

**Pau Joanpere Arruche**

**Estudio del generador de inducción en topología  
TSCAOI**

**TREBALL DE FI DE GRAU**

**Dirigido por José Antonio Barrado Rodrigo**

**Grado de Ingeniería Eléctrica**



**UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI**

**Tarragona**

**2023**

# Índice

1. Objeto.....	4
2. Alcance.....	4
3. Antecedentes .....	4
4. Programas de calculo .....	6
5. Definiciones y abreviaturas.....	6
6. Experimental .....	7
6.1. Metodología.....	7
6.2. Parámetros del motor .....	8
6.3. Resultados.....	10
6.3.1. Sin carga resistiva.....	10
6.3.2. Frecuencia del motor constante variación de la tensión de excitación.....	12
6.3.3. Variación de la velocidad del motor con tensión de excitación constante:....	17
7. Simulación.....	22
7.1. Parámetros del motor de alta potencia.....	23
7.2. Resultados simulación.....	26
8. Sistema de control.....	28
9. Conclusiones .....	32
10. Referencias .....	33

## Índice figuras

Figura 1 Conexión TSCAOI de las fases del estator del motor.....	5
Figura 2 Representación de las conexiones de las fases de un motor en configuración TSCAOI, excitación en la fase aislada. ....	5
Figura 3 Representación de las conexiones de las fases de un motor en configuración TSCAOI, excitación en las fases en serie.....	5
Figura 4 Esquema de generación a velocidad constante. ....	6
Figura 5 Esquema de generación con convertidores AD-DC DC-AC. ....	6
Figura 6 Placa de características del motor del laboratorio.....	8
Figura 7 Curva $V_c$ - $f$ del motor de 0.37 kW, $V_c$ constante, sin carga resistiva.....	10
Figura 8 Curva $I_c$ - $f$ del motor de 0.37 kW, $V_c$ constante, sin carga resistiva. ....	11
Figura 9 Curva $P_e$ - $f$ , $Q_e$ - $f$ i $S_e$ - $f$ del motor de 0.37 kW, sin carga resistiva.....	11
Figura 10 Curva $n$ - $V_c$ del motor de 0.37 kW, $f$ constante.....	12
Figura 11 Curva $I_c$ - $V_c$ del motor de 0.37 kW, $f$ constante.....	13
Figura 12 Curva $P_c$ (absorbida)- $V_c$ del motor de 0.37 kW, $f$ constante.....	13
Figura 13 Curva $V_o$ - $V_c$ del motor de 0.37 kW, $f$ constante.....	14
Figura 14 Curva $I_o$ - $V_c$ del motor de 0.37 kW, $f$ constante.....	14
Figura 15 Curva $P_o$ - $V_c$ del motor de 0.37 kW, $f$ constante.....	15
Figura 16 Curva $P_m$ - $V_c$ del motor de 0.37 kW, $f$ constante.....	15
Figura 17 Curva $Q_c$ - $V_c$ del motor de 0.37 kW, $f$ constante. ....	16
Figura 18 Curva $P_e$ - $V_c$ , $P_o$ - $V_c$ i $P_m$ - $V_c$ del motor de 0.37 kW, $f$ constante. ....	16
Figura 19 Grafica par de un motor en función del deslizamiento. ....	17
Figura 20 Curva $n$ - $f$ del motor de 0.37 kW, $V_c$ constante.....	18
Figura 21 Curva $I_c$ - $f$ del motor de 0.37 kW, $V_c$ constante.....	18
Figura 22 Curva $P_c$ - $f$ del motor de 0.37 kW, $V_c$ constante.....	19
Figura 23 Curva $V_o$ - $f$ del motor de 0.37 kW, $V_c$ constante.....	19
Figura 24 Curva $I_o$ - $f$ del motor de 0.37 kW, $V_c$ constante.....	20
Figura 25 Curva $P_o$ - $f$ del motor de 0.37 kW, $V_c$ constante.....	20
Figura 26 Curva $P_m$ - $f$ del motor de 0.37 kW, $V_c$ constante.....	21
Figura 27 Curva $Q$ - $f$ del motor de 0.37 kW, $V_c$ constante. ....	21
Figura 28 Circuito que simula el comportamiento del motor en configuración TSCAOI en el programa PSIM.....	22
Figura 29 Motor comercial.....	23
Figura 30 Tabla de características de diferentes motores asíncronos de jaula comerciales.24	
Figura 32 Curvas $V_o$ - $V_c$ simuladas de los motores de 0.37 kW i 15kW, $f_c$ constante.....	27
Figura 33 Curva $P_m$ - $f$ del motor de 0.37 kW i 15kW, $f_c$ constante. ....	27
Figura 34 Esquema lazo de control de tensión, tensión de entrada rms. ....	28
Figura 35 Esquema lazo de control de tensión, tensión de entrada sinusoidal.....	28
Figura 36 Esquema lazo de control de frecuencia, valor de referencia en Hz.....	29
Figura 37 Esquema lazo de control de frecuencia, valor de referencia en $\text{min}^{-1}$ .....	29
Figura 38 Reacción de la tensión de la carga a la variación de esta sin lazo de control de tensión.....	29
Figura 39 Reacción de la tensión de la carga a la variación de esta con lazo de control de tensión.....	30
Figura 40 Circuito de simulación del comportamiento de un generador en configuración TSCAOI, con un lazo de control de tensión. Tensión de control mediante fuente de tensión controlada. ....	30

Figura 41 Circuito de simulación del comportamiento de un generador en configuración TSCAOI, con un lazo de control de tensión. Tensión de control mediante inversor pwm.... 31

# 1. Objeto

Analizar el comportamiento de un motor trifásico asíncrono de jaula de ardilla en configuración TSCAOI (Dos fases conectadas en serie y una aislada) utilizado para alimentar una carga monofásica aislada de la red.

