.1. Introducción | 21 |
| 2.1.1. Sistema de ecuaciones en el marco de referencia natural | 21 |
| 2.1.2. Ecuaciones en el sistema de referencia $dq0$ | 25 |
| 3. Modelo matemático de una la línea de transmisión corta | 29 |
| 3.1. Introducción | 29 |
| 3.2. Cálculo de los parámetros de la línea | 29 |
| 3.2.1. Cálculo de la resistencia | 29 |
| 3.2.2. Cálculo de la reactancia inductiva | 30 |
| 3.2.3. Cálculo de la susceptancia capacitiva | 31 |
| 3.3. Línea corta | 31 |
| 3.3.1. Modelo circuital de la línea | 31 |
| 3.3.2. Línea no transpuesta | 32 |
| 4. Análisis del comportamiento del generador de inducción ante desbalances en la alimentación. | 34 |
| 4.1. Sistema balanceado | 36 |
| 4.1.1. Operación como motor | 36 |

| | |
|---|-----------|
| 4.1.2. Operación como generador | 43 |
| 4.1.2.1. Primer caso | 44 |
| 4.1.2.2. Segundo caso | 51 |
| 4.1.2.3. Tercer caso | 57 |
| 4.2. Sistema desbalanceado | 63 |
| 4.2.1. Operación como motor | 63 |
| 4.2.2. Operación como generador | 69 |
| 4.2.2.1. Primer caso | 69 |
| 4.2.2.2. Segundo caso | 75 |
| 4.2.2.3. Tercer caso | 80 |
| 5. Conclusiones | 86 |
| 6. Bibliografía | 87 |
| 7. Apéndices | 89 |
| A. Características del generador | 90 |
| B. Parámetros de la línea de transmisión | 91 |
| C. Características de la turbina eólica | 92 |
| D. Manual de usuario Matlab | 93 |
| E. Manual de usuario ATP | 95 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| 2.1. Generador de inducción en coordenadas ABC [3] | 22 |
| 2.2. Generador de inducción en coordenadas $dq0$ [3] | 25 |
| 3.1. Conductores dispuestos en triángulo | 30 |
| 3.2. Circuito equivalente de una línea corta [5] | 31 |
| 3.3. Sistema impedancias serie desiguales [9]. | 32 |
| 4.1. Variación de la velocidad en el generador | 35 |
| 4.2. Variación de la potencia activa en el generador | 35 |
| 4.3. Curva velocidad-Par del motor de inducción Matlab | 36 |
| 4.4. Curva velocidad-par del motor de inducción ATP | 37 |
| 4.5. Curva tiempo-par del motor de inducción Matlab | 37 |
| 4.6. Curva tiempo-par motor de inducción ATP | 38 |
| 4.7. Curva tiempo-potencia mecánica del motor de inducción Matlab | 39 |
| 4.8. Curva tiempo-potencia mecánica del motor de inducción ATP | 39 |
| 4.9. Curva tiempo-potencia eléctrica del motor de inducción Matlab | 40 |
| 4.10. Curva tiempo-potencia eléctrica del motor de inducción ATP | 40 |
| 4.11. Curva tiempo-potencia reactiva del motor de inducción Matlab | 41 |
| 4.12. Curva tiempo-potencia reactiva del motor de inducción ATP | 42 |
| 4.13. Curva tiempo-corriente eficaz en el estator ATP | 42 |
| 4.14. Serie de viento 1 | 44 |
| 4.15. Curva tiempo-par generador de inducción Matlab | 45 |
| 4.16. Curva tiempo-par generador de inducción ATP | 45 |
| 4.17. Curva tiempo-potencia eléctrica Matlab | 46 |
| 4.18. Curva tiempo-potencia eléctrica ATP | 47 |
| 4.19. Curva tiempo-potencia mecánica Matlab | 47 |
| 4.20. Curva tiempo-potencia mecánica ATP | 48 |

| | |
|---|----|
| 4.21. Curva tiempo-potencia reactiva Matlab | 48 |
| 4.22. Curva tiempo-potencia reactiva ATP | 49 |
| 4.23. Curva tiempo-tensión eficaz en el estator Matlab | 50 |
| 4.24. Curva tiempo-corriente eficaz en el estator ATP | 50 |
| 4.25. Serie de viento 2 | 51 |
| 4.26. Curva tiempo-par del generador de inducción Matlab | 52 |
| 4.27. Curva tiempo-par del generador de inducción ATP. | 52 |
| 4.28. Curva tiempo-potencia mecánica Matlab | 53 |
| 4.29. Curva tiempo-potencia mecánica ATP | 53 |
| 4.30. Curva tiempo-potencia eléctrica Matlab | 54 |
| 4.31. Curva tiempo-potencia eléctrica ATP | 54 |
| 4.32. Curva tiempo-potencia reactiva Matlab | 55 |
| 4.33. Curva tiempo-potencia reactiva ATP | 55 |
| 4.34. Curva tiempo-corriente eficaz en el estator ATP | 56 |
| 4.35. Serie de viento 3 | 57 |
| 4.36. Curva tiempo-par generador de inducción Matlab. | 58 |
| 4.37. Curva tiempo-par generador de inducción ATP | 58 |
| 4.38. Curva tiempo-potencia mecánica Matlab | 59 |
| 4.39. Curva tiempo-potencia mecánica ATP. | 60 |
| 4.40. Curva tiempo-potencia eléctrica Matlab | 60 |
| 4.41. Curva tiempo-potencia eléctrica ATP. | 61 |
| 4.42. Curva tiempo-potencia reactiva Matlab | 61 |
| 4.43. Curva tiempo-corriente eficaz ATP | 62 |
| 4.44. Curva tiempo-par motor de inducción ATP | 63 |
| 4.45. Curva tiempo-potencia electrica motor de inducción ATP | 64 |
| 4.46. Curva tiempo-potencia mecánica motor de inducción ATP | 65 |
| 4.47. Curva armónicos potencia eléctrica motor de inducción | 65 |
| 4.48. Curva armónicos potencia mecánica motor de inducción | 66 |
| 4.49. Curva tiempo-potencia reactiva motor de inducción ATP | 67 |
| 4.50. Curva tiempo-tensión motor de inducción ATP | 68 |
| 4.51. Curva tiempo-corriente motor de inducción ATP | 68 |
| 4.52. Curva tiempo-par caso uno ATP | 69 |
| 4.53. Curva tiempo-potencia eléctrica ATP | 70 |
| 4.54. Curva tiempo-potencia mecánica ATP | 71 |
| 4.55. Curva armónicos potencia eléctrica generador de inducción | 71 |

| | |
|---|----|
| 4.56. Curva armónicos potencia mecánica generador de inducción | 72 |
| 4.57. Curva tiempo-potencia reactiva ATP | 73 |
| 4.58. Curva tiempo-corriente ATP | 74 |
| 4.59. Curva tiempo-par caso dos ATP. | 75 |
| 4.60. Curva tiempo-potencia eléctrica ATP. | 76 |
| 4.61. Curva tiempo-potencia mecánica ATP | 76 |
| 4.62. Curva armonicos potencia eléctrica generador de inducción | 77 |
| 4.63. Curva armonicos potencia mecánica generador de inducción | 77 |
| 4.64. Curva tiempo-potencia reactiva ATP. | 79 |
| 4.65. Curva tiempo-corriente ATP | 79 |
| 4.66. Curva tiempo-par caso tres ATP | 80 |
| 4.67. Curva tiempo-potencia eléctrica ATP | 81 |
| 4.68. Curva tiempo-potencia mecánica ATP | 81 |
| 4.69. Curva reactivos potencia eléctrica generador de inducción | 82 |
| 4.70. Curva armonicos potencia mecánica generador de inducción | 82 |
| 4.71. Curva tiempo-potencia reactiva ATP. | 84 |
| 4.72. Curva- tiempo corriente ATP | 85 |
| | |
| E.1. Modelo de la máquina en ATP | 96 |
| E.2. ventan de ingreso de datos | 97 |
| E.3. Modelo del sistema mecánico | 97 |

Índice de cuadros

| | |
|---|----|
| 4.1. Amplitud armónicos potencia eléctrica | 66 |
| 4.2. Amplitud armónicos potencia mecánica | 67 |
| 4.3. Amplitud armónicos potencia eléctrica | 72 |
| 4.4. Amplitud armónicos potencia mecánica | 72 |
| 4.5. Amplitud armonicos potencia eléctrica | 78 |
| 4.6. Amplitud armonicos potencia mecánica | 78 |
| 4.7. Amplitud armónicos potencia eléctrica | 83 |
| 4.8. Amplitud armónicos potencia mecánica | 83 |
| A.1. Datos del generador | 90 |
| B.1. Parámetros del conductor | 91 |
| C.1. Especificaciones técnicas de la turbina NM 2000/82 | 92 |
| D.1. Interfaz gráfica Matlab | 94 |

RESUMEN

TITULO: IMPACTO DEL DESBALANCE DE TENSIÓN EN LA GENERACIÓN EÓLICA ¹

AUTORES: GUTIEREZ VARGAS, Arley Alonso. MORALES MONTAÑO, Oscar Luis.²

PALABRAS CLAVES: GISEL, generación, eólica, máquina, asíncrona, Matlab, ATP

CONTENIDO: El presente trabajo de grado es una investigación en el área de estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia del grupo de investigación GISEL. Este trabajo apoya el estudio de la generación de energía eléctrica por medio de recursos renovables y de fácil acceso como es el caso de la generación eólica. Se presenta un estudio del comportamiento del generador asíncrono en la generación eólica en condiciones de desbalance.

La máquina asíncrona se representa por un modelo que permite su análisis de una manera clara y detallada buscando que el análisis de su comportamiento se haga de una forma sencilla. Así mismo, se presenta el modelo de la máquina asíncrona en MATLAB y ATP. La implementación de estos modelos permite simular la máquina de una manera sencilla y práctica.

El modelo de máquina que se implementó cumple con todas las condiciones que la máquina necesita para hacer un estudio de su comportamiento frente al desbalance de tensión.

Como primer paso, se analizó la máquina asíncrona con una tensión balanceada en sus terminales, operando como motor y como generador, observando su comportamiento antes distintas series de viento. Como segundo paso, se sometió el sistema a un desbalance en la tensión de alimentación de la máquina asíncrona, operando como motor y como generador, usando las mismas series de viento del caso balanceado, de esta manera se realizó una comparación entre el funcionamiento de la máquina con la alimentación balanceada y desbalanceada, y se determinaron los diversos problemas que surgieron ante el desbalance en la tensión de alimentación del generador eólico.

¹Proyecto de grado

²

ABSTRACT

TITLE: IMPACT OF IMBALANCE OF TENSION IN THE WIND GENERATION³

AUTHOR:GUTIEREZ VARGAS, Arley alonso. MORALES MONTAÑO, Oscar Luis.⁴

KEY WORDS: GISEL,generation,wind, machine, Asynchronous,Matlab,ATP.

CONTENT: This paper is a research in the area of stability of power systems of the research group Gisel. This work supports the study of the generation of electricity using renewable resources and easily accessible as is the case of wind generation. A study of the behavior of the asynchronous generator in wind generation in conditions of imbalance.

The asynchronous machine is represented by a model that allows analysis of a looking clearly and in detail the behavior analysis is done easily. Also, we present the asynchronous model in MATLAB and ATP. The implementation of these models to simulate the machine in a simple and practical.

The machine model was implemented meets all the conditions that machine needs to make a study of their behavior with voltage unbalance.

As a first step, we analyzed the asynchronous machine with a balanced voltage at its terminals, operating as a motor and generator, observing its behavior different sets of wind. As a second step, the system was subjected to an imbalance in supply voltage asynchronous machine, operating as a motor and generator, using the same series of wind from the balanced case, so a comparison was made between the operation of machine with balanced and unbalanced supply, and identified the various problems that arose before the imbalance in supply voltage of the wind generator.

³Thesis

⁴Physical Mechanical Engineerings Faculty. Electrical, Electronic and Telecommunication Engineering School. Industrial of University of Santander Director: Dr.Hermann Raúl Vargas Torres.

Capítulo 1

Introducción

El presente trabajo de grado es una investigación en el área de estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia del grupo de investigación GISEL. Este trabajo apoya el estudio de la generación de energía eléctrica por medio de recursos renovables y de fácil acceso como es el caso de la generación eólica. Se presenta un estudio del comportamiento del generador asíncrono en la generación eólica en condiciones de desbalance.

La máquina asíncrona se representa por un modelo que permite su análisis de una manera clara y detallada buscando que el análisis de su comportamiento se haga de una forma sencilla. Así mismo, se presenta el modelo de la máquina asíncrona en MATLAB y ATP.

El modelo de máquina que se implementó cumple con todas las condiciones que la máquina necesita para hacer un estudio de su comportamiento frente al desbalance de tensión.

1.1. Planteamiento del problema

Actualmente a nivel mundial se está tomando conciencia sobre la utilización de recursos renovables en la generación de energía eléctrica. Dentro de todas las posibilidades de este tipo de generación sobresale la generación de energía eléctrica aprovechando la energía del viento.

Dado que los estudios que se han desarrollado frente al tema de la energía eólica en Colombia son pocos, se busca estudiar el comportamiento de la máquina asíncrona de los generadores eólicos frente a desbalances de tensión y de cómo esto puede afectar sus características operativas, y de esta manera buscar soluciones que permitan implemen-

tar energía eólica en el país y que permitirá un avance en el desarrollo de este tipo de generación en nuestro país.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Analizar el efecto del desbalance de tensión de la alimentación del generador eólico

1.2.2. Objetivos específicos

- Modelar y simular el generador de inducción
- Analizar el modelo y simular la línea incluida la no transposición
- Analizar el comportamiento del generador de inducción ante desbalances de la alimentación, tomando diversas series de viento.

1.3. Antecedentes

La energía eólica convierte la energía cinética del viento en electricidad a través de aerogeneradores. Para poder aprovechar la energía eólica es importante conocer las variaciones estacionales de los vientos, así como sus variaciones en cuanto a su velocidad con la altura respecto del suelo. Además, es importante conocer la velocidad máxima que puede tomar el viento. Para poder utilizar la energía del viento este debe alcanzar una velocidad mínima que depende del tipo de aerogenerador que se desee instalar.

Para poder generar electricidad a partir del viento es necesario accionar máquinas que, por arrancar en vacío prácticamente no exigen al rotor eólico un gran par de arranque. Los generadores eléctricos que se utilizan pueden ser de corriente continua (dinamos) o de corriente alterna.

Los dinamos tienen la desventaja de utilizar escobillas que exigen mantenimiento periódico y son más pesados y costosos que los generadores de corriente alterna, razón por la cual su uso se ha discontinuado a excepción de algunos casos en los que se les usa para proveer muy bajas potencias.

Luego entonces para la generación de electricidad a partir del viento, los generadores de inducción son una de las mayores opciones dado que tienen la ventaja de que una

vez en marcha y conectados a los sistemas pueden entregar energía eléctrica según la intensidad del viento.

1.4. Organización del libro

Este libro consta de 5 capítulos y 2 apéndices

Capítulo 2

Este capítulo está dedicado a la descripción matemática de la máquina asíncrona, donde se exponen ecuaciones eléctricas y mecánicas.

Capítulo 3

En este capítulo se describe el modelo de una línea de transmisión corta.

Capítulo 4

En este capítulo se hace un estudio de los resultados de la operación de la máquina de inducción para el caso balanceado y desbalanceado, teniendo en cuenta diferentes series de viento.

Capítulo 5

En este capítulo se presentan las conclusiones del presente trabajo de grado.

Capítulo 6

Este capítulo se presentan los apéndices correspondientes a este trabajo de grado.

Capítulo 2

Modelo matemático de una máquina de inducción

2.1. Introducción

Las ecuaciones que representan la dinámica[3], de una máquina de inducción se pueden presentar en dos marcos de referencia, el marco de referencia natural ABC/abc o en el sistema $dq0$. El primer caso es válido cuando se desean estudiar sistemas desbalanceados, el segundo permite simplificar el modelo matemático, basado en la teoría de R.H. Park [1].

2.1.1. Sistema de ecuaciones en el marco de referencia natural

Las ecuaciones para este modelo[3], se derivan suponiendo que la máquina tiene una geometría simétrica, el flujo del entre hierro de la máquina es sinusoidal y se desprecia la saturación al igual que las pérdidas en el núcleo. La dinámica del generador se obtiene al establecer las ecuaciones eléctricas del circuito de la figura (2.1), que se describen en la ecuación (2.1) donde:

- $V_A \dots \dots \dots V_C$: Tensión de fase del bobinado del estator y el rotor
- $I_A \dots \dots \dots I_C$: Corrientes en el bobinado del estator
- $\psi_A \dots \dots \dots \psi_C$: Flujos magnéticos presentes en los bobinados del estator y el rotor

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \\ \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix}$$

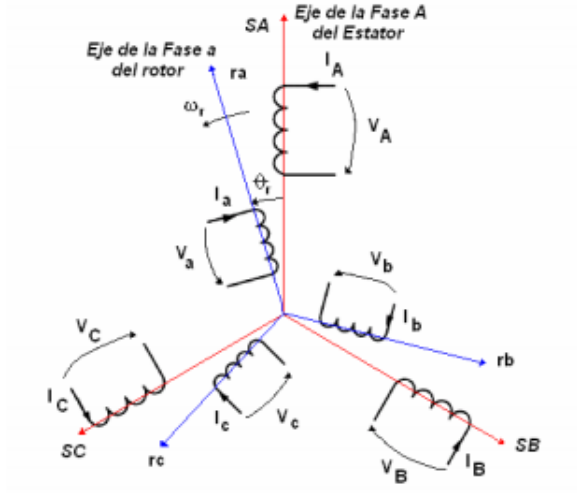


Figura 2.1: Generador de inducción en coordenadas ABC [3]

La relación entre el flujo y la corriente, a través de la bobina está dada por la ecuación (2.1) donde:

L_s : Inductancia del bobinado del estator

L_r : Inductancia del bobinado de rotor

L_m : Inductancia mutua

$$[\psi] = [L] [I] \quad (2.1)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{ss} & 0 & 0 & \frac{2}{3}L_m f_1 & \frac{2}{3}L_m f_2 & \frac{2}{3}L_m f_3 \\ 0 & L_{ss} & 0 & \frac{2}{3}L_m f_3 & \frac{2}{3}L_m f_1 & \frac{2}{3}L_m f_2 \\ 0 & 0 & L_{ss} & \frac{2}{3}L_m f_2 & \frac{2}{3}L_m f_3 & \frac{2}{3}L_m f_1 \\ \frac{2}{3}L_m f_1 & \frac{2}{3}L_m f_3 & \frac{2}{3}L_m f_2 & L_{rr} & 0 & 0 \\ \frac{2}{3}L_m f_2 & \frac{2}{3}L_m f_1 & \frac{2}{3}L_m f_3 & 0 & L_{rr} & 0 \\ \frac{2}{3}L_m f_3 & \frac{2}{3}L_m f_2 & \frac{2}{3}L_m f_1 & 0 & 0 & L_{rr} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$L_{ss} = L_s + L_m \quad (2.3)$$

$$L_{rr} = L_r + L_m \quad (2.4)$$

$$f_1 = \cos(\theta_r), f_2 = \cos(\theta_r + \frac{2\Pi}{3}), f_3 = \cos(\theta_r - \frac{2\Pi}{3}) \quad (2.5)$$

Para representar el modelo dinámico, en función de las corrientes del estator y el rotor, como variables de estado, se sigue la ecuación (2.6), donde:

w_r : Velocidad eléctrica del rotor

$[L]^{-1}$: Inversa de la matriz L definida por la ecuación (2.7)

$\frac{d}{d\theta_r}[L]$: Razón de cambio de la inductancia con relación al desplazamiento angular

definido en la ecuación:

$$\frac{d}{dt} [I] = - [L]^{-1} \left\{ [R] + w_r \frac{d}{d\theta_r} [L] \right\} [I] + [L]^{-1} [V] \quad (2.6)$$

$$[L]^{-1} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} & b_{16} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} & b_{26} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} & b_{36} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} & b_{46} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} & b_{56} \\ b_{61} & b_{62} & b_{63} & b_{64} & b_{65} & b_{66} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$b_{11} = b_{22} = b_{33} = \frac{4L_{SS}L_{RR} - 3L_{aA}^2}{L_{SS}(4L_{SS}L_{RR} - 9L_{aA}^2)}$$

$$b_{44} = b_{55} = b_{66} = \frac{4L_{SS}L_{RR} - 3L_{aA}^2}{L_{RR}(4L_{SS}L_{RR} - 9L_{aA}^2)}$$

$$b_{12} = b_{13} = b_{21} = b_{23} = b_{31} = b_{32} = \frac{-3L_{aA}^2}{L_{SS}(4L_{SS}L_{RR} - 9L_{aA}^2)}$$

$$b_{45} = b_{46} = b_{54} = b_{56} = b_{64} = b_{65} = \frac{-3L_{aA}^2}{L_{RR}(4L_{SS}L_{RR} - 9L_{aA}^2)}$$

$$b_{14} = b_{25} = b_{36} = b_{41} = b_{52} = b_{63} = \frac{-4L_{aA}^2 f_1}{(4L_{SS}L_{RR} - 9L_{aA}^2)}$$

$$b_{15} = b_{26} = b_{34} = b_{43} = b_{51} = b_{62} = \frac{-3L_{aA}^2 f_2}{L_{SS}(4L_{SS}L_{RR} - 9L_{aA}^2)}$$

$$b_{16} = b_{24} = b_{35} = b_{42} = b_{53} = b_{61} = \frac{-3L_{aA}^2 f_3}{L_{SS}(4L_{SS}L_{RR} - 9L_{aA}^2)}$$

$$L_{aA} = \frac{2}{3}L_m$$

$$\frac{d}{d\theta_r} [L] = -\frac{2}{3}L_m \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & g_1 & g_2 & g_3 \\ 0 & 0 & 0 & g_3 & g_1 & g_2 \\ 0 & 0 & 0 & g_2 & g_3 & g_1 \\ g_1 & g_3 & g_2 & 0 & 0 & 0 \\ g_2 & g_1 & g_3 & 0 & 0 & 0 \\ g_3 & g_2 & g_1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$g_1 = \cos(\theta_r), g_1 = \cos\left(\theta_r + \frac{2\Pi}{3}\right), g_1 = \cos\left(\theta_r - \frac{2\Pi}{3}\right) \quad (2.9)$$

El par electromagnético, en función de la corriente del estator y el rotor se define por la ecuación (2.10), donde P_f es el número de polos

$$A = (I_A I_a + I_B I_b + I_C I_c) \sin \theta_r$$

$$B = (I_A I_b + I_B I_c + I_C I_a) \sin(\theta_r + \frac{2\Pi}{3})$$

$$C = (I_A I_c + I_B I_a + I_C I_b) \sin(\theta_r - \frac{2\Pi}{3})$$

$$T_e = -\frac{2}{3} P_f L_m \{A + B + C\} \quad (2.10)$$

2.1.2. Ecuaciones en el sistema de referencia $dq0$

La matriz de inductancias de la ecuación (2.2), se encuentra en función de la velocidad del rotor, por lo tanto los coeficientes de la ecuación de estados varían con el tiempo, excepto cuando la máquina alcanza su condición de reposo. Con el fin de obtener un sistema invariante en el tiempo, se realiza la transformación a un sistema de coordenadas que rote a la velocidad de sincronismo w_s , conocida como la transformación de Park [1]. Se seleccionan dos ejes, el eje directo d y el de cuadratura q como se ve en la figura (2.2). El eje q se asume noventa grados adelantado con respecto al eje d en la dirección de rotación.

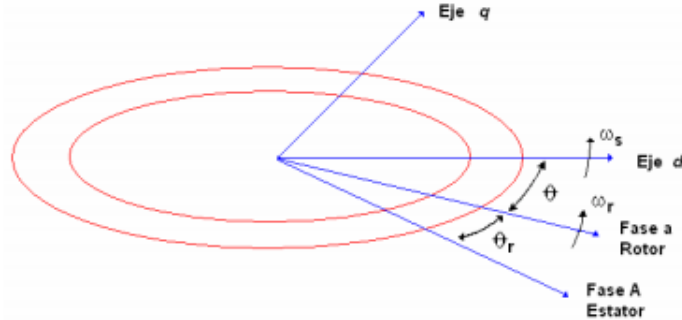


Figura 2.2: Generador de inducción en coordenadas $dq0$ [3]

La matriz de transformación de las corrientes del estator a los ejes d y q se obtienen con la ecuación (2.11).

$$I_{ds} = \frac{2}{3} \left[I_A \cos(w_s t) + I_B \cos(w_s t - \frac{2\Pi}{3}) + I_C \cos(w_s t + \frac{2\Pi}{3}) \right] \quad (2.11)$$

$$I_{qs} = -\frac{2}{3} \left[I_A \sin(w_s t) + I_B \sin(w_s t - \frac{2\Pi}{3}) + I_C \sin(w_s t + \frac{2\Pi}{3}) \right]$$

La transformada inversa viene dada por la ecuación (2.12).

$$I_A = I_{ds} \cos(w_s t) - I_{qs} \sin(w_s t)$$

$$I_B = I_{ds} \cos(w_s t - \frac{2\Pi}{3}) - I_{qs} \sin(w_s t - \frac{2\Pi}{3}) \quad (2.12)$$

$$I_C = I_{ds} \cos(w_s t + \frac{2\Pi}{3}) - I_{qs} \sin(w_s t + \frac{2\Pi}{3})$$

La transformación para la corriente del rotor está dada por la ecuación (2.13), donde θ es el ángulo por el cual el eje d adelanta al eje de la fase a del rotor, como se ve en la figura (2.2), y está definido por la ecuación (2.14).

$$I_{dr} = \frac{2}{3} \left[I_a \cos(w_s t) + I_b \cos(w_s t - \frac{2\Pi}{3}) + I_c \cos(w_s t + \frac{2\Pi}{3}) \right]$$

$$I_{qr} = -\frac{2}{3} \left[I_a \sin(w_s t) + I_b \sin(w_s t - \frac{2\Pi}{3}) + I_c \sin(w_s t + \frac{2\Pi}{3}) \right] \quad (2.13)$$

$$\theta = w_s t - \theta_r$$

$$\frac{d\theta}{dt} = w_s - \frac{d\theta_r}{dt} = w_s - w_r \quad (2.14)$$

θ_r Se define como el ángulo por el cual el eje de la fase a del rotor, adelanta al eje de la fase a del estator. La transformación inversa está dada por la ecuación (2.15).

$$I_a = I_{dr} \cos(\theta) - I_{qr} \sin(\theta)$$

$$I_b = I_{dr} \cos(\theta - \frac{2\Pi}{3}) - I_{qr} \sin(\theta - \frac{2\Pi}{3})$$

$$I_c = I_{dr} \cos(\theta + \frac{2\Pi}{3}) - I_{qr} \sin(\theta + \frac{2\Pi}{3}) \quad (2.15)$$

Las ecuaciones para la tensión del bobinado del estator y el rotor, al aplicar la transformada de Park, están dadas por la ecuación (2.16) .

$$[V] = [R] [I] \frac{d}{dt} [\psi] + [\Omega] [\psi] \quad (2.16)$$

$$\begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -w_s & 0 & 0 \\ w_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -w_s - w_r \\ 0 & 0 & w_s - w_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix}$$

La relación entre el flujo magnético y la corriente está dada por la ecuación (2.17). Si las corrientes se seleccionan como variables de estado, la ecuación que representa la dinámica de la máquina de inducción está dada por las ecuaciones (2.18) y (2.19).

El par electromagnético y la potencia que suministra la máquina, en el bobinado del estator en función de estas variables de estado se encuentran definidas por las ecuaciones (2.20) y (2.21) respectivamente.

$$[\psi] = [L] [I]$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{ss} & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_{ss} & 0 & L_{ss} \\ L_m & 0 & L_{rr} & 0 \\ 0 & L_{ss} & 0 & L_{rr} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$L_{ss} = L_s + L_m$$

$$L_{rr} = L_r + L_m$$

$$\frac{d}{dt} [I] = -([L]^{-1} [R] + [L]^{-1} [\Omega] [L]) [I] + [L]^{-1} [V] \quad (2.18)$$

$$[L]^{-1} = \frac{1}{L_{rr}L_{ss} - L_m^2} \begin{bmatrix} L_{rr} & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_{rr} & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_{ss} & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_{ss} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P_f L_m (I_{qs} I_{dr} - I_{ds} I_{qr}) \quad (2.20)$$

$$S = P_{acti} + JQ_{react} = \frac{3}{2} (V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) + J \frac{3}{2} (V_{ds} I_{ds} - V_{qs} I_{qs}) \quad (2.21)$$

Capítulo 3

Modelo matemático de una la línea de transmisión corta

3.1. Introducción

La línea de transmisión es un elemento de las redes eléctricas, constituyéndose en el camino a través del cual fluye la energía eléctrica, desde los centros de generación hasta los centros de consumo. La transmisión de esta energía se puede hacer por corriente alterna (AC) o por corriente directa (DC), y de acuerdo con las características de diseño esta puede ser de transmisión aérea o subterránea.

La capacidad de transporte de una línea está relacionada con la longitud y con la tensión de la misma. Para determinada longitud, la capacidad de transporte varía con el cuadrado de la tensión. Esto quiere decir que cuanto mayor sea la capacidad de transporte o la longitud de la línea, mayor deberá ser la tensión de transmisión.

3.2. Cálculo de los parámetros de la línea

3.2.1. Cálculo de la resistencia

El cálculo de la resistencia se basa en los datos de las tablas que proporcionan los fabricantes con las principales características de los conductores.

r : Resistencia por unidad de longitud y por fase. ($\Omega/km - fase$)

L : Longitud de la línea en km

$$R = rL \quad (3.1)$$

3.2.2. Cálculo de la reactancia inductiva

Para calcular la reactancia inductiva es necesario calcular con anterioridad el radio medio geométrico, así como la distancia media geométrica entre los conductores de la línea, la distancia media depende directamente de la disposición de los conductores como se muestra en la figura (3.1). La distancia media entre los conductores de una línea simple esta dada por la ecuación (3.2). El cálculo de la distancia media geométrica propia para una configuración sencilla está dada por la ecuación (3.3).

$$Dm = \sqrt[3]{D_{12}D_{13}D_{23}} \quad (3.2)$$

$$D_S = \sqrt[3]{D_{Sa}D_{Sb}D_{Sc}} \quad (3.3)$$

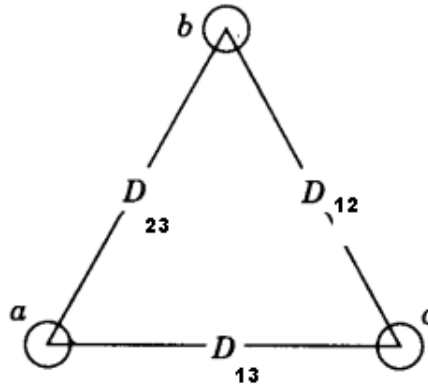


Figura 3.1: Conductores dispuestos en triángulo

En el caso de la disposición triangular figura (3.1), la distancia media geométrica es igual a D dado que los conductores están igualmente espaciados. En el caso de una disposición horizontal la distancia media entre conductores es $Dm = 1,26D$.

Luego la reactancia inductiva esta dada por :

$$X_l = 0,0754 \ln\left(\frac{Dm}{D_s}\right) \quad (3.4)$$

3.2.3. Cálculo de la susceptancia capacitiva

La susceptancia capacitiva está dada por la ecuación (3.5), que relaciona los valores de la distancia media geométrica con la distancia media geométrica propia, donde.

D_m : Distancia media geométrica

D_s : Distancia media geométrica propia

C : Valor de la capacitancia

$$C = \left[18 \exp 9 \ln \left(\frac{D_m}{D_s} \right) \right]^{-1} \quad (3.5)$$

3.3. Línea corta

3.3.1. Modelo circuital de la línea

Se clasifica como línea corta [5], a todas aquellas líneas cuya longitud sea menor o igual a $80km$. el circuito que define la línea se muestra en la figura (3.2).

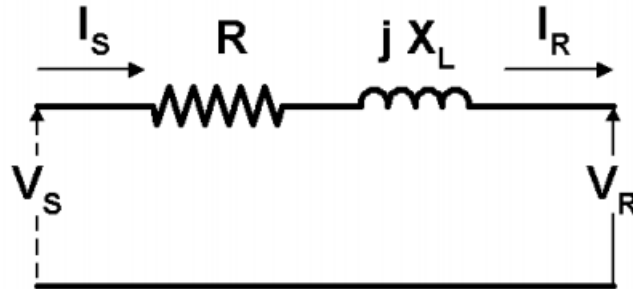


Figura 3.2: Circuito equivalente de una línea corta [5]

Donde I_s y V_s representan los valores de corriente y de tensión en el extremo generador, mientras que I_R y V_R son los valores presentes en el extremo receptor. El cálculo de los parámetros de la línea usados en este trabajo de grado se encuentran en el apéndice B.

3.3.2. Línea no transpuesta

En la figura(3.3) se muestra un sistema con tres impedancias serie desiguales Z_a , Z_b , Z_c . Si se supone que no hay inductancia mutua entre las tres impedancias, las caídas de tensión en la parte mostrada del sistema están dadas por la ecuación matricial.

$$\begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \\ V_{cc'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

y en términos de las componentes simétricas de tensión y corriente.

$$A \begin{bmatrix} V_{aa'}^{(0)} \\ V_{aa'}^{(1)} \\ V_{aa'}^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & 0 & 0 \\ 0 & Z_b & 0 \\ 0 & 0 & Z_c \end{bmatrix} A \begin{bmatrix} I_a^{(0)} \\ I_b^{(1)} \\ I_c^{(2)} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

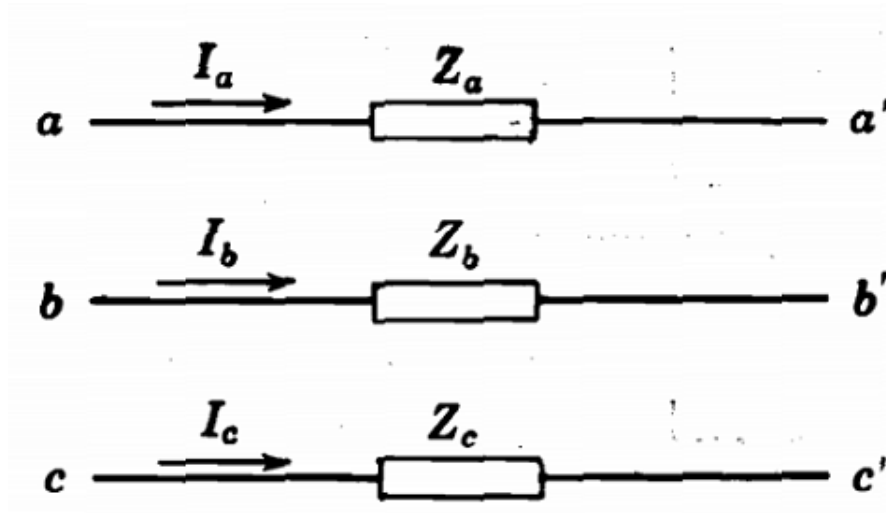


Figura 3.3: Sistema impedancias serie desiguales [9].

Donde A es la matriz definida en la ecuación(3.8). Al premultiplicar ambos lados de la ecuación por A^{-1} , se obtiene la ecuación matricial de la cual.

$$\begin{aligned}
 V_{aa}^{(0)} &= \frac{1}{3}I_a^{(0)}(Z_a + Z_b + Z_c) + \frac{1}{3}I_a^{(1)}(Z_a + a^2Z_b + aZ_c) + \frac{1}{3}I_a^{(2)}(Z_a + aZ_b + a^2Z_c) \\
 V_{aa}^{(1)} &= \frac{1}{3}I_a^{(0)}(Z_a + aZ_b + a^2Z_c) + \frac{1}{3}I_a^{(1)}(Z_a + Z_b + Z_c) + \frac{1}{3}I_a^{(2)}(Z_a + a^2Z_b + aZ_c) \quad (3.9) \\
 V_{aa}^{(2)} &= \frac{1}{3}I_a^{(0)}(Z_a + a^2Z_b + aZ_c) + \frac{1}{3}I_a^{(1)}(Z_a + aZ_b + a^2Z_c) + \frac{1}{3}I_a^{(2)}(Z_a + Z_b + Z_c)
 \end{aligned}$$

La ecuación(3.9) muestra que la caída de tensión de cualquier secuencia es dependiente de las corrientes de las tres secuencias. Asi se concluye que las componentes simétricas de corrientes desbalanceadas que fluyen hacia una carga balanceada o hacia una impedancia serie balanceada, producen caídas de tensión de la misma secuencia.

Dado que no se tendra en cuenta el efecto de la transposición como solución al desbalance de tensión, el modelo presentado anteriormente cumple con las características para simular dicho comportamiento.Teniendo en cuenta que se hara para una línea de alimentación con una longitud menor a 80 *Km* razon por la cual se opto por el modelo de línea corta como el que se observa en la figura(3.2).

Capítulo 4

Análisis del comportamiento del generador de inducción ante desbalances en la alimentación.

En este capítulo se hace un análisis de la máquina de inducción con alimentación balanceada y desbalanceada, a fin de comparar los dos casos, mediante el análisis de las curvas obtenidas en las simulaciones de la máquina en Matlab y ATP. En los apéndices D y E se muestra la forma en que se utiliza el manual del usuario.

El estudio de la máquina de inducción se dividirá en dos casos:

1. *Funcionamiento como motor*: Es el funcionamiento más habitual de este tipo de máquinas y corresponde al rango de velocidades entre 0 y la velocidad de sincronismo
2. *Funcionamiento como generador*: Este régimen de operación se produce a velocidades superiores a la velocidad de sincronismo, es decir, con deslizamiento negativo. En este caso, la máquina recibe energía mecánica de un motor externo, una turbina eólica en este caso, que gira a una velocidad superior a la de sincronismo, entregando potencia a la red a través del estator

En las figuras (4.1) y (4.2) se ve la variación de la velocidad, y de la potencia activa de la máquina operando como generador. En estas gráficas se puede observar las dos regiones de trabajo de la máquina, se ve que cuando trabaja como generador la velocidad es mayor que la de sincronismo ($188,5 \text{ rad/seg}$), y la potencia activa tiene un valor negativo lo que indica que está siendo devuelta a la red eléctrica.

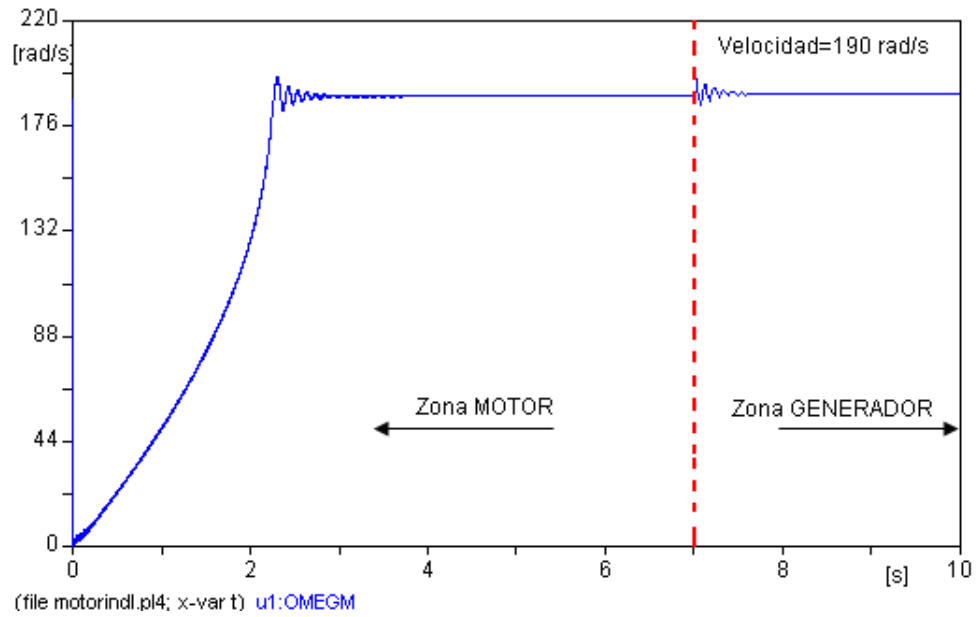


Figura 4.1: Variación de la velocidad en el generador

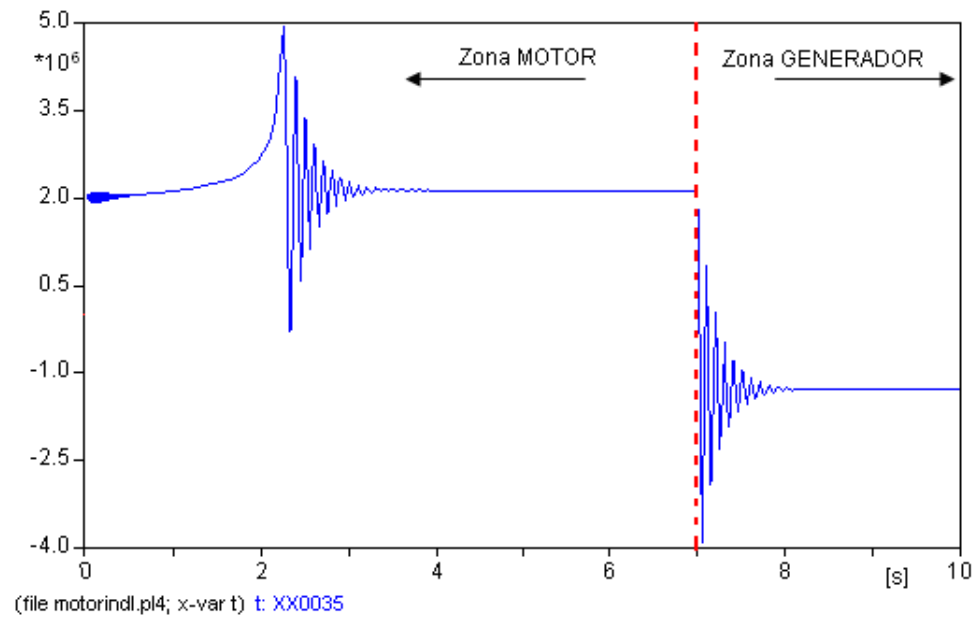


Figura 4.2: Variación de la potencia activa en el generador

4.1. Sistema balanceado

4.1.1. Operación como motor

En la operación como motor, se asumen los parámetros eléctricos de la máquina que se encuentran en el apéndice A , y la máquina se simula en vacío, generando el par necesario para moverse así misma, el cual es muy bajo, como se puede observar en las figuras (4.3),(4.4),(4.5)y (4.6).

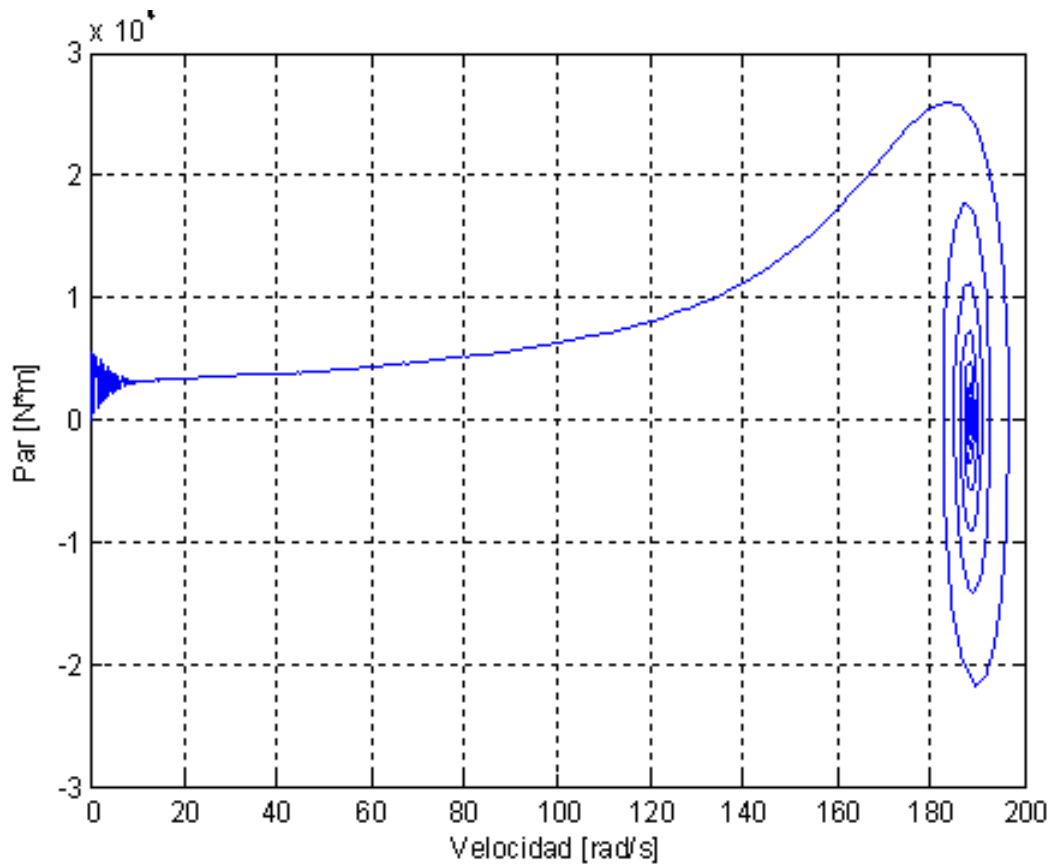


Figura 4.3: Curva velocidad-Par del motor de inducción Matlab

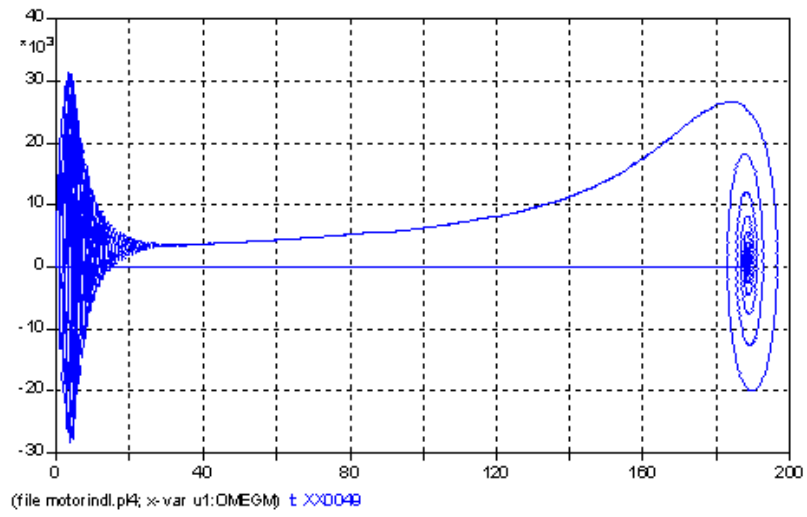


Figura 4.4: Curva velocidad-par del motor de inducción ATP

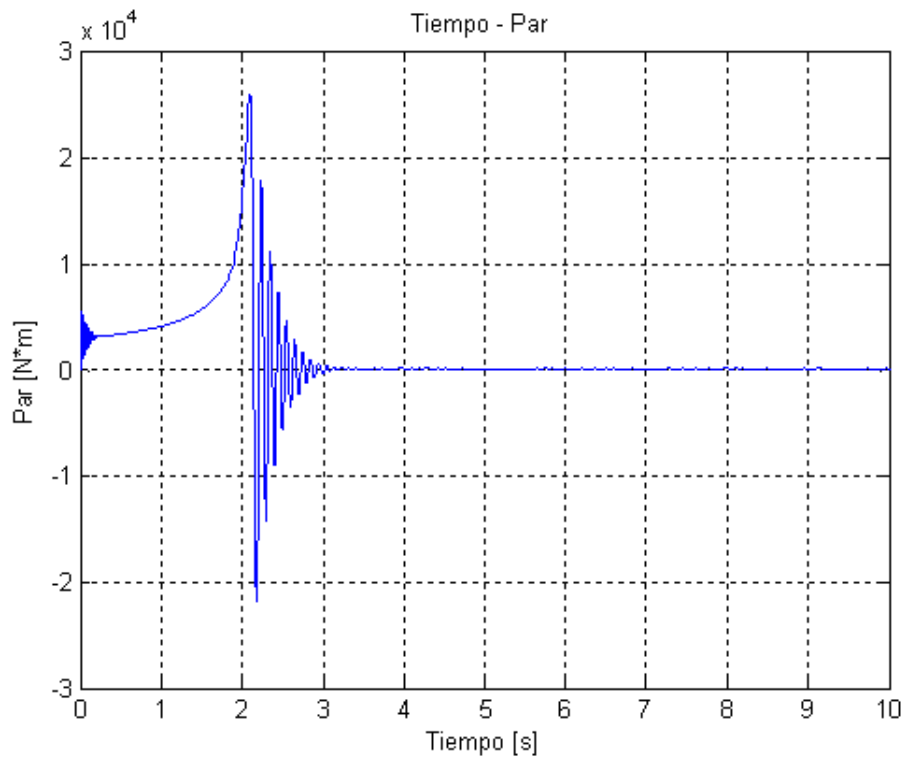


Figura 4.5: Curva tiempo-par del motor de inducción Matlab

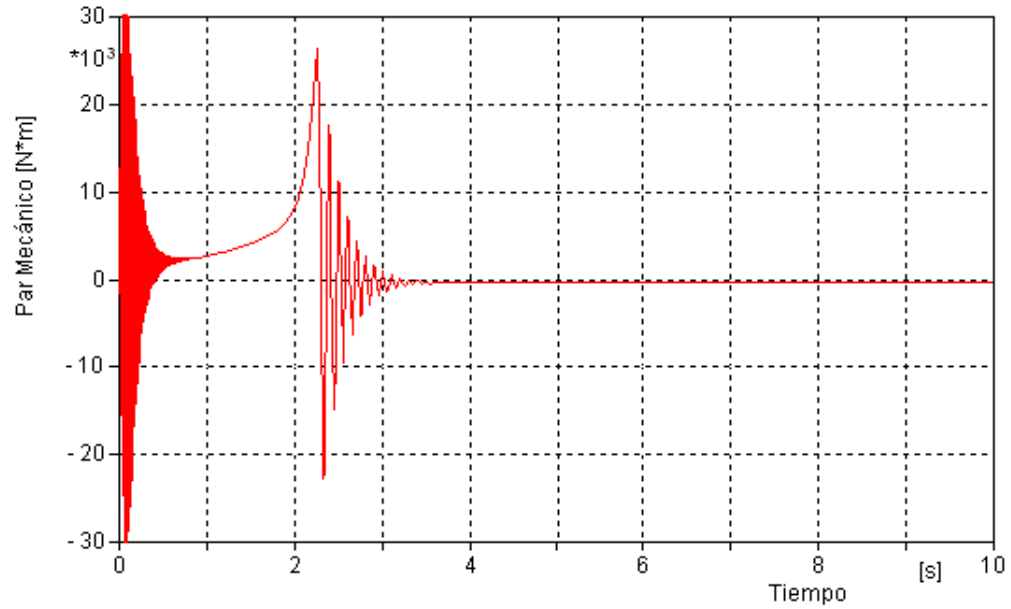


Figura 4.6: Curva tiempo-par motor de inducción ATP

Cuando la máquina trabaja como motor absorbe potencia activa y reactiva, cediendo energía mecánica. Como se encuentra en vacío, la potencia activa entregada es muy baja en comparación con la potencia nominal(2MW), como se observa en las figuras (4.7) y (4.8). En las figuras (4.9) y (4.10)se observa la potencia eléctrica que consume para las condiciones dadas.