Proponer un sistema de control para poder alimentar una carga variable y trabajar con velocidades del rotor variables.

# 2. Alcance

Caracterizar el comportamiento de un motor en configuración TSCAOI experimentalmente medir las reacciones ante:

- La variación de la tensión de control para las siguientes cargas:
  - Sin carga resistiva.
  - 220  $\Omega$
  - 440  $\Omega$
  - 660  $\Omega$
- La variación la velocidad del rotor para las siguientes cargas:
  - 220  $\Omega$
  - 440  $\Omega$
  - 660  $\Omega$

Simular el comportamiento de un motor de mayor potencia en configuración TSCAOI.

Diseñar un sistema de control capaz de mantener una tensión y frecuencia adecuada ante la variación de cargas y velocidad del rotor.

# 3. Antecedentes

Los motores asíncronos de jaula de ardilla son conocidos por su sencillez, robustez y eficiencia siendo más compactos y ligeros que los motores síncronos.

Además, es conocido que los generadores monofásicos son menos eficientes que los motores trifásicos, por esto el sistema generador propuesto emplea una máquina de inducción de jaula trifásica para generar electricidad monofásica.

Como estos motores están disponibles en una gran variedad de potencias pueden ser usados para producir energía en lugares remotos para alimentar centrales meteorológicas, pequeñas bombas de agua, etc. O para propósitos que requieren más potencia como alimentar una casa, o una urbanización, etc. Además al utilizar motores muy populares en la industria se podrían utilizar para adaptar un sistema que proporcione energía a las poblaciones desconectadas de la red por causa de accidentes o catástrofes naturales.

La configuración TSCAOI significa dos series conectadas y una aislada (two series connected and one isolated), esta consiste en desacoplar magnéticamente los dos conjuntos de devanados, lo que permite un control independiente sobre ellos, en las conexiones de las fases del estator se aísla una fase y las dos restantes se conectan en serie, por ejemplo la siguiente imagen:

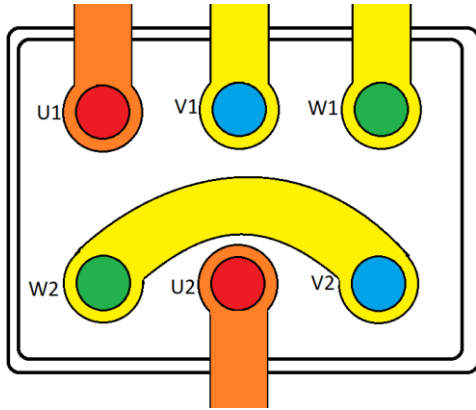


Figura 1 Conexión TSCAOI de las fases del estator del motor:

En esta configuración se utiliza cualquiera de las tres fases para aplicar una excitación controlada, esa fase será llamada fase de excitación o fase de control, y las fases restantes se conectan en serie, como devanado de potencia se conectarán a la carga o sistema que se desee alimentar.

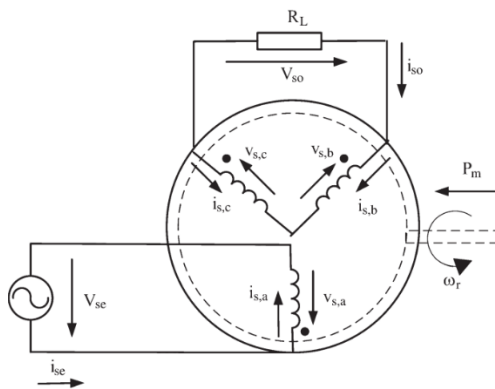


Figura 2 Representación de las conexiones de las fases de un motor en configuración TSCAOI, excitación en la fase aislada.

También se puede conectar la carga a la fase aislada siendo la fase de potencia, y la fuente controlada a las fases conectadas en serie siendo las fases de excitación o control. Como se observa a continuación.

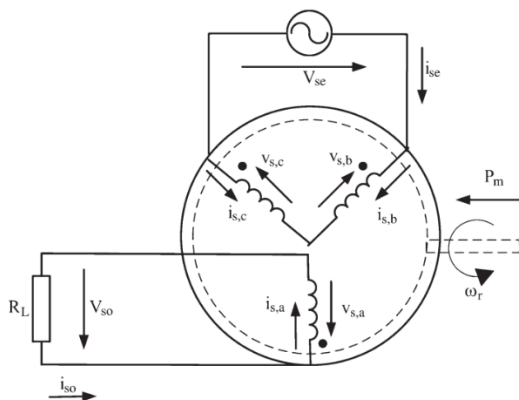


Figura 3 Representación de las conexiones de las fases de un motor en configuración TSCAOI, excitación en las fases en serie.