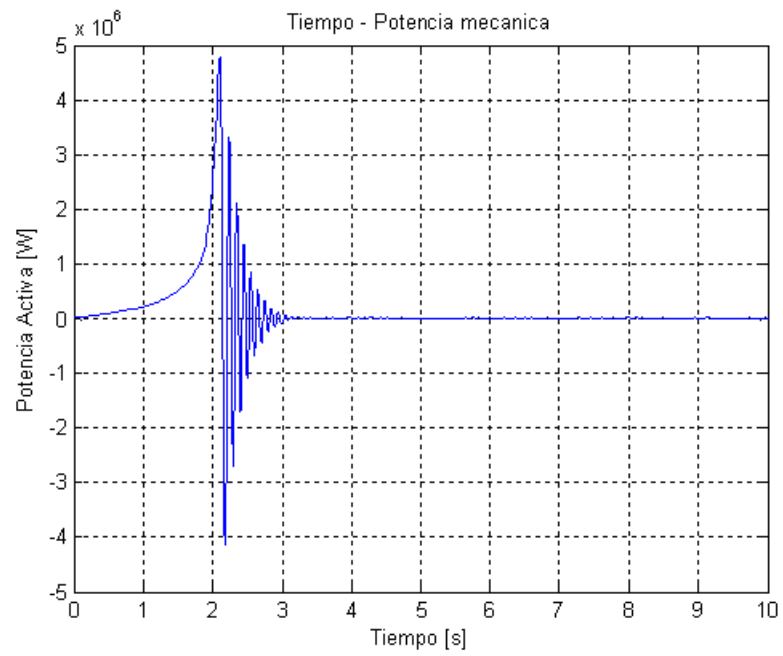


Figura 4.7: Curva tiempo-potencia mecánica del motor de inducción Matlab

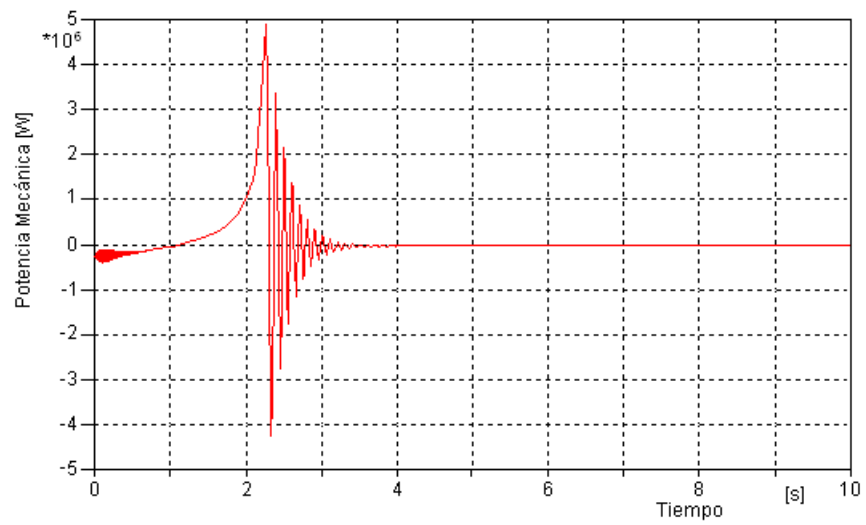


Figura 4.8: Curva tiempo-potencia mecánica del motor de inducción ATP

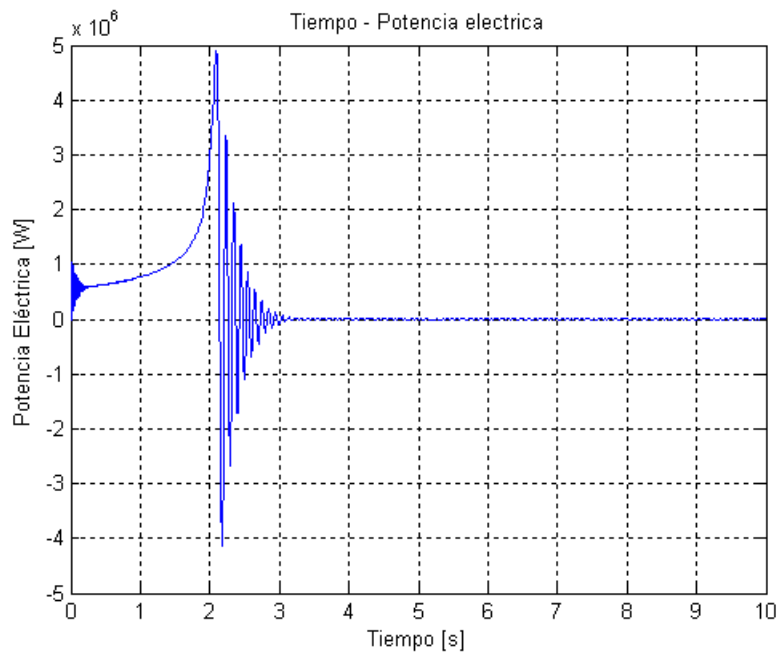


Figura 4.9: Curva tiempo-potencia eléctrica del motor de inducción Matlab

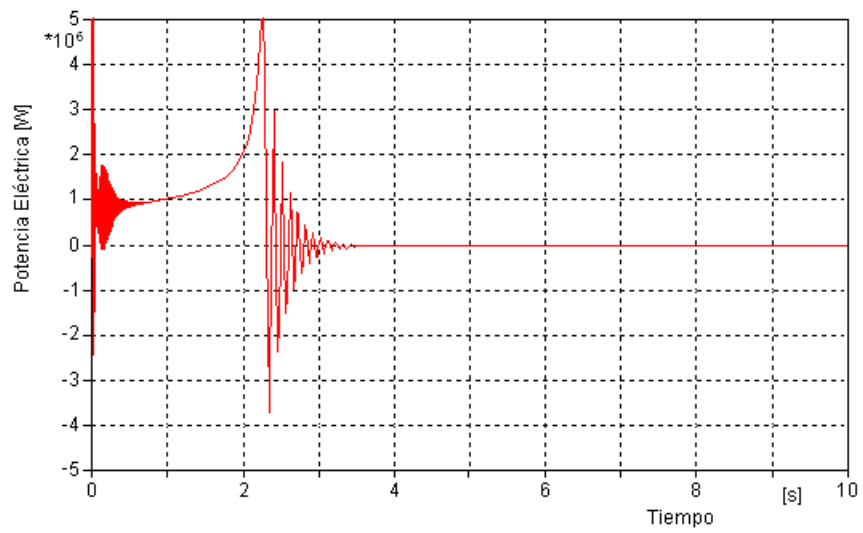


Figura 4.10: Curva tiempo-potencia eléctrica del motor de inducción ATP

La maquina al trabajar como motor absorbe energía reactiva, la cual es mayor en todo momento debido a que se requiere para la excitación magnética, como se ve en las figuras (4.11) y (4.12). Tanto la potencia activa como la reactiva presentan un valor pico elevado, esto se debe al elevado valor de la corriente de arranque, como se muestra en la figura (4.13).

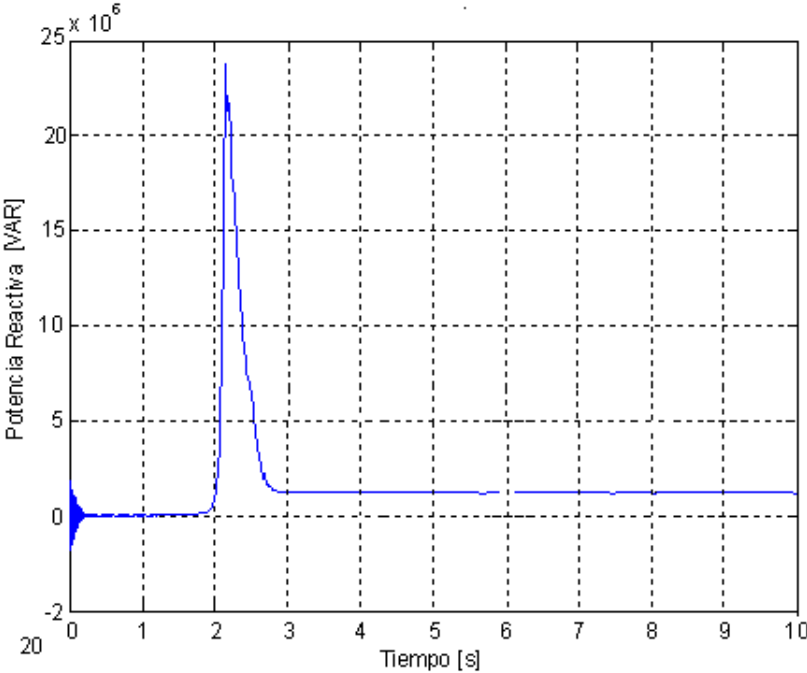


Figura 4.11: Curva tiempo-potencia reactiva del motor de inducción Matlab

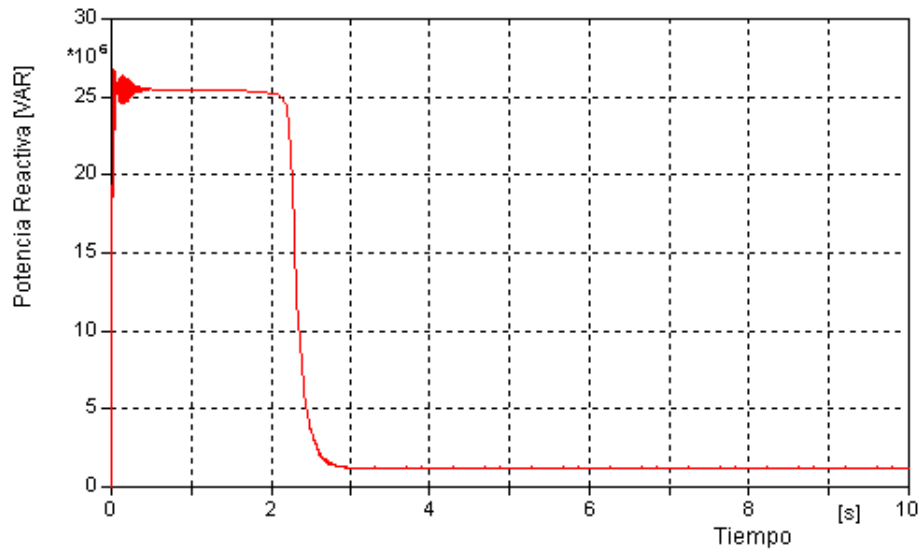


Figura 4.12: Curva tiempo-potencia reactiva del motor de inducción ATP

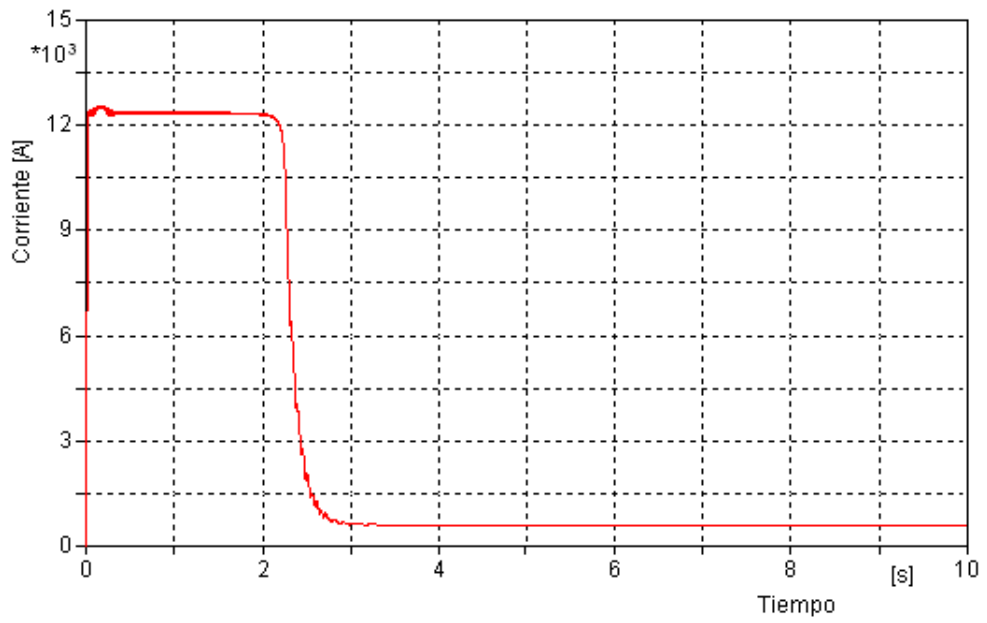


Figura 4.13: Curva tiempo-corriente eficaz en el estator ATP

4.1.2. Operación como generador

Para el estudio del motor de inducción como generador se han realizado varias simulaciones utilizando diferentes series de viento, donde la variación del viento implica el cambio del par mecánico aplicado al generador, lo que lleva al aumento o a la disminución de la potencia eléctrica entregada a la red.

La potencia desarrollada por una turbina eólica está dada por la ecuación (4.1), donde:

ρ : Densidad del aire.

A : Superficie de barrida por las aspas.

V_{tequ} : Velocidad del viento.

C_p : Coeficiente de potencia.

β : Ángulo de ataque de las aspas.

W_r : Velocidad mecánica de la turbina.

R : Radio del aspa.

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_{tequ}^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (4.1)$$

$$\lambda = \frac{W_r R}{V_{tequ}} \quad (4.2)$$

Los parámetros para el cálculo de la potencia se presentan en el apéndice C.

El par aerodinámico se obtiene dividiendo la potencia producida por el viento, P , entre la velocidad del rotor, W_r , como se muestra en la ecuación (4.3).

$$T_{Aer} = \frac{P}{W_r} \quad (4.3)$$

4.1.2.1. Primer caso

La figura (4.14) muestra el comportamiento del viento aplicado a la primera simulación. Este aumenta desde 4m/s hasta 11m/s en cuatro segundos, y se repite de manera periódica. El par depende de la velocidad del viento y el comportamiento de este se observa en las figuras (4.15) y (4.16), donde se ve que aumenta a medida que aumenta la velocidad del viento.

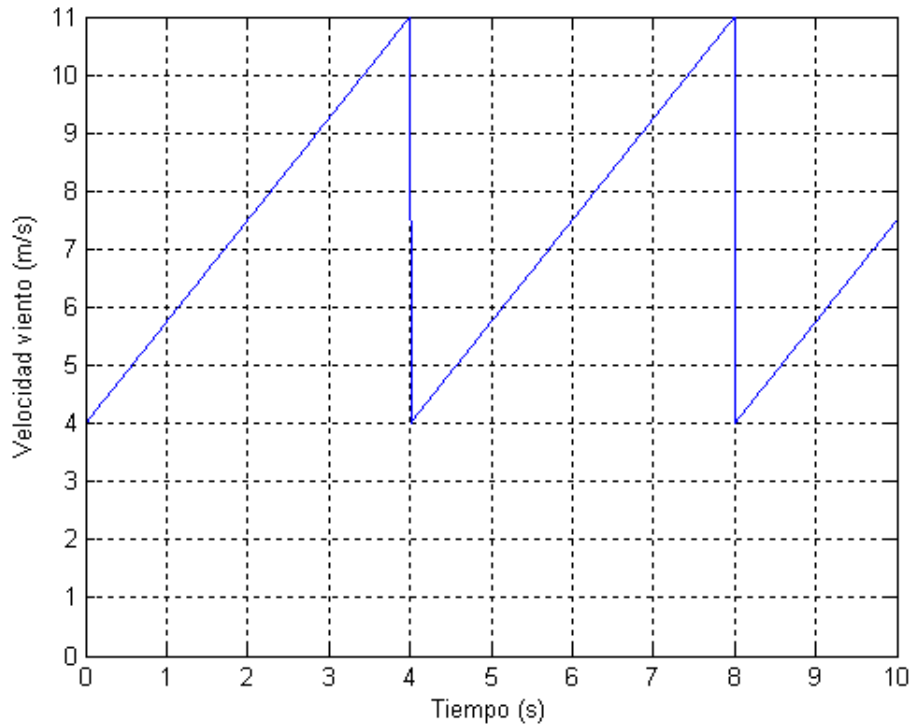


Figura 4.14: Serie de viento 1

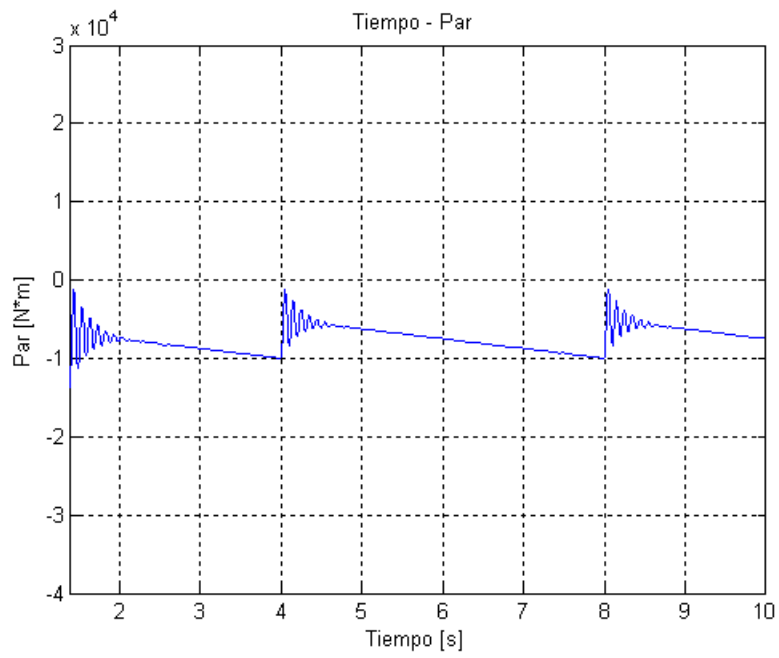


Figura 4.15: Curva tiempo-par generador de inducción Matlab

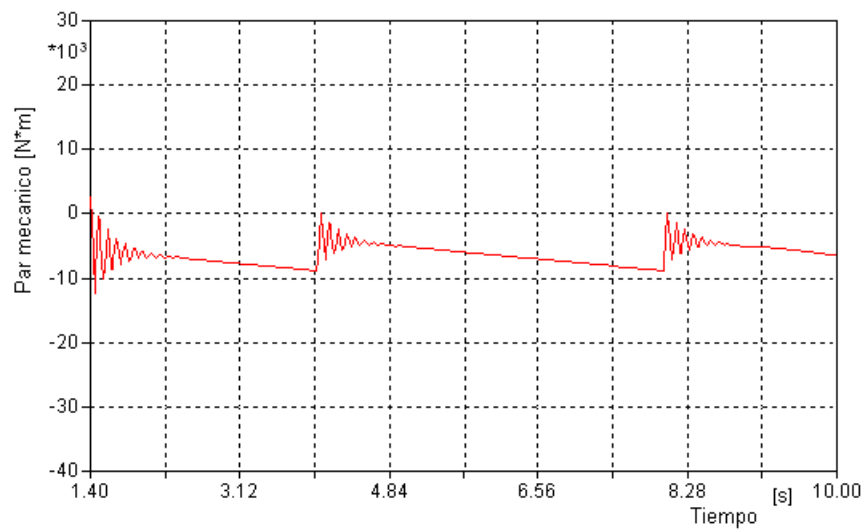


Figura 4.16: Curva tiempo-par generador de inducción ATP

Las figuras (4.17),(4.18),(4.19) y (4.20) presentan las curvas de la potencia eléctrica y mecánica generada ante las variaciones del viento. Obsérvese que los valores son negativos, lo que indica que la máquina está trabajando como generador. Nótese que la potencia eléctrica aumenta de manera directa con respecto al viento aplicado.

Con el tiempo igual a cuatro segundos el viento cae de manera brusca de 11 m/s a 4 m/s , por lo que aparece un transitorio antes de alcanzar el estado estable.

Cuando se opera como generador la máquina consume energía reactiva, la cual recibe de la red a la cual está conectada o de un suministro externo si se encuentra operando de manera aislada. Las figuras (4.21)y (4.22), muestran como a medida que aumenta el viento aplicado también lo hace el consumo de energía reactiva, presentándose un transitorio cuando el par cambia de manera brusca en cuatro y ocho segundos.

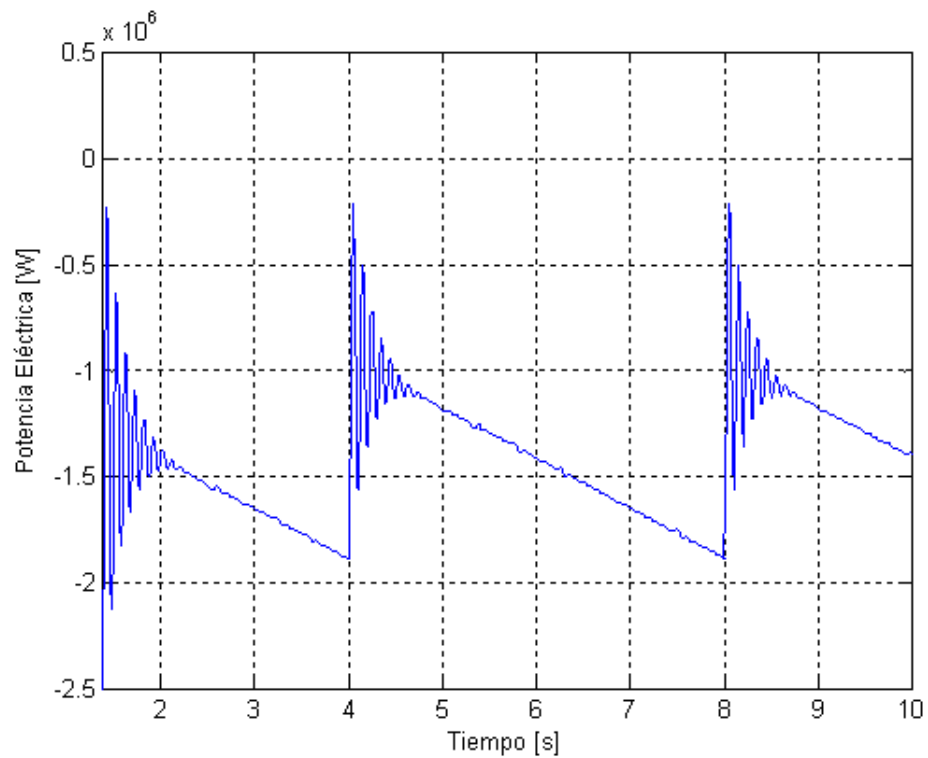


Figura 4.17: Curva tiempo-potencia eléctrica Matlab

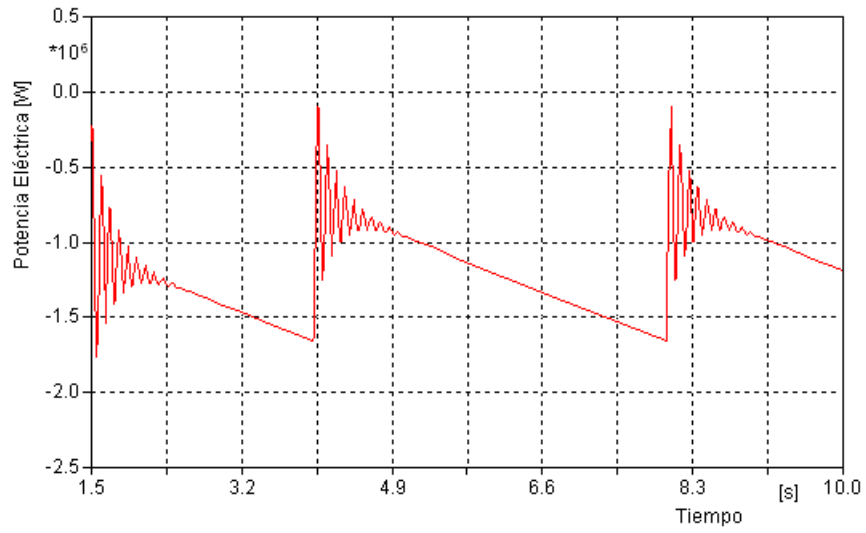


Figura 4.18: Curva tiempo-potencia eléctrica ATP

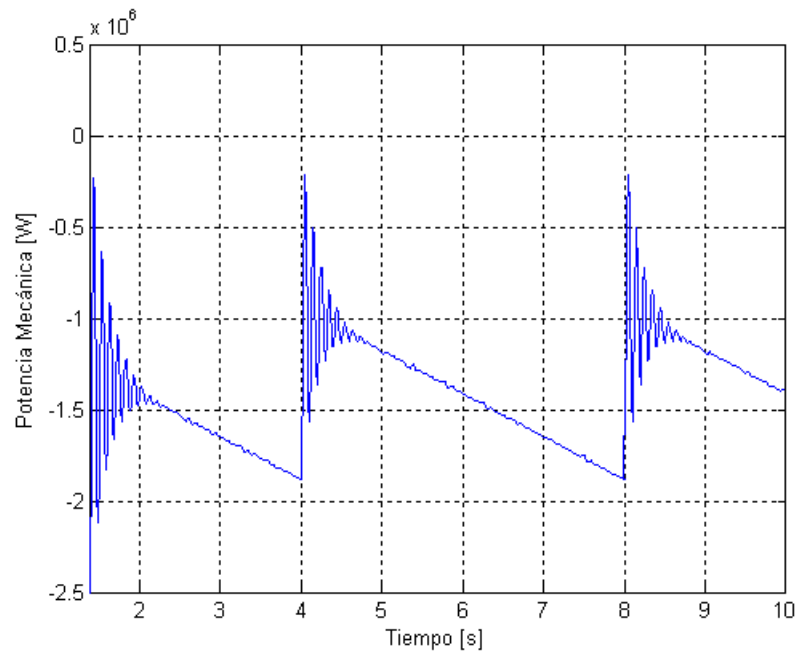


Figura 4.19: Curva tiempo-potencia mecánica Matlab

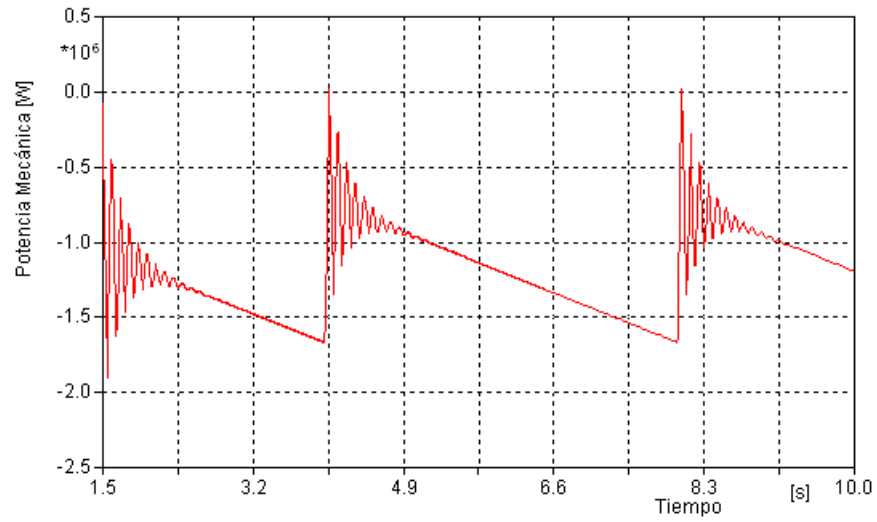


Figura 4.20: Curva tiempo-potencia mecánica ATP

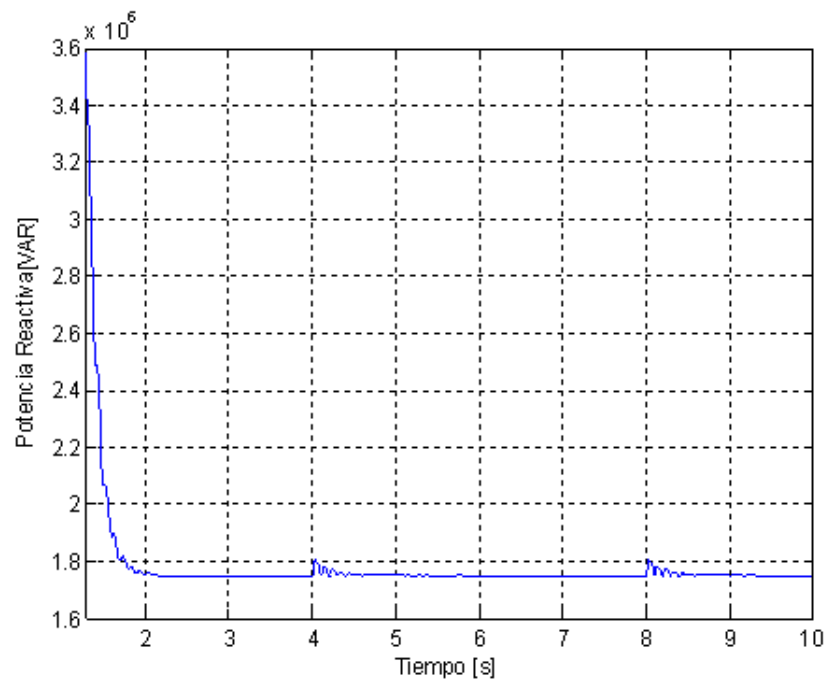


Figura 4.21: Curva tiempo-potencia reactiva Matlab

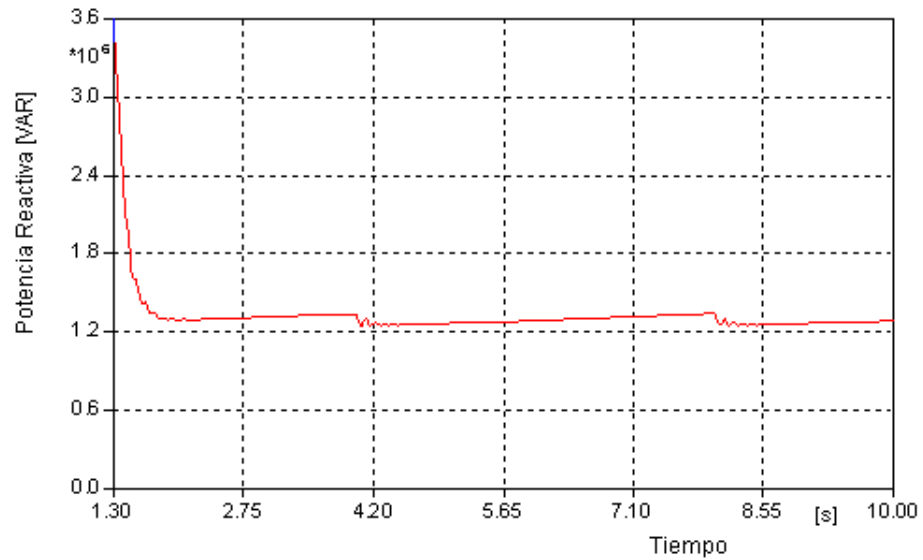


Figura 4.22: Curva tiempo-potencia reactiva ATP

En la figura (4.23), se muestra la gráfica de la tensión en el estator para este caso. En cuanto a la corriente, esta se ve afectada por la variación del viento aplicado. Se puede observar en la grafica (4.24), que a medida que este aumenta la corriente también lo hace, esto se produce por el incremento del viento y porque se mantiene la tensión entre terminales, aumentado la velocidad y por ende el movimiento relativo entre el rotor y el campo magnético del estator, lo que implica una mayor inducción de tensión y por lo tanto un incremento en la corriente.

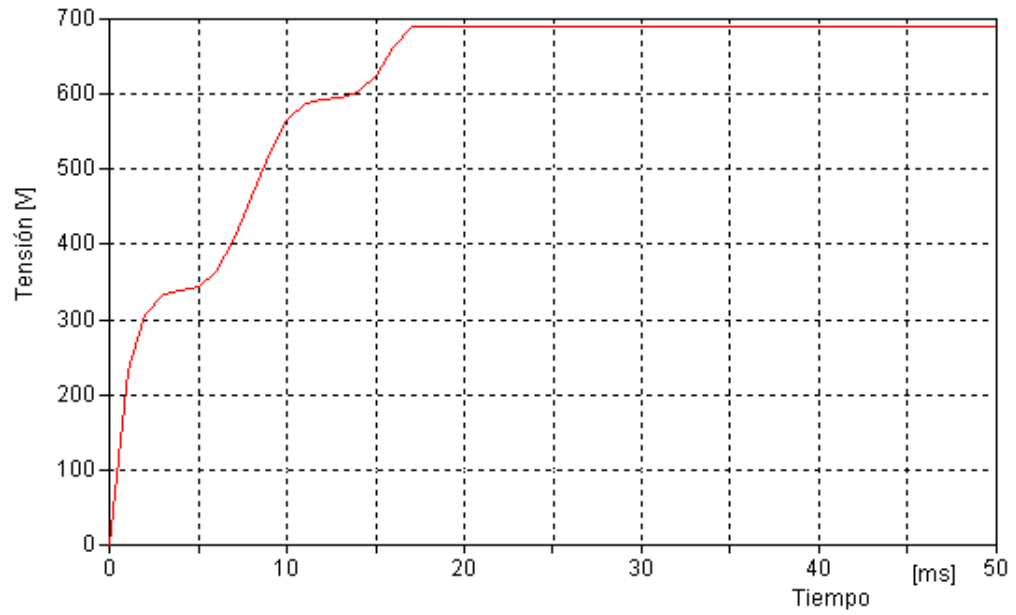


Figura 4.23: Curva tiempo-tensión eficaz en el estator Matlab

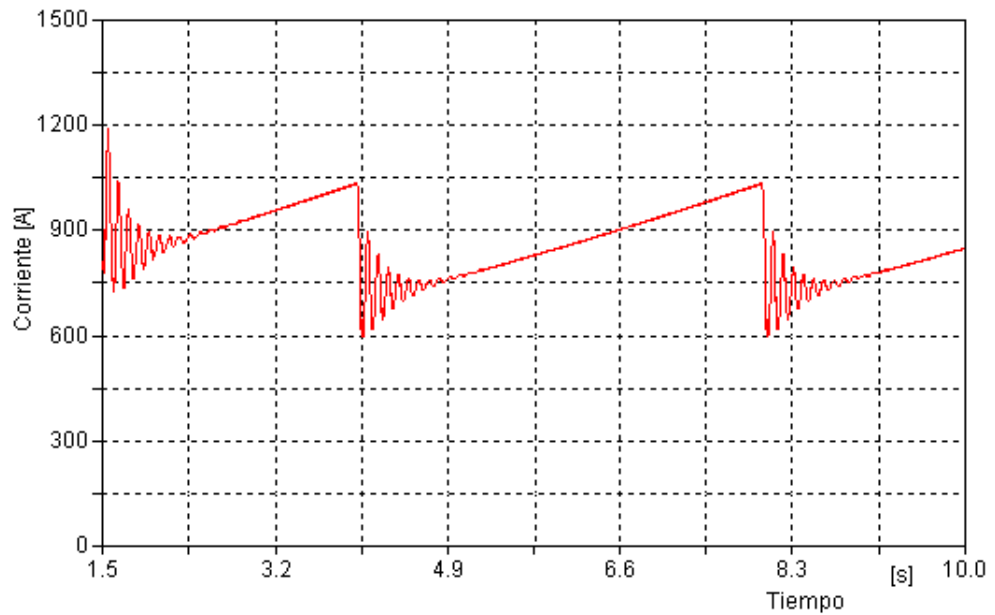


Figura 4.24: Curva tiempo-corriente eficaz en el estator ATP

4.1.2.2. Segundo caso

En la figura (4.25) se observa el comportamiento del viento aplicado a la segunda simulación. Este disminuye de 11 m/s a 4 m/s en un tiempo igual a cuatro segundos y repitiéndose de manera periódica.

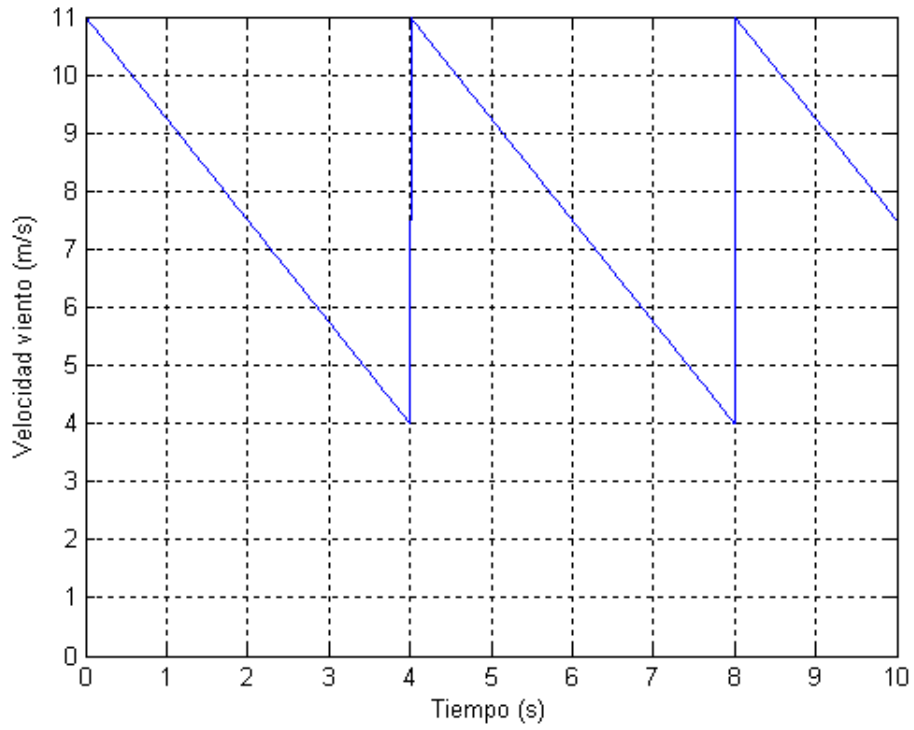


Figura 4.25: Serie de viento 2

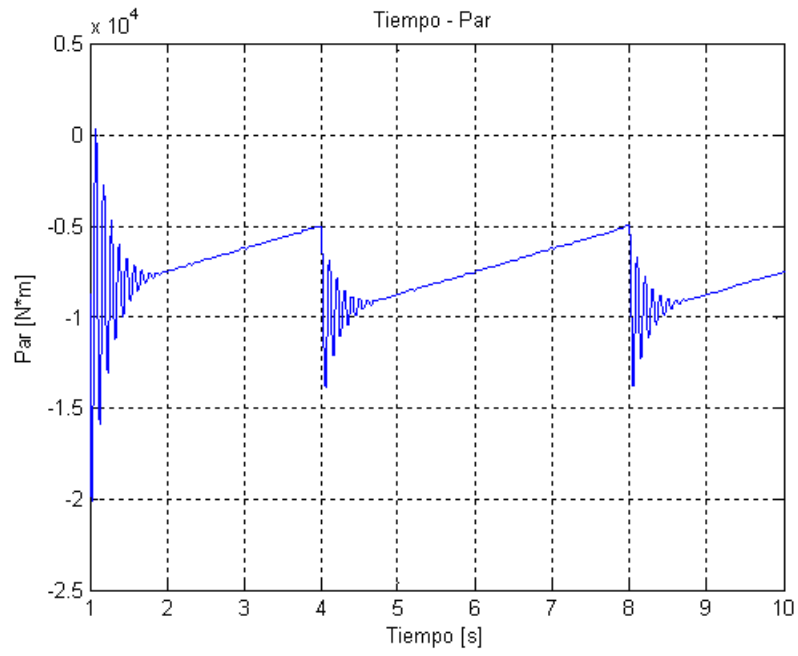


Figura 4.26: Curva tiempo-par del generador de inducción Matlab

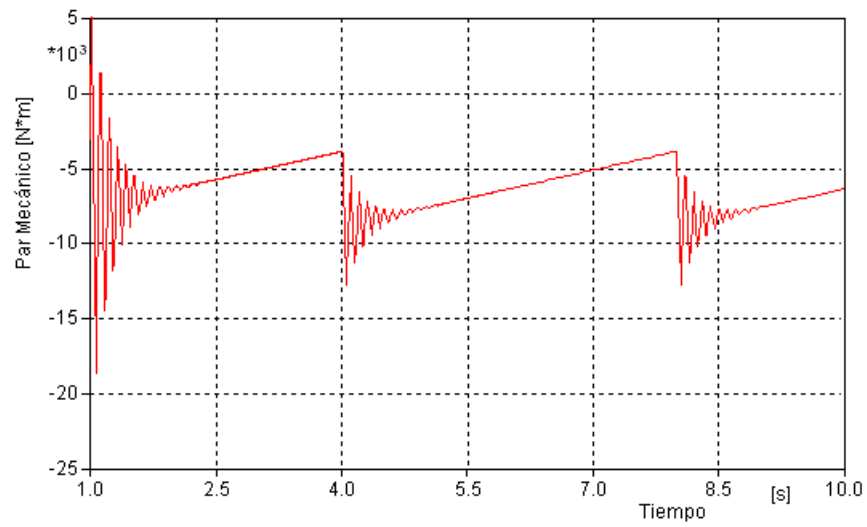


Figura 4.27: Curva tiempo-par del generador de inducción ATP.

Las figuras (4.28),(4.29),(4.30) y (4.31), presentan las curvas de la potencia mecánica y eléctrica, notese que la potencia mecánica disminuye de manera directa con respecto al viento aplicado.

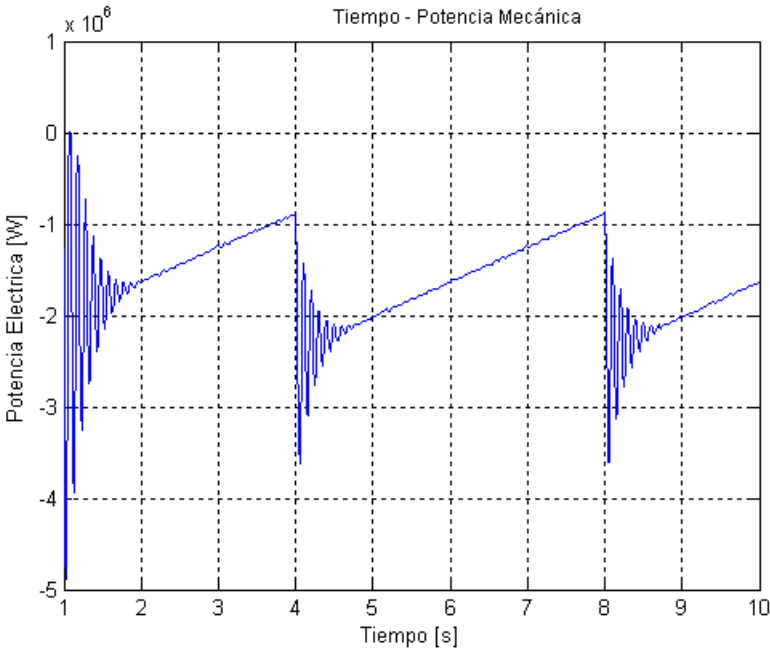


Figura 4.28: Curva tiempo-potencia mecánica Matlab

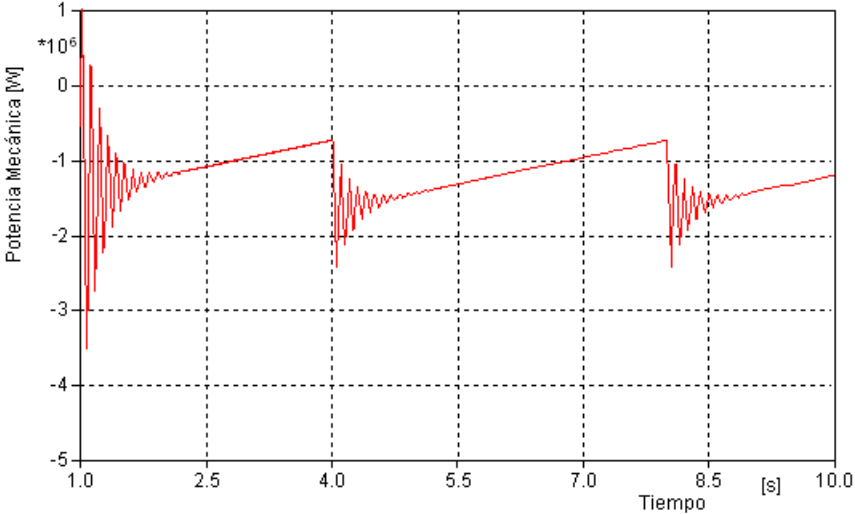


Figura 4.29: Curva tiempo-potencia mecánica ATP

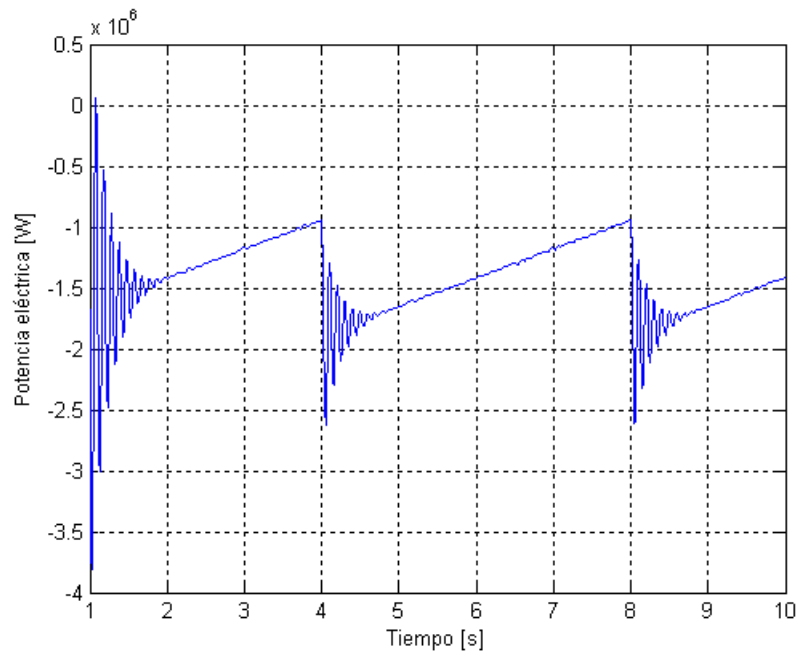


Figura 4.30: Curva tiempo-potencia eléctrica Matlab

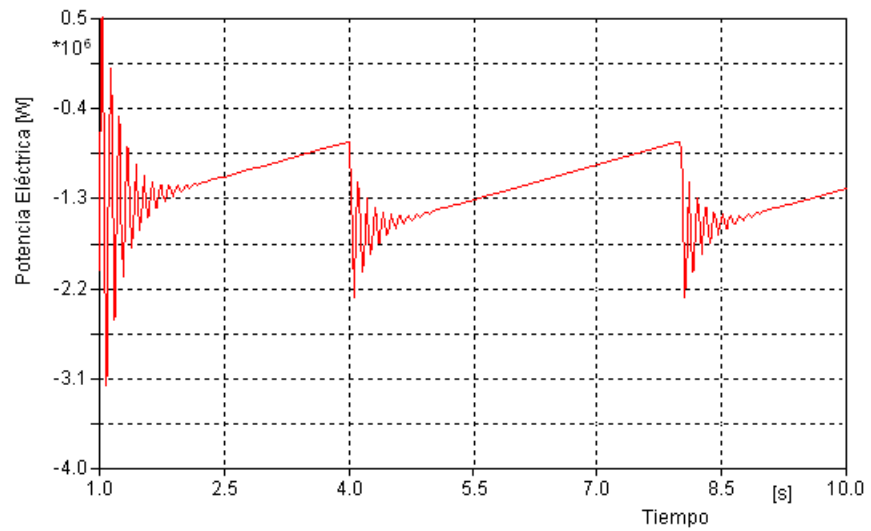


Figura 4.31: Curva tiempo-potencia eléctrica ATP

La potencia activa que se entrega ala red disminuye junto con el viento aplicado, lo que lleva a un menor consumo de energía reactiva como se observa en las figuras (4.32) y (4.33).

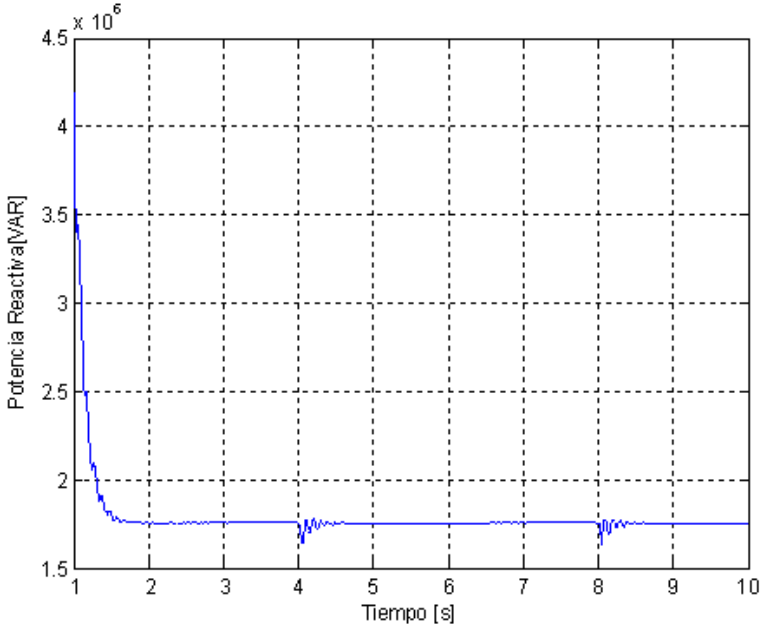


Figura 4.32: Curva tiempo-potencia reactiva Matlab

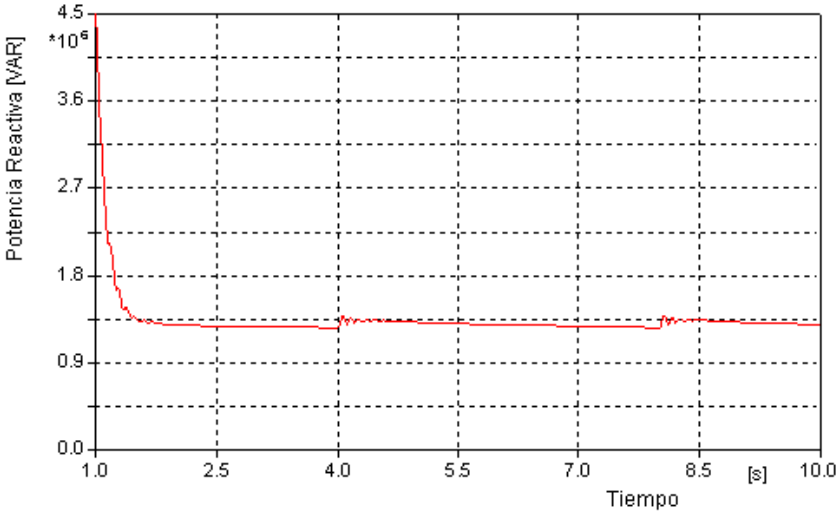


Figura 4.33: Curva tiempo-potencia reactiva ATP

La figura (4.34), muestra el comportamiento de la corriente cuando disminuye la potencia con respecto al viento.

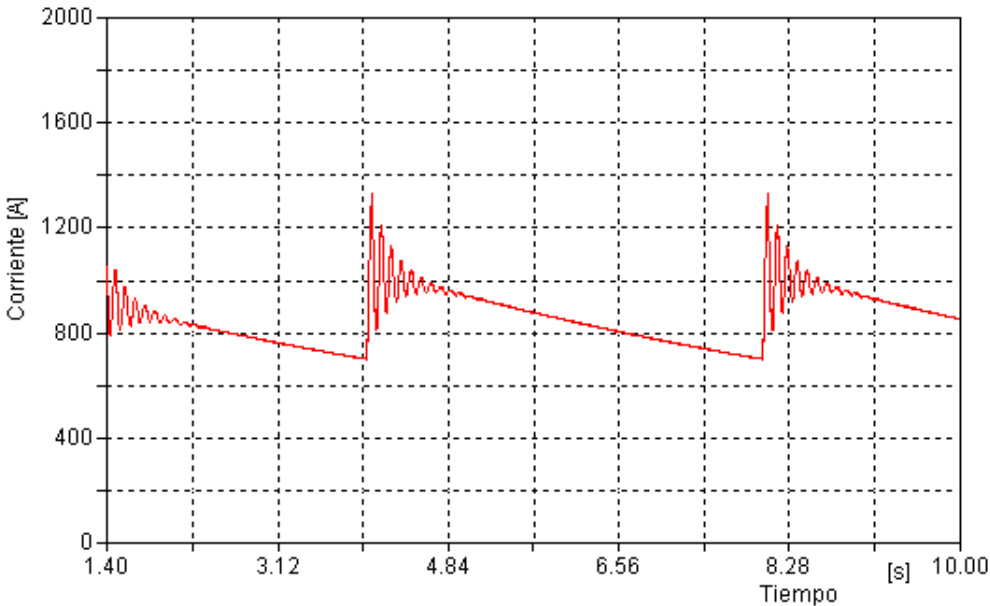


Figura 4.34: Curva tiempo-corriente eficaz en el estator ATP

4.1.2.3. Tercer caso

En la figura (4.35), se observa el comportamiento del viento aplicado a la tercera simulación. Se mantiene constante en un valor igual 4 m/s a durante los primeros dos segundos y luego aumenta de 4 m/s a 11 m/s luego permanece 11 m/s durante dos segundos y retorna nuevamente a 4 m/s .

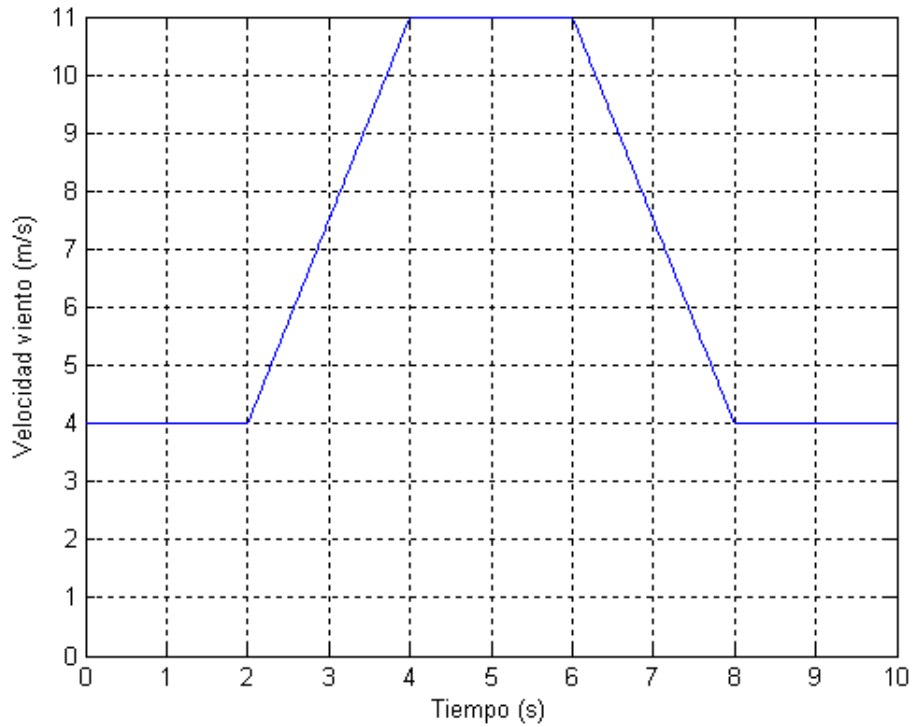


Figura 4.35: Serie de viento 3

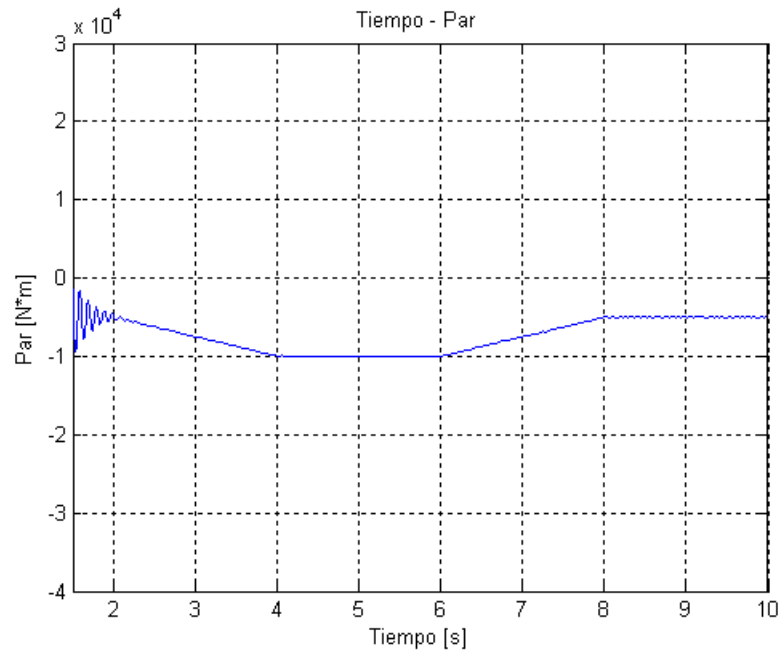


Figura 4.36: Curva tiempo-par generador de inducción Matlab.

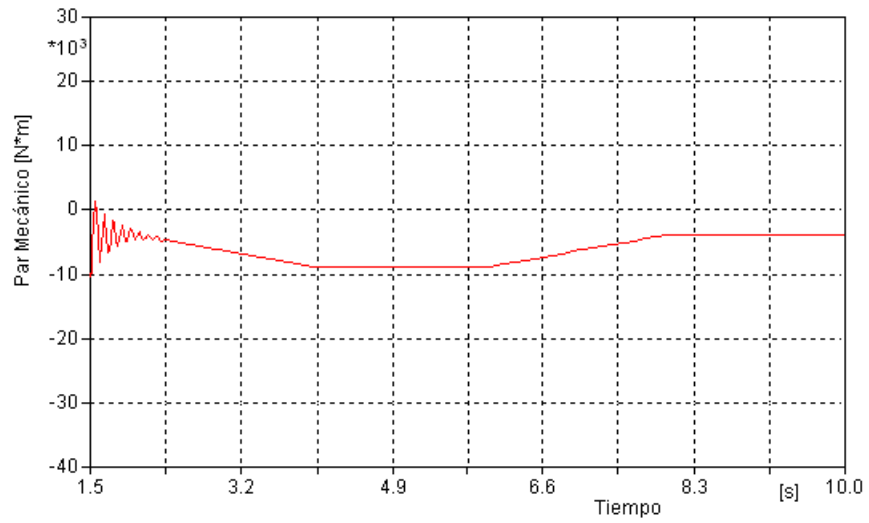


Figura 4.37: Curva tiempo-par generador de inducción ATP

En este caso la potencia mecánica, eléctrica, reactiva y corriente siguen el comportamiento visto en los casos anteriores, aumentando o disminuyendo dependiendo del viento aplicado. Se debe resaltar que para este caso no se presentan cambios bruscos en el viento aplicado, por lo que no se presentan transitorios en el comportamiento de la máquina. El comportamiento descrito anteriormente se puede ver en las figuras (4.38),(4.39) ,(4.40) ,(4.41) , (4.42)y (4.43).

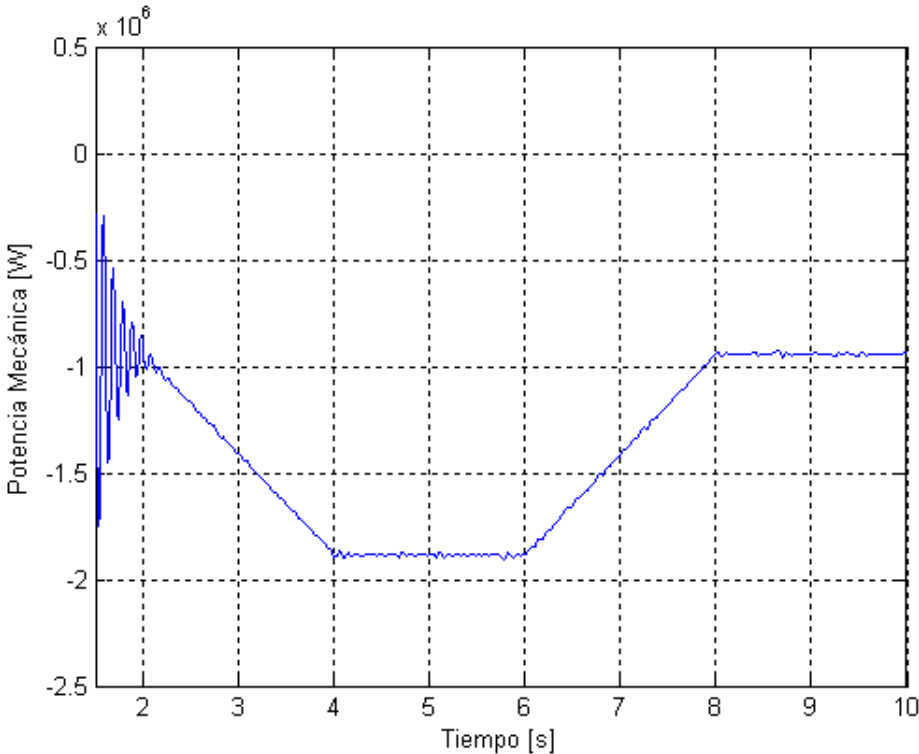


Figura 4.38: Curva tiempo-potencia mecánica Matlab

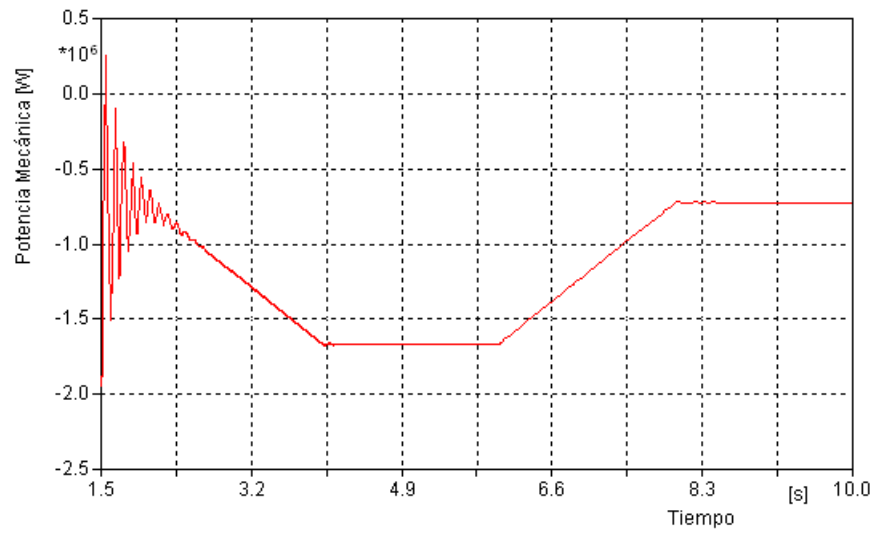


Figura 4.39: Curva tiempo-potencia mecánica ATP.

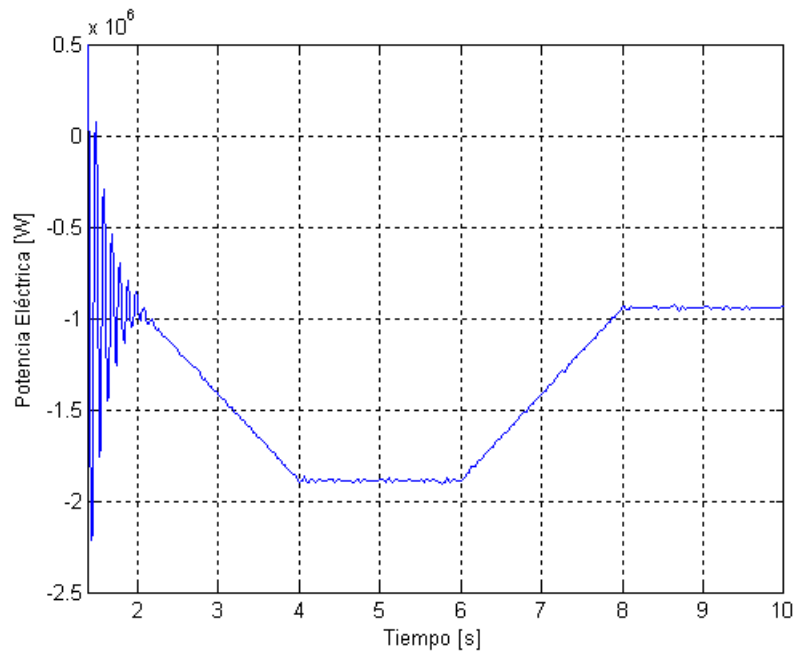


Figura 4.40: Curva tiempo-potencia eléctrica Matlab

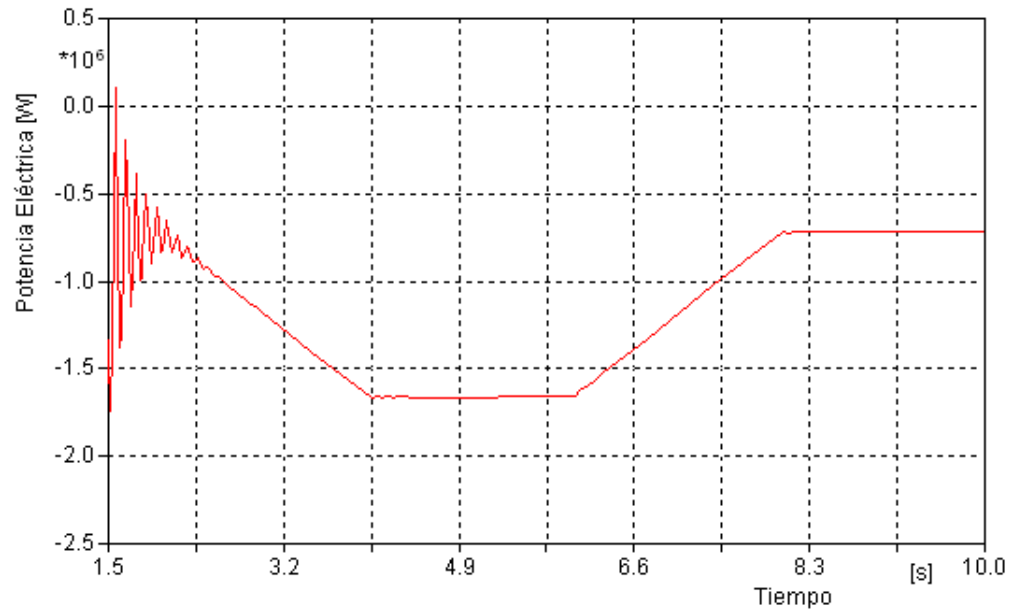


Figura 4.41: Curva tiempo-potencia eléctrica ATP.

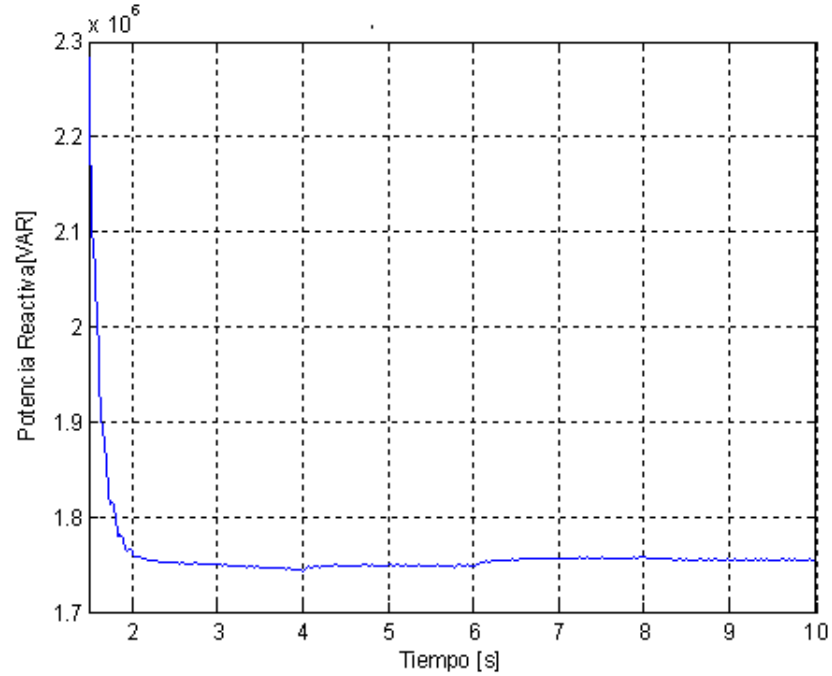


Figura 4.42: Curva tiempo-potencia reactiva Matlab

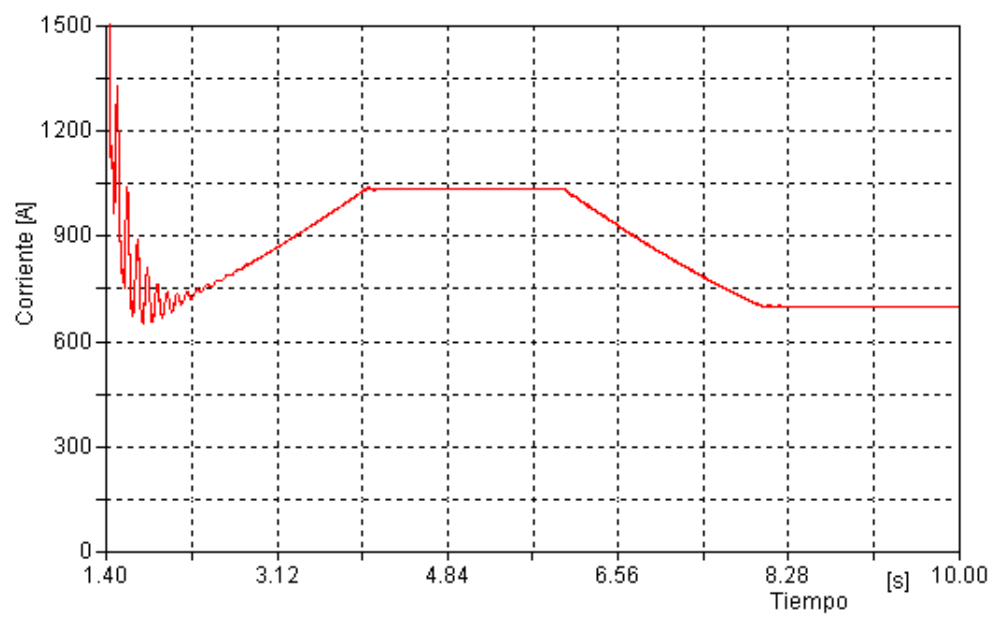


Figura 4.43: Curva tiempo-corriente eficaz ATP

4.2. Sistema desbalanceado

En el análisis del desbalance que se presenta en la máquina de inducción, se modificaron las magnitudes de las tensiones de fase de la red a la que se interconecta el generador de la siguiente manera:

- ★ La magnitud de la tensión de la fase B es 30[V] menor que la magnitud de la fase A.
- ★ La magnitud de la tensión de la fase C es 30[V] mayor que la magnitud de la fase A.

4.2.1. Operación como motor

El desbalance de tensión es la alteración del suministro eléctrico mas dañina a la que puede estar sometida un motor eléctrico, esto se debe al aumento de la temperatura. En la figura (4.44), se tiene la curva de tiempo contra par la cual muestra un caracter oscilatorio contrario a lo que observa en el caso balanceado, esto es debido a la diferencia de tensión entre las fases, y que el par es directamente proporcional al cuadrado de la tensión de alimentación.

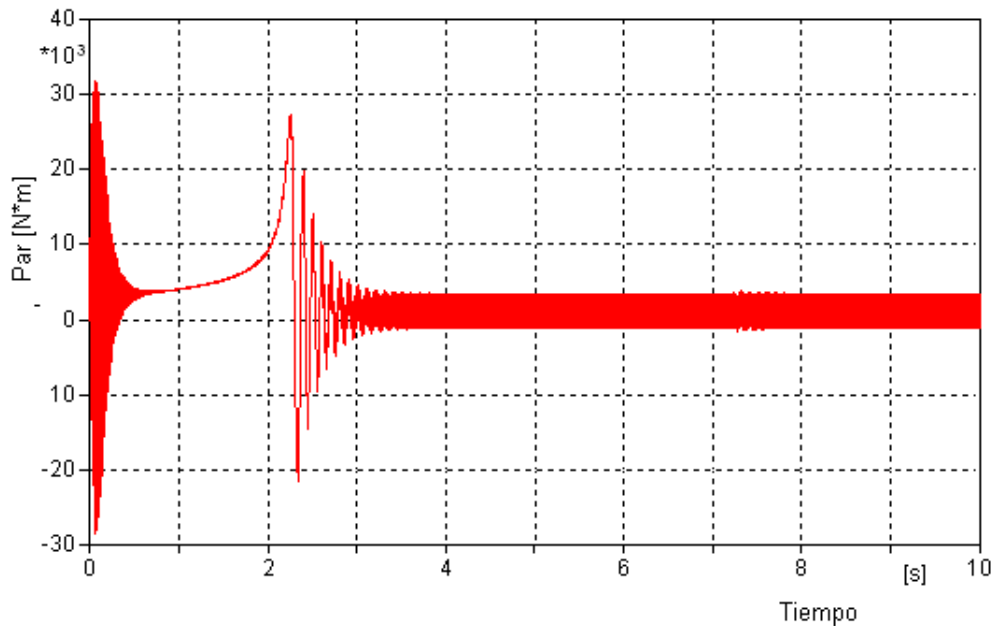


Figura 4.44: Curva tiempo-par motor de inducción ATP

A diferencia del caso balanceado donde se tiene una potencia constante, con el sistema desbalanceado se presenta un aumento de la variación de la potencia, la cual no se estabiliza en un valor sino que se mantiene oscilando como se observa en las figuras (4.45) y (4.46), que corresponden a la potencia eléctrica y mecánica respectivamente, esto es debido a que la variación de la tensión en los bornes del motor asíncrono influye sobre el valor de la potencia activa, ya que esta varía en proporción directa con el par, o lo que es lo mismo en proporción directa con el cuadrado de la tensión en bornes.

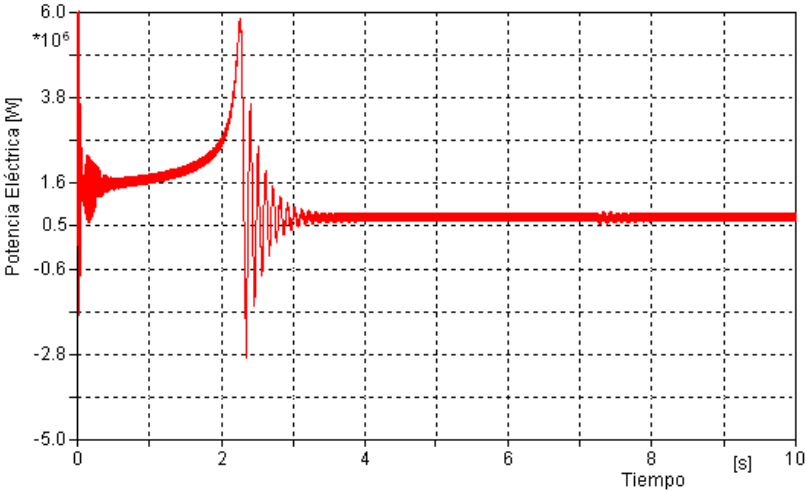


Figura 4.45: Curva tiempo-potencia eléctrica motor de inducción ATP

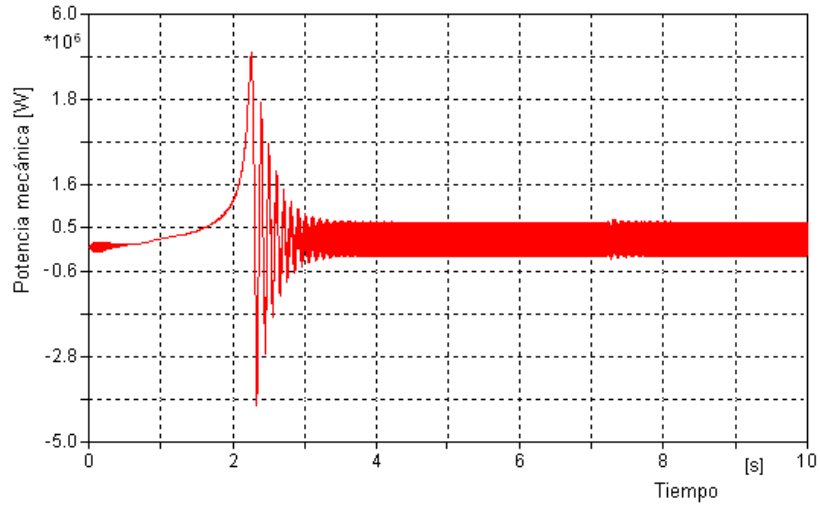


Figura 4.46: Curva tiempo-potencia mecánica motor de inducción ATP

Otra diferencia con el caso balanceado es la aparición de armónicos como se observa en las figuras(4.47) y (4.48), que corresponden a los armónicos que aparecen en la potencia eléctrica y mecánica respectivamente. La aparición de estos implica un aumento considerable en la temperatura a la cual esta trabajando el motor y un aumento en la vibración. El aumento de la temperatura provoca daños en el aislamiento, una vez se supere el valor permitido, y la vibración provoca agotamientos mecánicos que reducen la vida útil de la máquina.

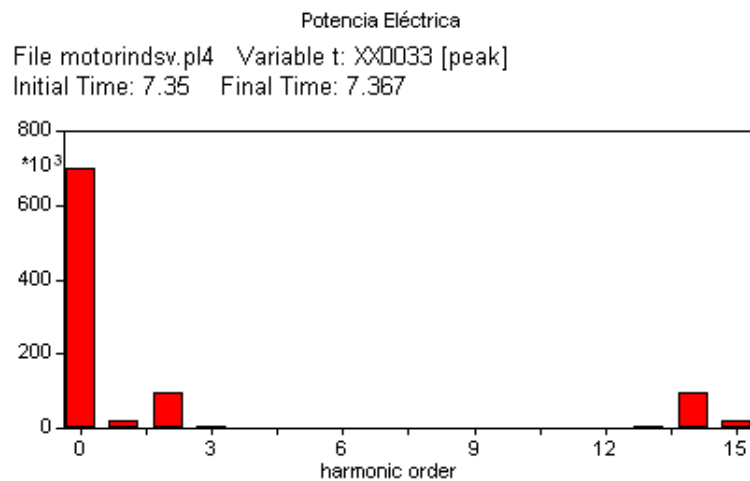


Figura 4.47: Curva armónicos potencia eléctrica motor de inducción

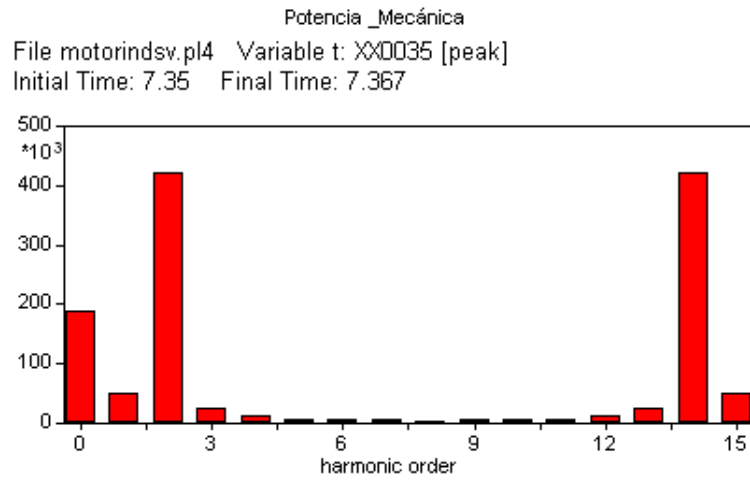


Figura 4.48: Curva armónicos potencia mecánica motor de inducción

Las tablas (4.1) y (4.2), presentan la magnitud de los armónicos de la potencia eléctrica y mecánica respectivamente.

| TABLA DE AMPLITUDES | |
|---------------------|----------------|
| Armónico Num. | Valor Pico [W] |
| 0 | 7.03E+05 |
| 1 | 2.11E+04 |
| 2 | 9.62E+04 |
| 3 | 6092 |
| 14 | 9.62E+04 |
| 15 | 2.11E+04 |

Cuadro 4.1: Amplitud armónicos potencia eléctrica

| TABLA DE AMPLITUDES | |
|---------------------|----------------|
| Armónico Num. | Valor Pico [W] |
| 0 | 1.91E+05 |
| 1 | 5.12E+04 |
| 2 | 4.24E+05 |
| 3 | 2.72E+04 |
| 4 | 1.34E+04 |
| 12 | 1.34E+04 |
| 13 | 2.72E+04 |
| 14 | 4.24E+05 |
| 15 | 5.12E+04 |

Cuadro 4.2: Amplitud armónicos potencia mecánica

La potencia reactiva también presenta un caracter oscilatorio, aunque es de menor amplitud. La figura (4.49), muestra dicho comportamiento.

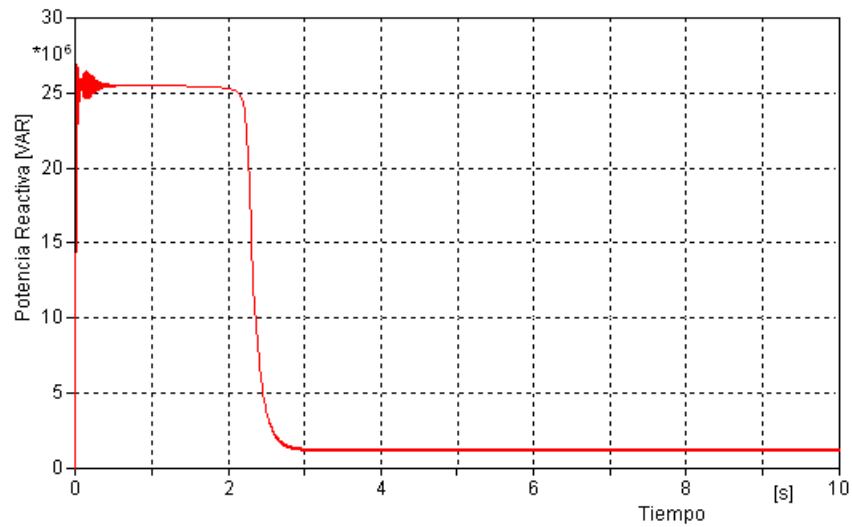


Figura 4.49: Curva tiempo-potencia reactiva motor de inducción ATP

La figura (4.50), muestra la tensión en cada una de las tres fases, se ve claramente que la amplitud de una de las tres fases es mayor que la amplitud de las otras dos fases. Esto se ve reflejado en la corriente, la cual es mayor en una de las fases como se ve en la figura (4.51).

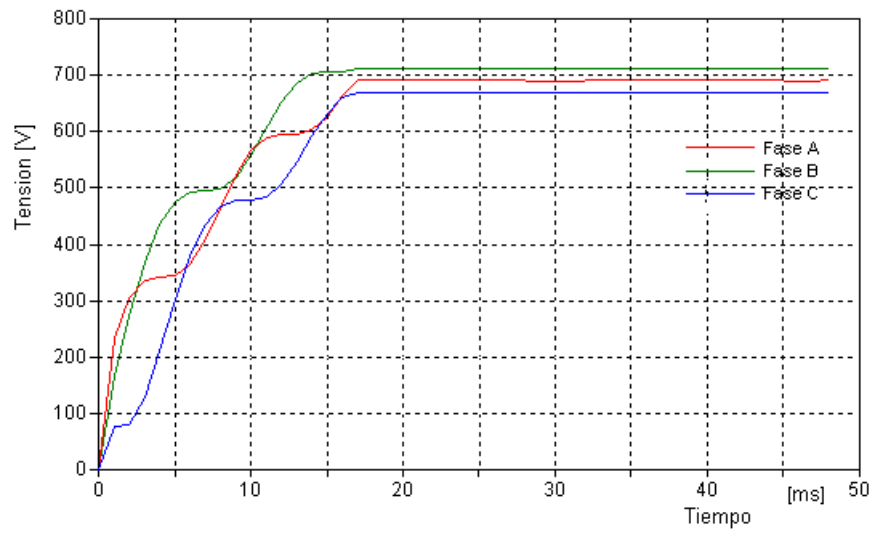


Figura 4.50: Curva tiempo-tensión motor de inducción ATP

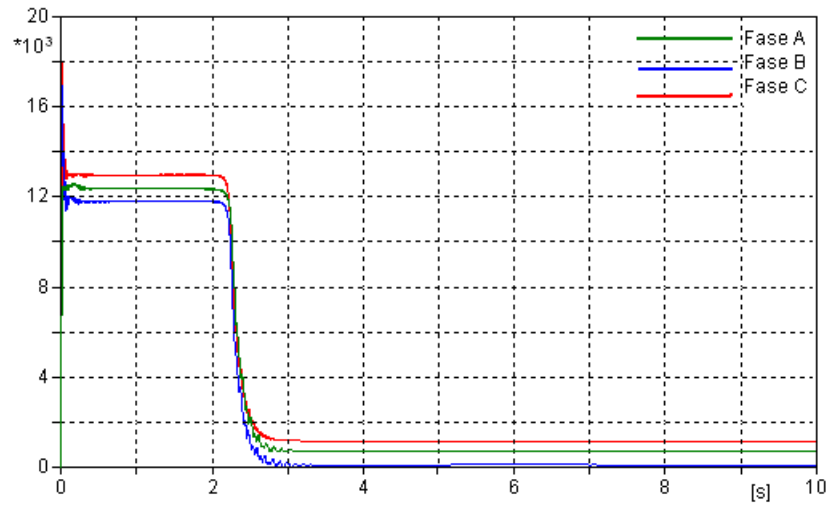


Figura 4.51: Curva tiempo-corriente motor de inducción ATP

4.2.2. Operación como generador

Para la operación como generador en el caso desbalanceado, se trabaja con las series de viento que se utilizaron en el caso balanceado. Las figuras correspondientes a los tres casos son (4.14), (4.25), y (4.35).

4.2.2.1. Primer caso

El desbalance de tensión que presenta la alimentación de la máquina de inducción causa que el par no sea constante, presentando perturbaciones que afectan el rendimiento de la máquina, debido a que la potencia activa, que varía en proporción directa al par, adquiere un carácter no constante causando daños en las cargas que se conecten y que requieran de una potencia constante para funcionar. La figura(4.52), muestra las perturbaciones presentes en el par.

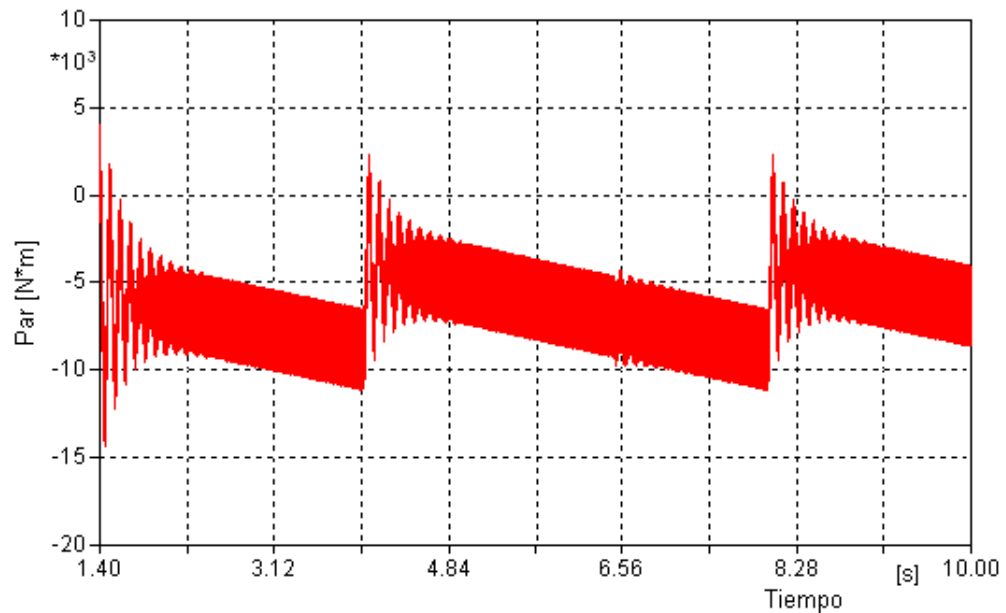


Figura 4.52: Curva tiempo-par caso uno ATP

Al igual que en el caso balanceado la potencia eléctrica y mecánica mantienen la tendencia de crecer junto con el viento aplicado, sin embargo, la potencia no es constante como se observa en las figuras (4.53) y (4.54), estas presentan grandes oscilaciones y los

transitorios son mas grandes, a diferencia de lo que se observa en el caso balanceado. Se puede observar que el rendimiento de la maquina disminuye respecto del caso balanceado. Esta disminucion se debe a la aparicion de corrientes de secuencia negativa, las cuales producen un campo electromagnetico en sentido opuesto al de la maquina. La aparicion de dichas corrientes producen un perdida de potencia de la maquina y dichas perdidas se traduciran en mas calor, esto tambien causa vibracion y fatiga mecanica del generador, disminuyendo la vida util de la maquina.

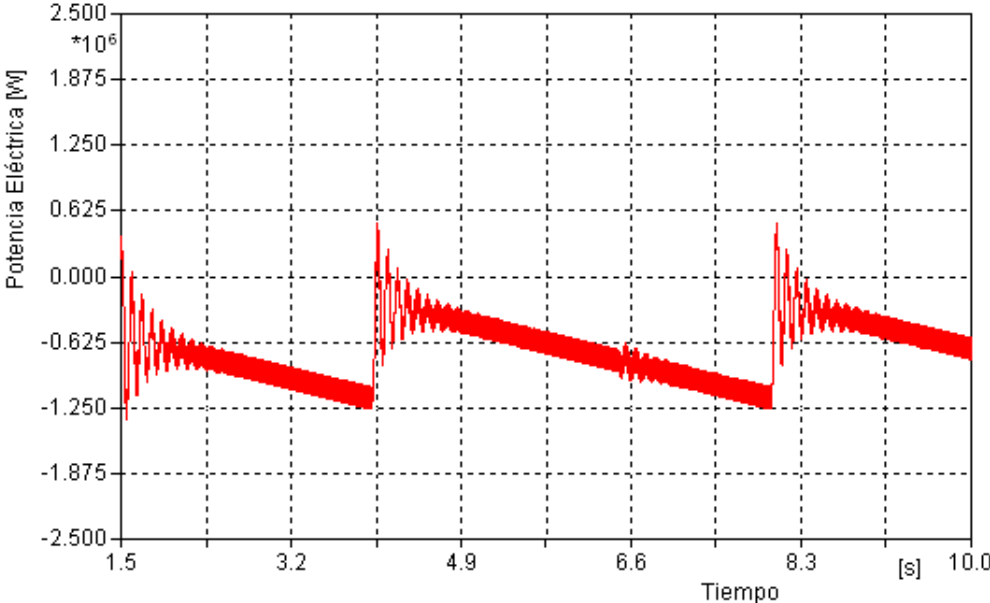


Figura 4.53: Curva tiempo-potencia eléctrica ATP

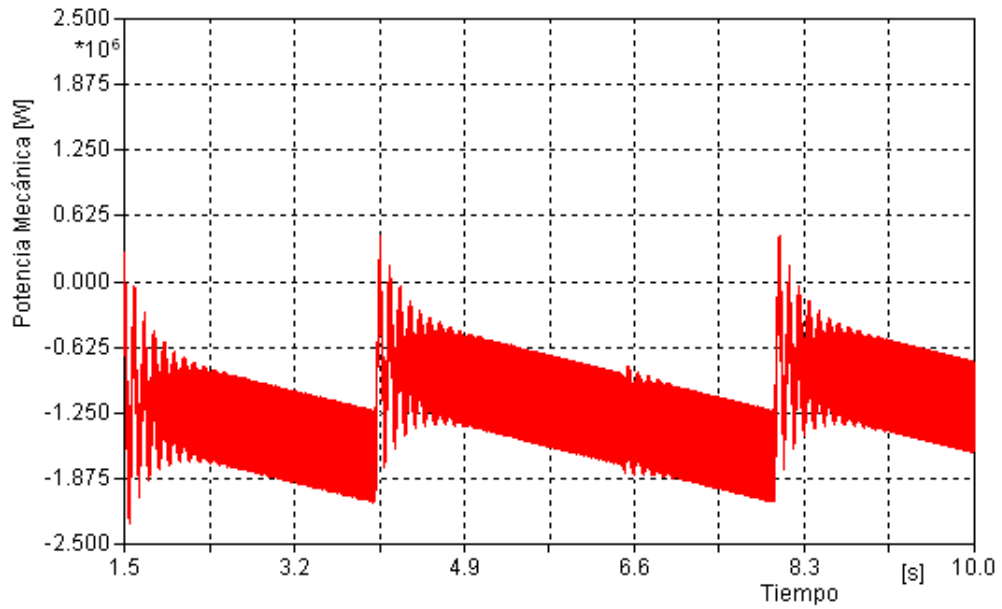


Figura 4.54: Curva tiempo-potencia mecánica ATP

En las figuras(4.55)y (4.56), se observan los armónicos que aparecen en la potencia eléctrica y mecánica para el primer caso. Estos armónicos se presentan debido a que el desbalance en la tensión causa que se sature en nucleo de la máquina convirtiendose en una fuente de armónicos debido a la naturaleza no lineal del material ferromagnetico, lo que produce distorsión en la onda.

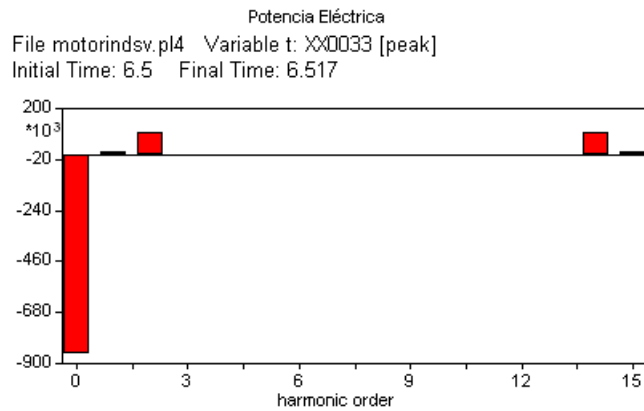


Figura 4.55: Curva armónicos potencia eléctrica generador de inducción

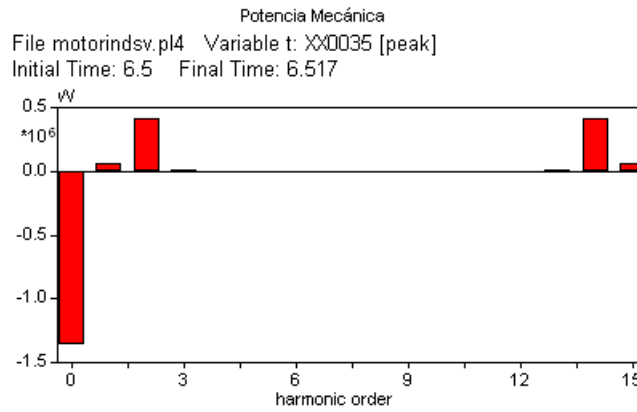


Figura 4.56: Curva armónicos potencia mecánica generador de inducción

Las tablas (4.3) y (4.4), presentan la magnitud de los armónicos de la potencia eléctrica y mecánica respectivamente.

| TABLA DE AMPLITUDES | |
|---------------------|----------------|
| Armónico Num. | Valor Pico [W] |
| 0 | -8.61E+05 |
| 1 | 1.52E+04 |
| 2 | 1.01E+05 |
| 14 | 1.01E+05 |
| 15 | 1.52E+04 |

Cuadro 4.3: Amplitud armónicos potencia eléctrica

| Tabla de amplitudes | |
|---------------------|----------------|
| Armónico Num | Valor pico [W] |
| 0 | -1.36E+06 |
| 1 | 8.43E+04 |
| 2 | 6.47E+04 |
| 3 | 8.21E+04 |
| 4 | 1.81E+05 |
| 5 | 3.61E+05 |
| 6 | 8.51E+04 |
| 7 | 4.75E+04 |
| 8 | 3.30E+04 |

Cuadro 4.4: Amplitud armónicos potencia mecánica

El generador consume reactivos a medida que se genera mas potencia, pero este consumo no es constante como se observa en la figura (4.57).

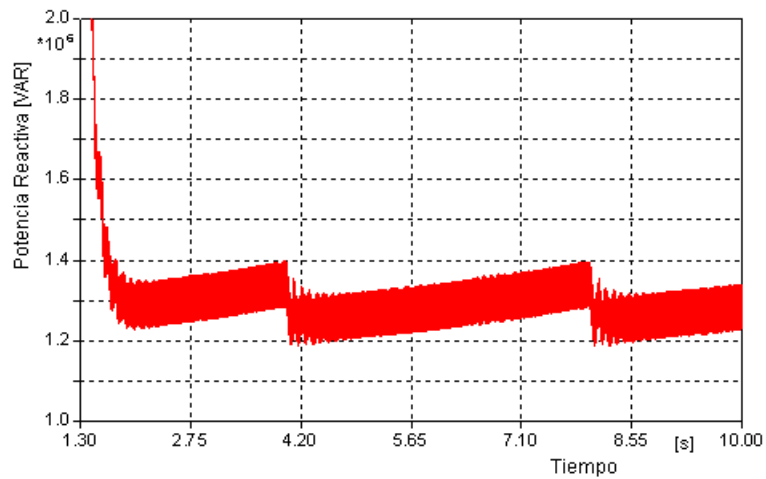


Figura 4.57: Curva tiempo-potencia reactiva ATP

La característica de la corriente muestra que aumenta de manera desigual en cada una de las fases, esto se debe al desbalance que presenta en la alimentación como se ve en la figura (4.58). Las corrientes de secuencia negativa que aparecen en el desbalance de tensión causan un gran desbalance en la corriente, donde un 1% de desbalance de tensión, puede resultar en un 6% a 10% en desbalance de corrientes.[10]

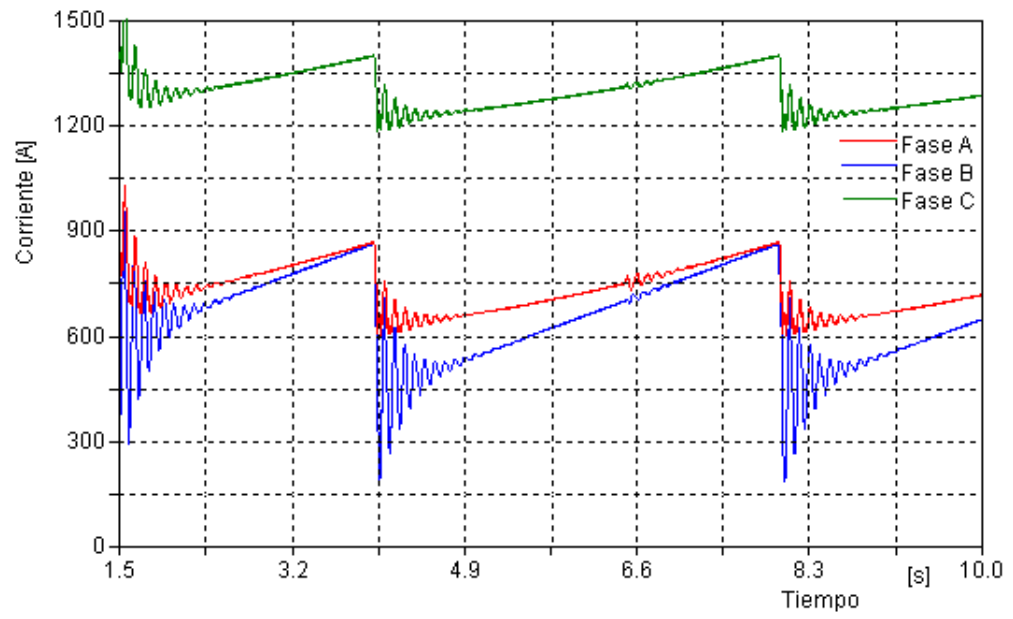


Figura 4.58: Curva tiempo-corriente ATP

4.2.2.2. Segundo caso

El par de la máquina que se observa en la figura (4.59), disminuye con la velocidad del viento al igual que en el caso balanceado, y no es constante debido al desbalance que se presenta en la tensión. De la figura se puede ver la presencia de perturbaciones en el par, estas a su vez afectan el rendimiento de la máquina como se vio en el primer caso

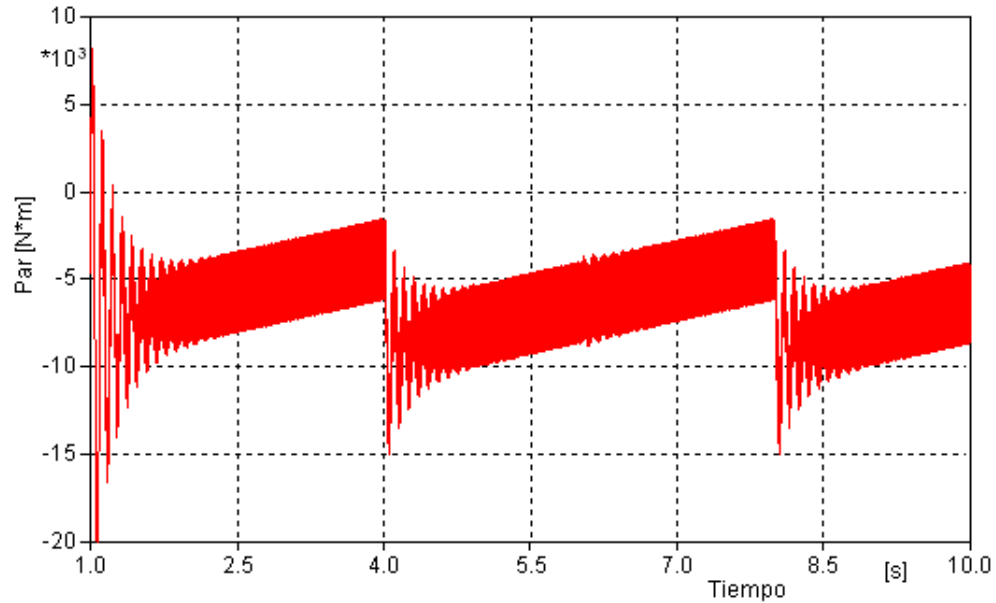


Figura 4.59: Curva tiempo-par caso dos ATP.

La potencia eléctrica que se entrega a la red mantiene la tendencia a disminuir junto con el viento aplicado, como se observó en el caso balanceado, lo que produce un menor consumo de energía reactiva. En las figuras (4.60) y (4.61), se observa que el comportamiento de la potencia no es constante a diferencia del caso balanceado. Esta disminución se debe a la aparición de corrientes de secuencia negativa, que producen una pérdida de potencia de la máquina y dichas pérdidas se traducirán en más calor, disminuyendo la vida útil de la máquina.

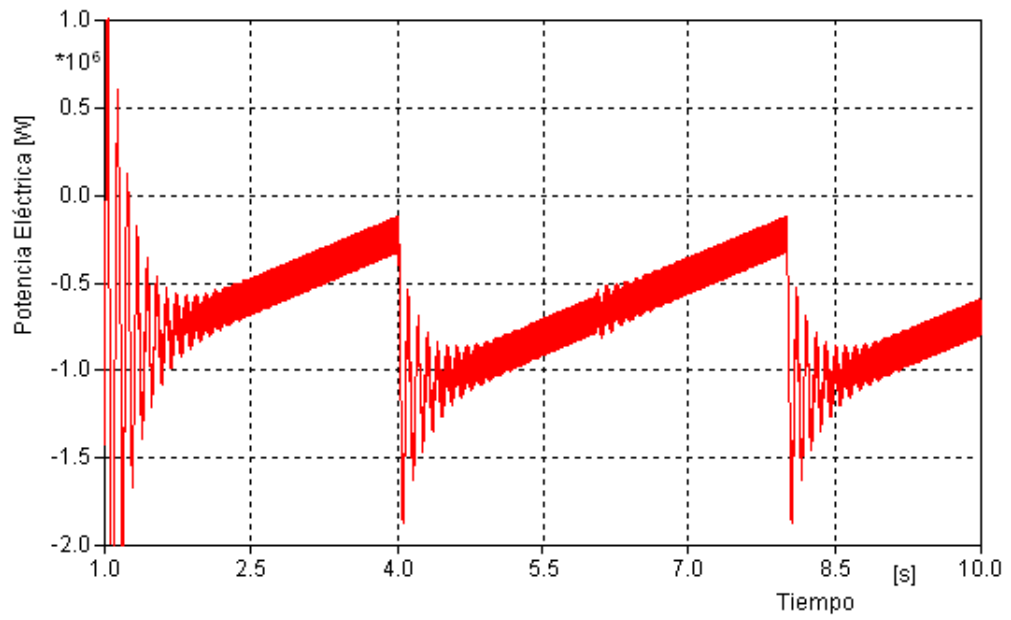


Figura 4.60: Curva tiempo-potencia eléctrica ATP.

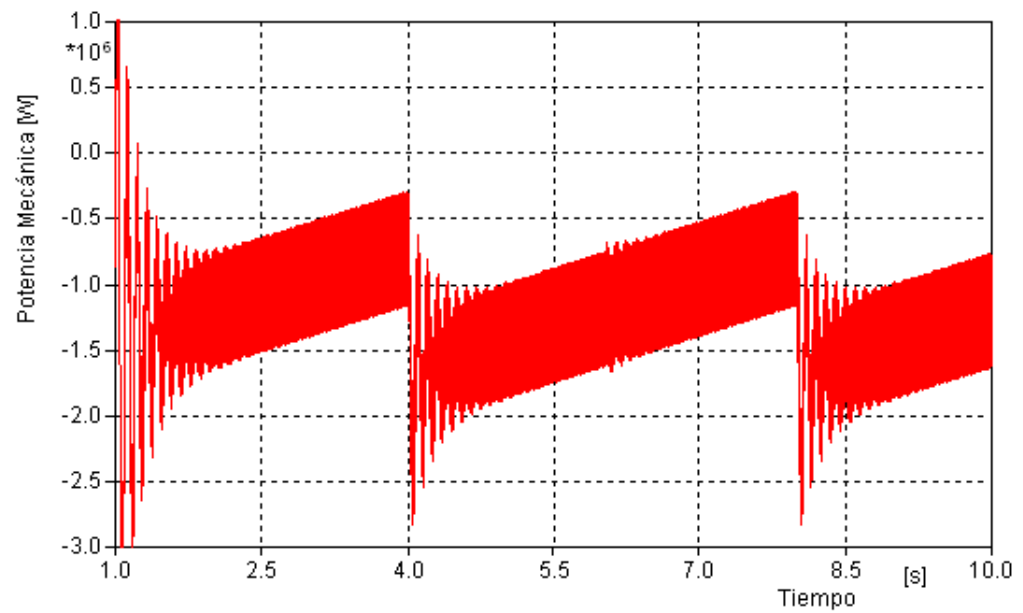


Figura 4.61: Curva tiempo-potencia mecánica ATP

En las figuras(4.62) y (4.63), se observan los armonicos que aparecen en la potencia eléctrica y mecánica. Se observa que la amplitud de los armonicos es considerable, lo que se traduce en un aumento de pérdidas de potencia activa.

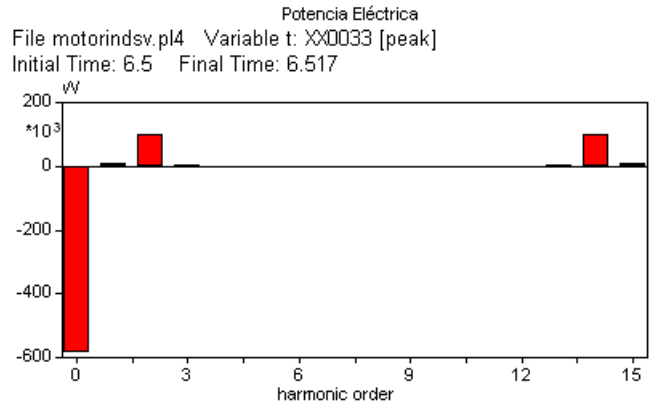


Figura 4.62: Curva armonicos potencia eléctrica generador de inducción

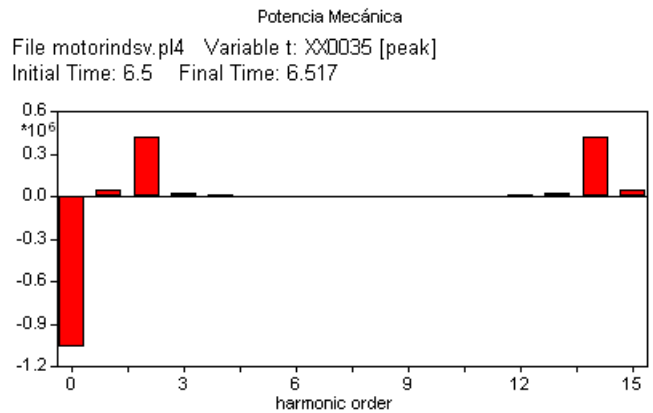


Figura 4.63: Curva armonicos potencia mecánica generador de inducción

Las tablas (4.5) y (4.6), presentan la magnitud de los armónicos de la potencia eléctrica y mecánica respectivamente.

| TABLA DE AMPLITUDES | |
|----------------------|-----------------------|
| <i>Armónico Num.</i> | <i>Valor Pico [W]</i> |
| 0 | -5.86E+06 |
| 1 | 1.11E+04 |
| 2 | 1.01E+05 |
| 3 | 6.32E+03 |
| 13 | 6.32E+03 |
| 14 | 1.01E+05 |
| 15 | 1.11E+04 |

Cuadro 4.5: Amplitud armonicos potencia eléctrica

| TABLA DE AMPLITUDES | |
|----------------------|-----------------------|
| <i>Armónico Num.</i> | <i>Valor Pico [W]</i> |
| 0 | -1.07E+06 |
| 1 | 4.92E+04 |
| 2 | 4.24E+05 |
| 3 | 2.57E+04 |
| 4 | 1.17E+04 |
| 12 | 1.17E+04 |
| 13 | 2.57E+04 |
| 14 | 4.24E+05 |
| 15 | 4.92E+04 |

Cuadro 4.6: Amplitud armonicos potencia mecánica

El generador consume menos reactivos a medida que disminuye el par, pero no lo hace de manera constante como se observa en la figura (4.64).

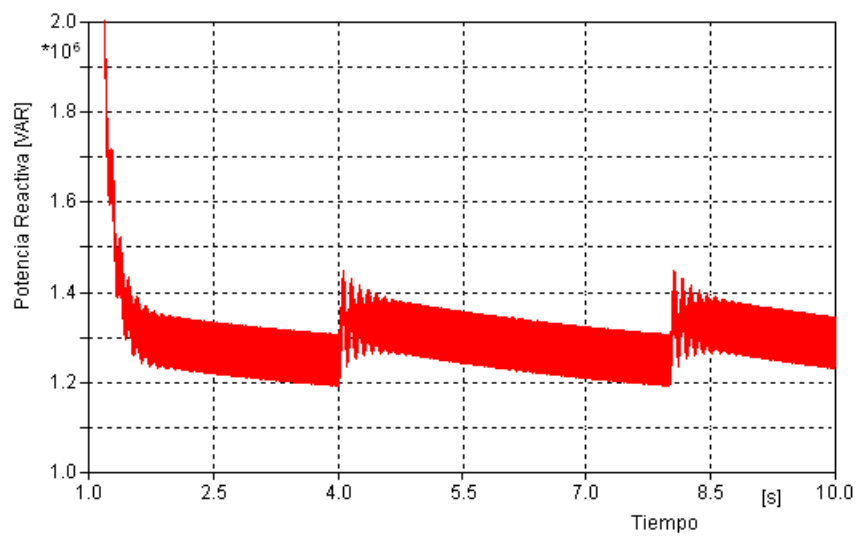


Figura 4.64: Curva tiempo-potencia reactiva ATP.

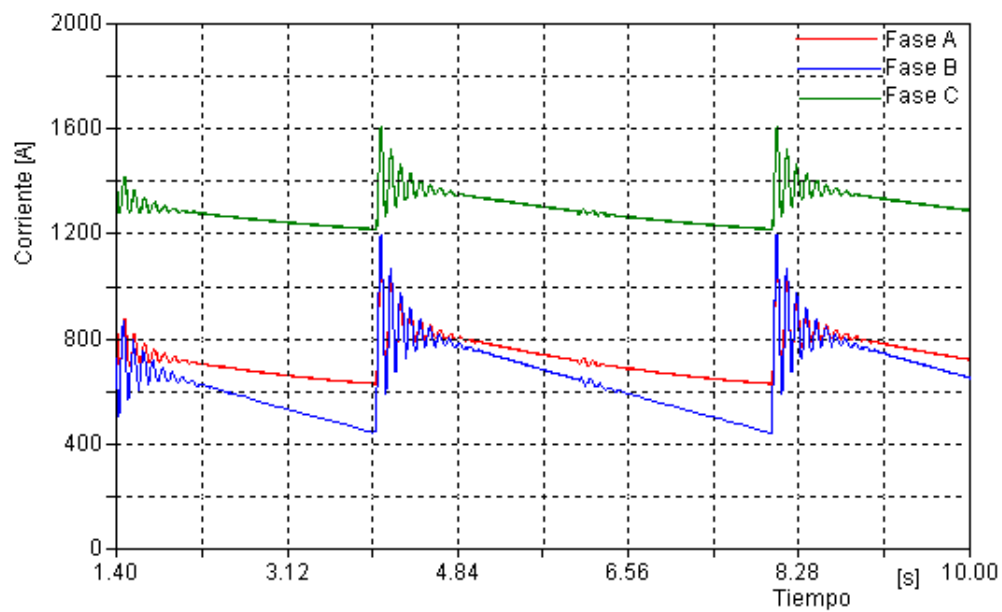


Figura 4.65: Curva tiempo-corriente ATP

4.2.2.3. Tercer caso

Al igual que el caso balanceado el par sigue el comportamiento visto en los casos anteriores aumentando o disminuyendo dependiendo del viento aplicado, y manteniéndose constante cuando el viento es constante, como se observa en la figura(4.66).De nuevo se puede apreciar que en el par de la máquina aparecen perturbaciones en el par, dichas perturbaciones afectan la potencia activa, y de esta manera le resta confiabilidad a la máquina dado que las cargas que se conecten se pueden ver afectadas por dicho comportamiento.

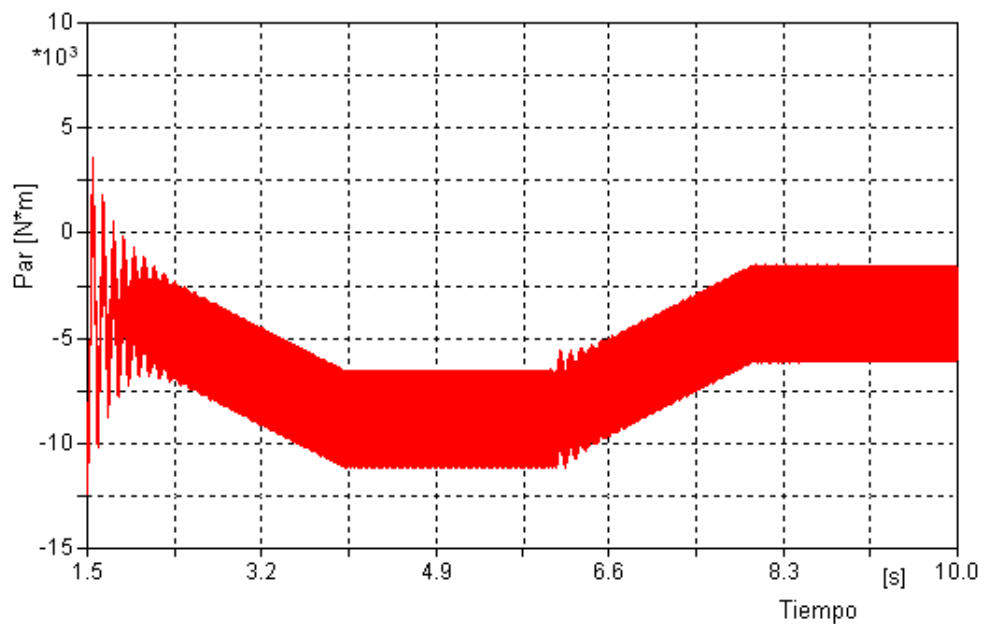


Figura 4.66: Curva tiempo-par caso tres ATP

En este caso la potencia eléctrica y mecánica aumenta o disminuye dependiendo del comportamiento del viento aplicado. Las oscilaciones se mantienen para los dos tipos de potencia como se observa en las figuras(4.67) y(4.68). Las variaciones en la potencia se traducen en el aumento de la temperatura de trabajo de la maquina y por ende en un deterioro de la misma.

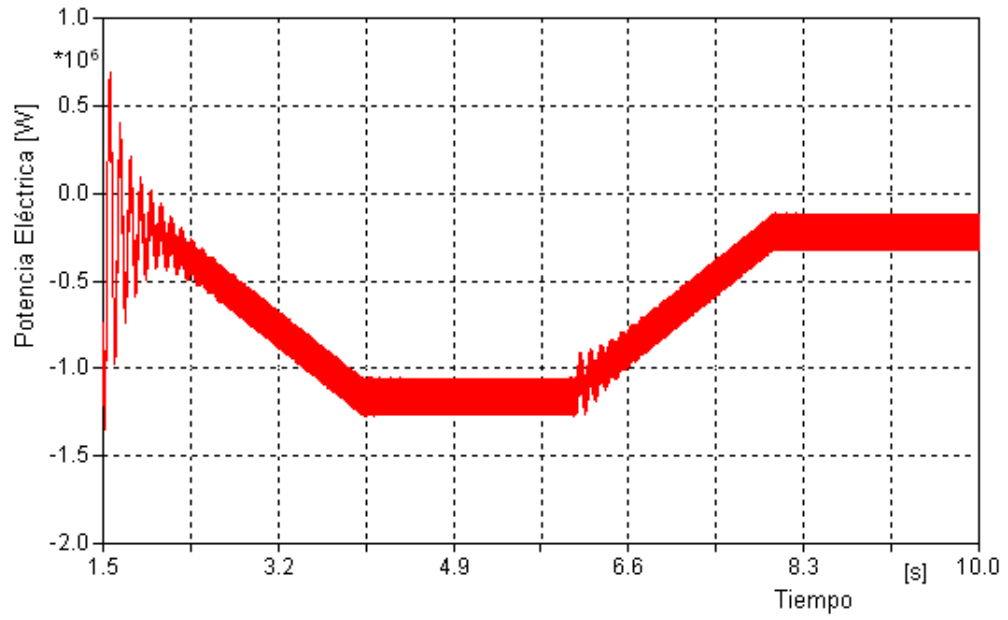


Figura 4.67: Curva tiempo-potencia eléctrica ATP

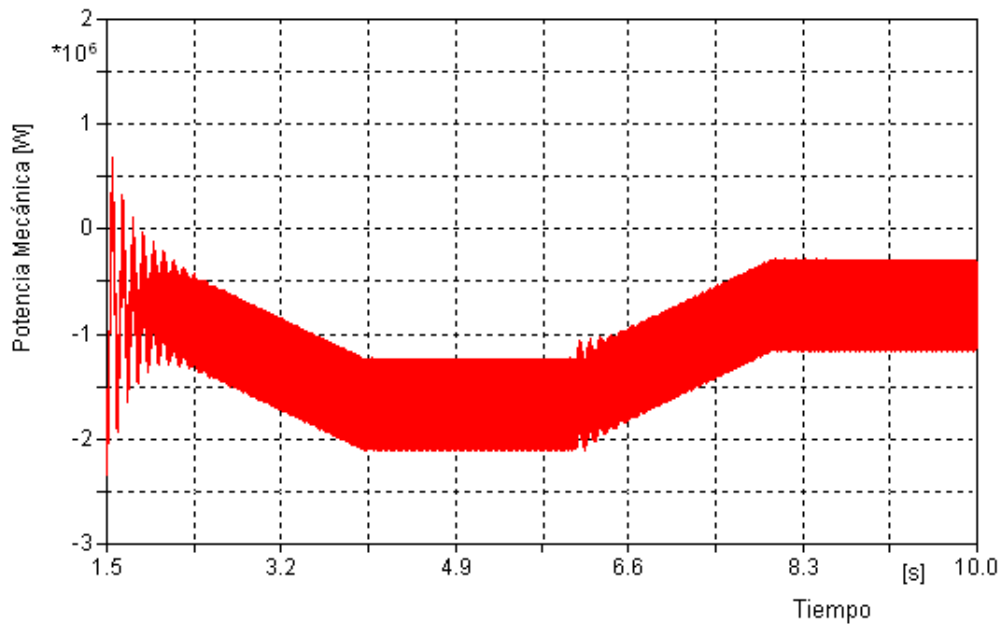


Figura 4.68: Curva tiempo-potencia mecánica ATP

En las figuras(4.69) y (4.70), se observan de nuevo la aparición de armónicos que en la potencia eléctrica y mecánica. La aparición de estos se debe al efecto que provoca el desbalance de tensión en el material ferromagnético ya que no presenta un carácter lineal. El efecto de los armónicos se traduce en un aumento de pérdidas de potencia activa para la máquina.

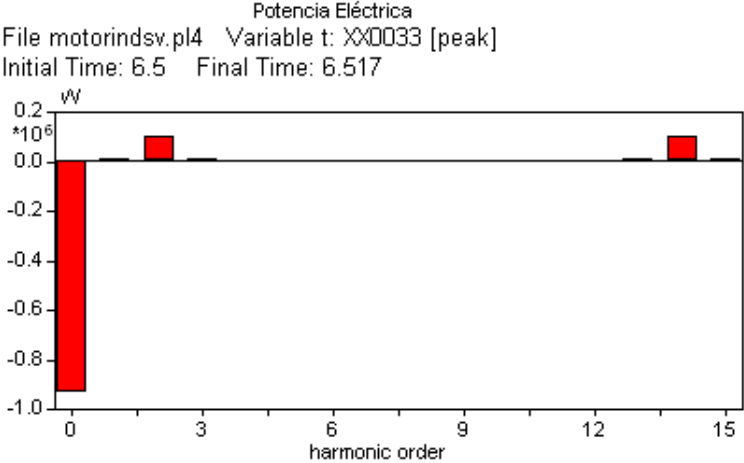


Figura 4.69: Curva reactivos potencia eléctrica generador de inducción

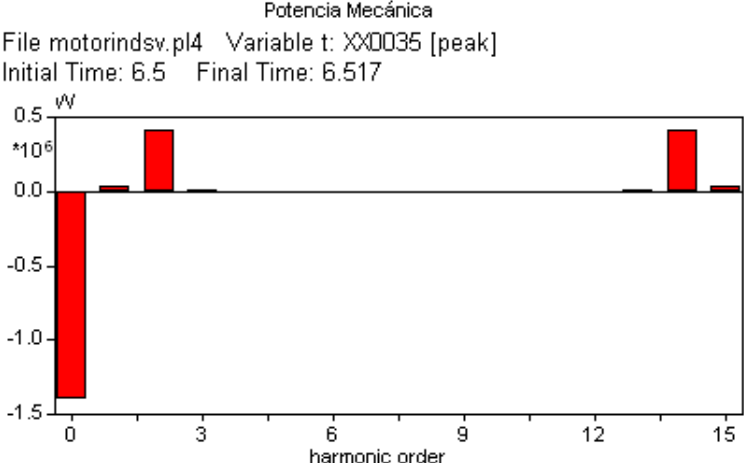


Figura 4.70: Curva armonicos potencia mecánica generador de inducción

Las tablas (4.7)y (4.8), presentan la magnitud de los armónicos de la potencia eléctrica y mecanica respectivamente.

| Tabla de amplitudes | |
|----------------------------|-----------------------|
| <i>Armónico Num</i> | <i>Valor pico [W]</i> |
| 0 | -9.23E+05 |
| 1 | 2.29E+04 |
| 2 | 1.76E+04 |
| 3 | 2.18E+04 |
| 4 | 4.55E+04 |
| 5 | 8.46E+04 |
| 6 | 1.83E+04 |
| 7 | 9.40E+03 |

Cuadro 4.7: Amplitud armónicos potencia eléctrica

| TABLA DE AMPLITUDES | |
|----------------------------|-----------------------|
| <i>Armónico Num.</i> | <i>Valor Pico [W]</i> |
| 0 | -1.41E+06 |
| 1 | 5.01E+04 |
| 2 | 4.23E+05 |
| 3 | 2.50E+04 |
| 13 | 2.50E+04 |
| 14 | 4.23E+05 |
| 15 | 5.01E+04 |

Cuadro 4.8: Amplitud armónicos potencia mecánica

En la figura(4.71), se observa que en la potencia reactiva se mantienen las oscilaciones, al igual que en los dos primeros casos. Al igual que el caso balanceado el consumo de reactivos amenta o disminuye dependiendo del viento aplicado.

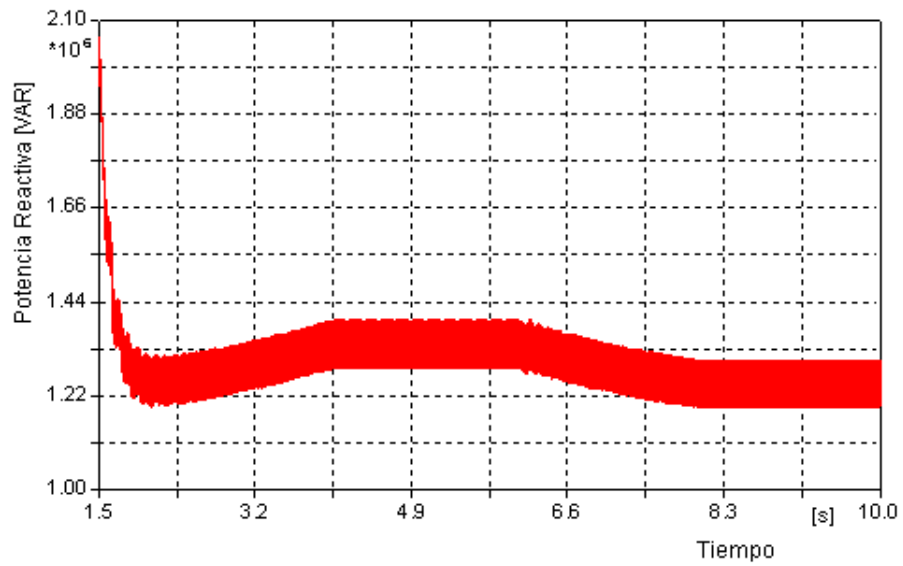


Figura 4.71: Curva tiempo-potencia reactiva ATP.

En la figura se observa el comportamiento de la corriente por efecto del desbalance en la tensión de alimentación de el generador cuando a este se le aplica el viento tipo tres, de esta se observa que un desbalance del 1% en tensión produce un desbalance de 6% a 10% en cuanto a corrientes.

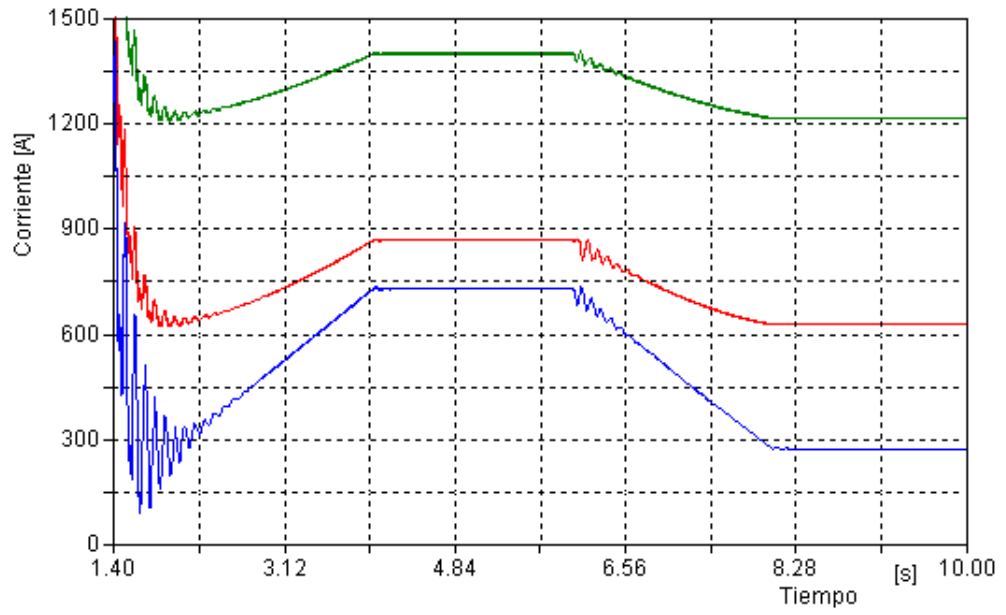


Figura 4.72: Curva- tiempo corriente ATP

Capítulo 5

Conclusiones

- El estudio del impacto del desbalance de la tensión de alimentación del generador eólico, es una contribución más al estudio del comportamiento de las componentes que conforman un parque de generación eólica, dando así un nuevo paso en el estudio de este tipo de energía en Colombia.
- El desbalance de tensión en la alimentación de la generación eólica es una fuente de perturbación de calidad de este tipo de energía alternativa, debido a que el carácter no constante de la potencia activa y la presencia de armónicos podrían causar daños en las cargas que se conecten y requieran de una potencia estable para funcionar.
- El desbalance de tensión en la generación eólica causa que se sature el núcleo de la máquina, convirtiéndose en una fuente de armónicos debido a que la naturaleza del material ferromagnético no es lineal, lo que genera distorsión en la onda.
- El rendimiento del motor de inducción operando como generador disminuye cuando se presenta un desbalance en la tensión de alimentación, traduciendo en pérdidas eléctricas y económicas, debido a que la máquina no trabaja de manera adecuada.
- La variación de la potencia reactiva en el generador con el sistema desbalanceado, hace que sea más difícil la compensación de reactivos a fin de mejorar el factor de potencia y entregar una mejor calidad de la energía .

Capítulo 6

Bibliografía

- [1] P. Kundur. *Power system stability and control*. EPRI Power Engineering Series. McGraw Hill, 1993.
- [2] Stephen J. Chapman. *máquinas eléctricas*. McGraw Hill, 2005.
- [3] Gonzalez Acevedo, Hernando. *Modelado, Simulación y Control de un Sistema de Generación Eólico*. Proyecto para optar al título de master en ing electrónica. Universidad Industrial de Santander 2008.
- [4] Zorollo, Guru. *Máquinas Eléctricas y Transformadores*. Oxford, 2003.
- [5] Checa, Luis María. *Líneas de Transporte de Energía*. Marcombo, 1988.
- [6] Ríos H, Adriana, Strauss, Antonieta. *Evaluación del Comportamiento de una Máquina de Inducción de Rotor Tipo Jaula de Ardilla Como Generador Para Ser Empleado en un Sistema de Conversión de Energía del Viento*. Proyecto para optar al título de ingeniero electricista. Universidad Nacional Experimental Politécnica de Las Fuerzas Armadas Nacionales. 2007.
- [7] Florin, Lov. *Contributions to modelling, Analysis and Simulation of Ac Drive System. Application to Large Wind Turbine*. Ph.D. Thesis. Dunarea de Jos University- Galati. 2003.

[8]Acuña Mora, Marco, Jacome, Luis. *Análisis Para la Interconexión de una Planta Eólica a un Sistema de Distribución*. III Comisión de Integración Energética Regional. 2007

[9]Stevenson, William, Grainger, John. *Analisis de sistemas de potencia*. McGRAW-HILL. 2003

[10] Kv, Vasami Krishna. *Effects of unbalance voltage on induction motor current*. Lecon System.2000

Capítulo 7

Apéndices

Apéndice A

Características del generador

Los parámetros eléctricos para el generador DFIG de 2 MW que se utiliza para el desarrollo de la tesis, se asumieron de los de la tesis *Contributions to modelling, Analysis and Simulation of Ac Drive System. Application to Large Wind Turbine* [7], de Florin Lov, los cuales se observan en la tabla (A.1).

| GENERADOR | |
|-----------|------------------|
| Tipo | DFIG |
| Velocidad | 750 - 1800 [rpm] |

| PARAMETRO | | VALOR |
|--------------------------------------|-----------|-------------------------|
| Resistencia del bobinado del estator | R_s | 0.001 [Ω] |
| Inductancia del bobinado del estator | L_s | 0.07 [mH] |
| Resistencia del bobinado del rotor | R_r | 0.0013 [Ω] |
| Inductancia del bobinado del rotor | L_r | 0.08 [mH] |
| Inductancia Mutua | L_m | 3 [mH] |
| Inercia del generador | J_{Gen} | 65 [Kg*m ²] |
| Número de par de polos | P_f | 2 |

Cuadro A.1: Datos del generador

Apéndice B

Parámetros de la línea de transmisión

Para el cálculo de los parámetros de la línea se tienen en cuenta los siguientes datos:

- Longitud de 1 km
- Tensión $13,8\text{ KV}$
- Potencia 2 MW

La tabla(B.1) presenta los datos correspondientes a los parámetros de la línea y características del conductor.

| PARÁMETROS DE LA LÍNEA | | | |
|------------------------|------|--------|-------------------|
| POTENCIA (r) | 2 | MW | |
| F.P. | 0.9 | Atraso | |
| PERDIDAS | 4.0% | | |
| REGULACION | 5% | | |
| LONGITUD | 1 | Km | |
| V. De Diseño | 13.8 | kV | |
| | | | VOLTAJE 28.16 kV |
| | | | CORRIENTE 92.97 A |

| CARACTERÍSTICAS DEL CABLE | | |
|---------------------------|--------|----------------------------|
| SPARROW | | |
| n | 2 | Diametro Hilo Acero 2.6721 |
| N° Hilos de Al | 6 | Area Sección Total. 39.226 |
| N° Hilos de Acero | 1 | RMG 1.274C6 |
| Diametro Nominal | 27 | Carga de rotura 1265.5 |
| Area Sección Al | 33.613 | Peso Total 135.9 |
| Diametro Hilo Al | 2.6721 | Corriente 183 |
| | | Resistencia a 50° 1.012 |

Cuadro B.1: Parámetros del conductor

Apéndice C

Características de la turbina eólica

Las especificaciones técnicas para una turbina eólica de velocidad variable controlada por variación de ángulo de paso, NM 2000/82 fabricada por Neg Micon, se observan en la tabla.

| ROTOR | |
|---|--------------------------------------|
| Número de palas | 3 |
| Velocidad nominal | 19 [rpm] |
| Diámetro | 82 [m] |
| Regulación de potencia | Pitch |
| Velocidad del viento de arranque | 4 [m/s] |
| Velocidad del viento de paro | 25 [m/s] |
| Velocidad del viento para la potencia nominal | Aprox 11 [m/s] |
| Momento de inercia | $50 \cdot 10^5$ [Kg*m ²] |
| CAJA MULTIPLICADORA | |
| Tipo | Planetario |
| Relación | 85 |
| GENERADOR | |
| Tipo | DFIG |
| Velocidad | 750 - 1800 [rpm] |
| TRANSMISIÓN MECÁNICA | |
| Rigidez del eje de baja velocidad | $114 \cdot 10^5$ [Nm/rad] |
| Amortiguamiento del eje de baja velocidad | $756 \cdot 10^5$ [Nm*seg/rad] |
| Rigidez del eje de alta velocidad | $1 \cdot 10^5$ [Nm/rad] |
| Amortiguamiento del eje de alta velocidad | $1 \cdot 10^3$ [Nm*seg/rad] |
| Inercia del tren de engranes de baja y alta velocidad | 0.01 [Kg*m ²] |

Cuadro C.1: Especificaciones técnicas de la turbina NM 2000/82

Apéndice D

Manual de usuario Matlab

Se inicia Matlab y se accede al archivo `maqasincrona.m` que se encuentra en la carpeta Matlab del CD anexo. Una vez cargado el archivo se abre una interfaz grafica como la que se observa en La tabla D.1. por medio de esta se simula el comportamiento de la máquina de inducción, donde se tiene que los datos a ingresar son:

R_s : Resistencia del estator.

X_s : Reactancia del estator.

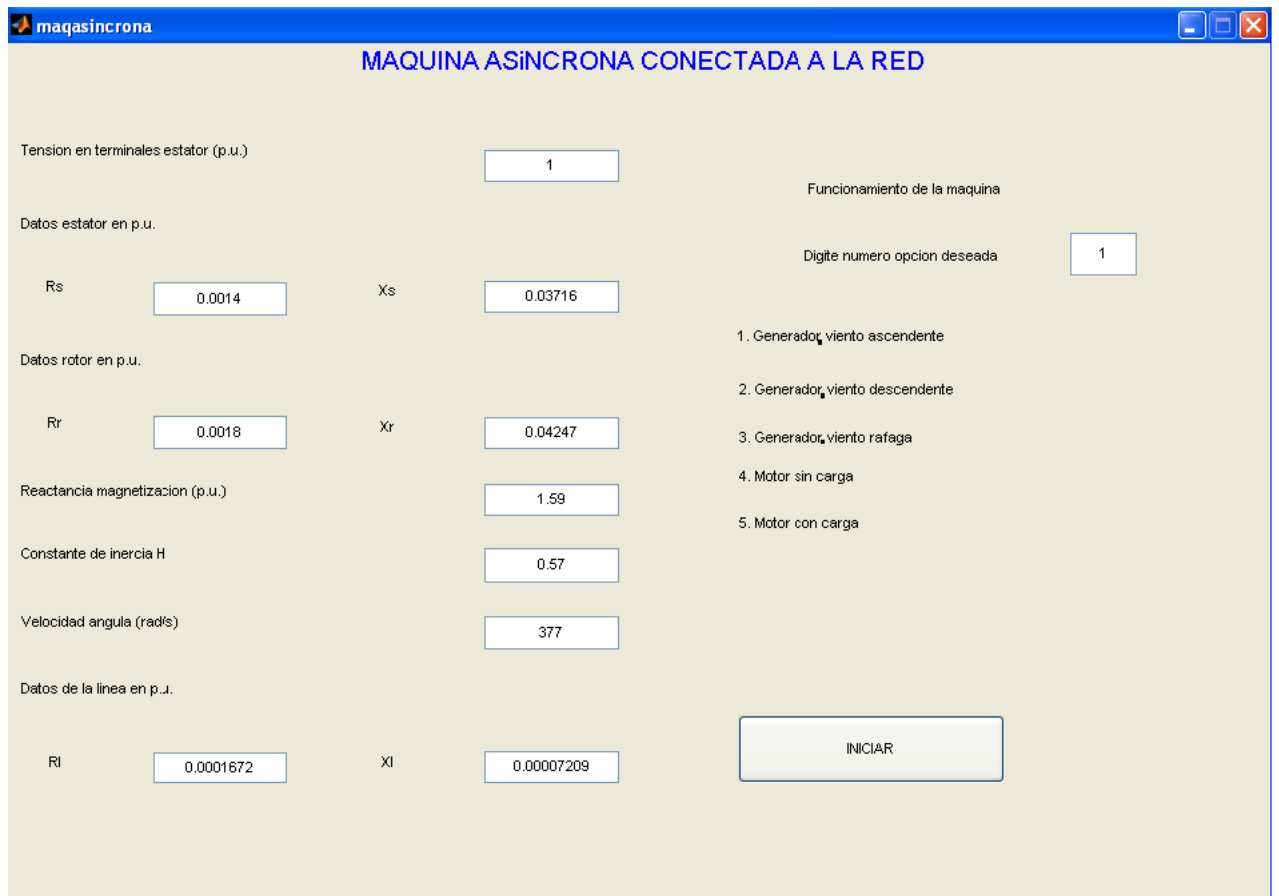
R_r : Resistencia del rotor.

X_r : Reactancia del rotor.

R_l : Resistencia de la línea de transmisión.

X_l : Reactancia de la línea de transmisión.

Adicionalmente se debe ingresar, la velocidad angular, la constante de inercia. Después de ingresar estos datos se selecciona la serie de viento, y su operación como motor o como generador. Una vez ingresados los datos se hace clic en el botón de inicio para dar comienzo a la simulación.



Cuadro D.1: Interfaz gráfica Matlab

Apéndice E

Manual de usuario ATP

Se inicia ATPDraw, se procede a abrir el archivo motorindsv que se encuentre en la carpeta ATP del CD anexo. Una vez abierto el archivo se observa un circuito como el de la figura (E.1), este es el esquema que se usa para modelar una máquina asíncrona en ATP. La máquina asíncrona se modela utilizando la máquina universal (UM type 3) de ATP. No se tiene en cuenta la saturación del circuito magnético, y el sistema mecánico se modela mediante un equivalente eléctrico. Para introducir los datos de los parámetros eléctricos se debe hacer doble clic en el componente UM – 3 y se abrirá una ventana como la que se muestra en la figura (E.2).

Los datos requeridos se presentan a continuación:

- LMUD: Inductancia de magnetización de eje directo
- LMUQ: Inductancia de magnetización de eje cuadratura
- L0 R0 Ld Rd Lq Rq: Resistencia e inductancia en transformada de park en el estator.
- R1, L1, R2, L2: Resistencias e inductancias características del rotor.
- NONE encienda/apague la saturación.
- SLIP: Deslizamiento.

Red mecánica:

- (momento de inercia) <->Capacitancia (1kg/m2 <->1 Farad)

- (constante de resorte) \leftrightarrow Inductancia inversa (1 Nm/rad \leftrightarrow 1/Henry)
- (viscous damping) \leftrightarrow Conductancia (1 Nm/rad/s \leftrightarrow 1/ohm)
- Velocidad angular \leftrightarrow Voltaje (1 rad/s \leftrightarrow 1 Volt)
- Torque \leftrightarrow Corriente (1 Nm \leftrightarrow 1 Amp)
- Angulo \leftrightarrow Carga (1 rad \leftrightarrow 1 Coulomb)

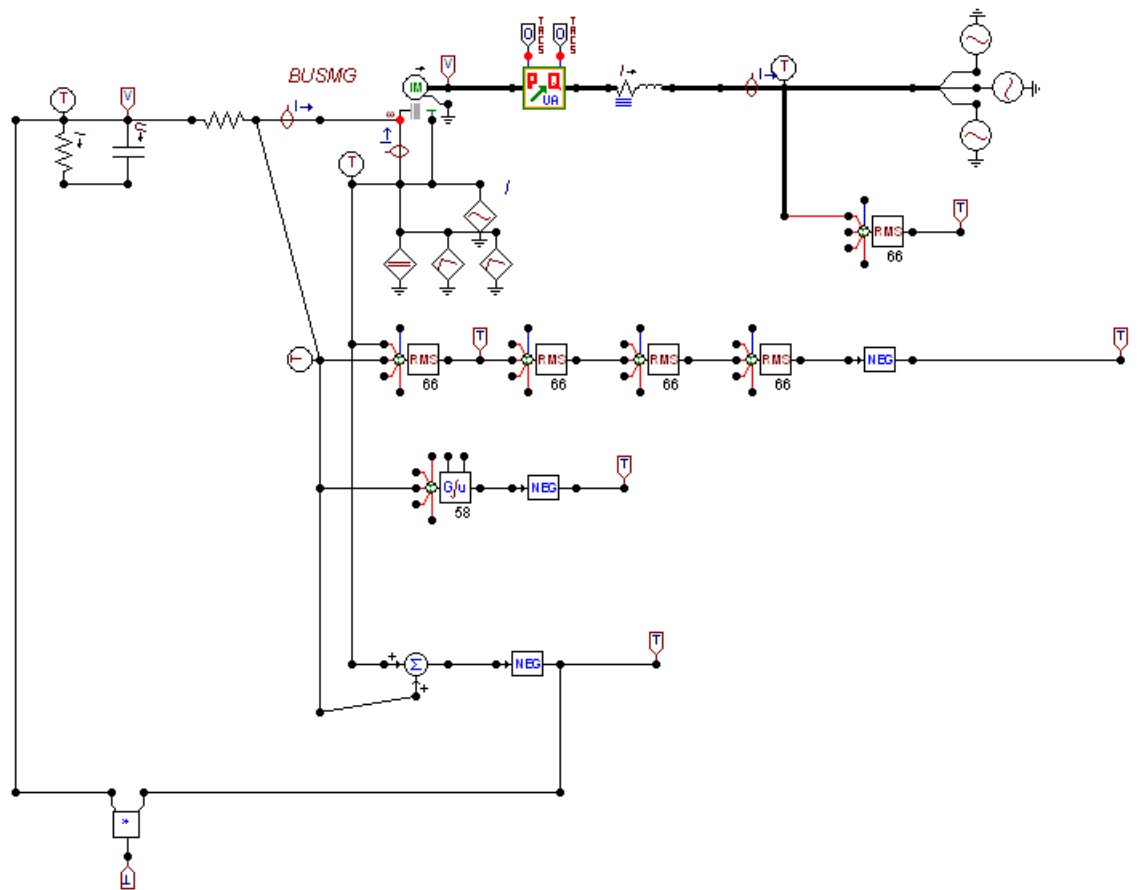


Figura E.1: Modelo de la máquina en ATP

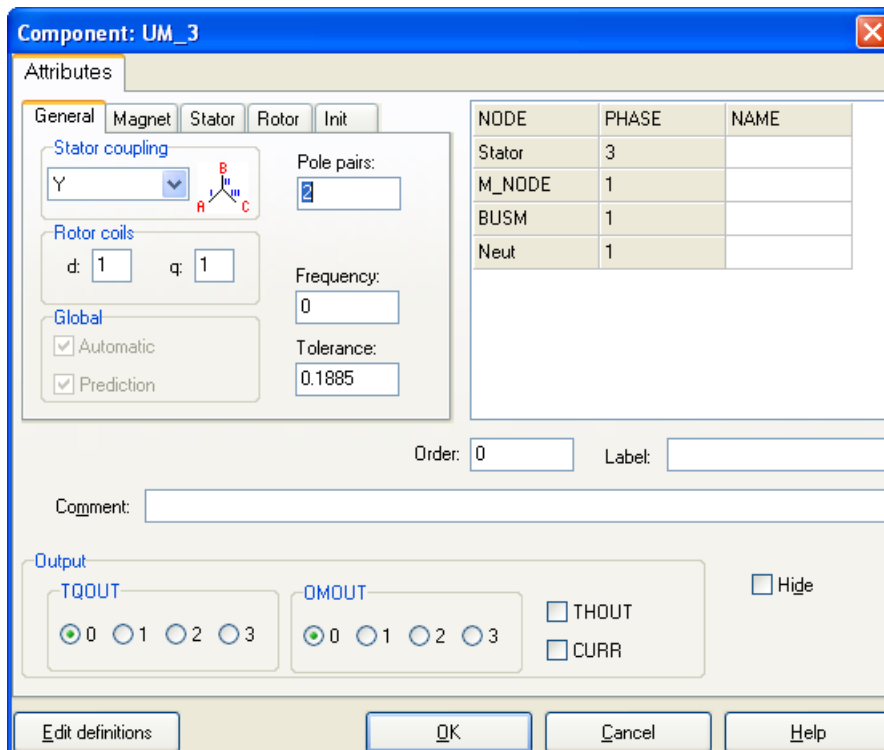


Figura E.2: ventan de ingreso de datos

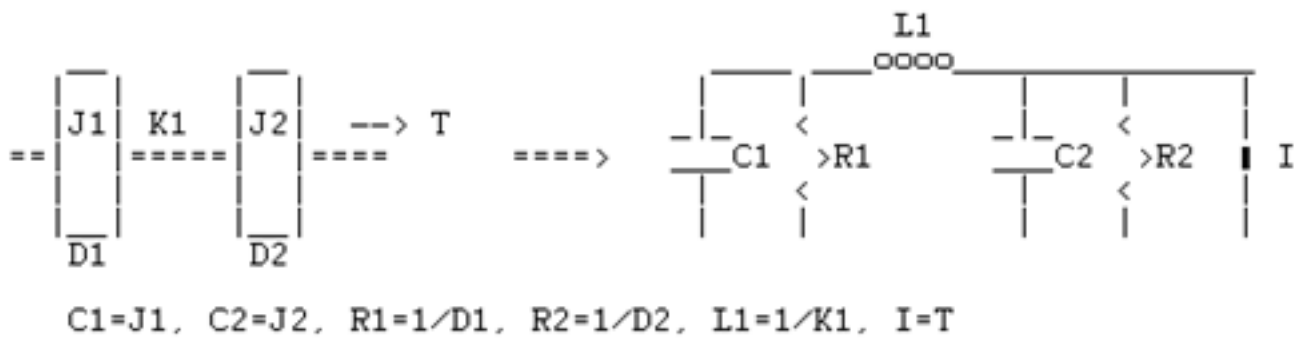


Figura E.3: Modelo del sistema mecánico

Con el objetivo de modelar la máquina asíncrona como motor o generador se debe variar el torque de esta, por lo tanto se debe abrir el archivo SeriesV que se encuentra en la carpeta ATP del CD anexo. En este archivo estan 4 modelos de torque para la máquina de inducción. Los 3 primeros corresponden a distintos tipos de vientos a los que puede estar sometida la máquina de inducción cuando se emplea como generador eólico y el 4 corresponde a la máquina trabajando como motor. Finalmente, se escoge el modelo deseado y se pega en el nodo del torque del archivo motorinsv.