A continuación, planteo dos esquemas de generación de electricidad en generadores de asíncronos de jaula de ardilla trifásicos en configuración TSCAOI para producir a frecuencia constante:

El primer caso es conectar las fases de potencia a la carga y un condensador en paralelo. El modelo más simple al evitar etapas intermedias, pero no puede seguir el punto de máxima potencia generada, trabaja a velocidad de rotor constante, no admite variación o cambiará la frecuencia de la electricidad generada.

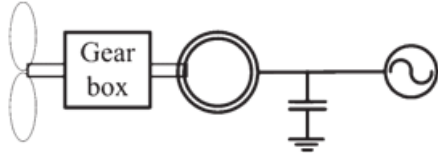


Figura 4 Esquema de generación a velocidad constante.

En el segundo caso se conecta a la fase de potencia un convertidor alterna-continua continua-alterna obteniendo la frecuencia y voltaje deseados, trabaja a velocidad variable, se puede seguir el punto de máxima potencia, pero es menos eficaz y es más caro por las etapas intermedias.

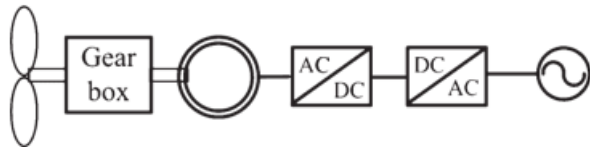


Figura 5 Esquema de generación con convertidores AD-DC DC-AC.

Aunque esta modalidad es novedosa es reciente, ya hay estudios [3], donde presentan una técnica mediante la cual una máquina de inducción de jaula trifásica se puede utilizar como un generador monofásico en condiciones de velocidad variable tanto subsíncronas como supersíncronas sin una etapa inversora intermedia.

También se ha publicado un artículo sobre los cálculos matemáticos para el modelo de estado estacionario [15], que se deriva utilizando componentes simétricos, prediciendo el comportamiento del generador en la configuración TSCAOI.

## 4. Programas de calculo

Para simular circuitos eléctricos se ha utilizado la versión demo de la aplicación PSIM\_2021b.

Para dibujar los lazos de control se ha utilizado MATLAB R2023a.

## 5. Definiciones y abreviaturas

P: número de polos

$S_N$ : deslizamiento en el punto nominal del motor de inducción trifásico.

S: deslizamiento del motor de inducción trifásico.

$R_r$ : resistencia de fase del rotor.

$R_s$ : resistencia de fase del estator.

$X_m$ : reactancia magnetizante del estator.

Xs: reactancia de fuga del estator  
Xr: reactancia de fuga del rotor referida al lado del estator.  
Lm: inductancia magnetizante del estator.  
Ls: inductancia de fuga del estator.  
Lr: inductancia de fuga del rotor referida al lado del estator.  
f: Frecuencia de alimentación del motor motriz.  
n: velocidad de giro del rotor.  
Vc: tensión en la fase de control.  
Ic: intensidad en la fase de control.  
Pc: potencia activa en la fase de control.  
Qc: potencia reactiva en la fase de control.  
Sc: potencia aparente en la fase de control.  
Vo: tensión en la carga.  
Io: intensidad en la carga.  
Po: potencia activa absorbida por la carga.  
Pm: potencia activa generada por el motor.

## 6. Experimental

Para analizar el comportamiento de un motor real se utilizaron los recursos disponibles en los laboratorios del departamento de Ingeniería Eléctrica de la universidad Rovira i Virgili, campus Sescelades.

Se utilizaron dos motores trifásicos de 0.37 kW, conectados físicamente por los rotores, uno actuará como motor motriz y el otro como generador asíncrono, el motor se alimentó con una fuente con capacidad de variar la frecuencia, las cargas utilizadas provinieron de un banco de cargas resistivas, inductivas y capacitivas, y para las mediciones se utilizaron dos voltímetros, 2 amperímetros, 1 vatímetro, 1 tacómetro.

### 6.1. Metodología

Al motor motriz se le conecto un modulador de frecuencia para controlar la velocidad de giro del rotor del motor, que está conectado al generador.

Del generador se conectaron las fases en configuración TSCAOI, la fase aislada se conectó a una fuente de tensión a 50 Hz y las dos fases restantes se conectaron en serie siendo las fases de potencia.

Para medir los valores de la excitación se conectan un voltímetro, un amperímetro y un vatímetro a la fase de excitación, y para conocer los datos de la carga se conecta un voltímetro i amperímetro a la carga resistiva conectada a las fases de potencia.

Las fases de potencia se conectan a las cargas deseadas, para optimizar la tensión de salida se conecta una capacitancia en paralelo.

Para escoger la capacitancia en paralelo a las fases de potencia se aplicó al motor motriz una frecuencia de 52 Hz para trabajar a una velocidad superior a al sincronismo, se conectan las fases al armario de cargas del que se dispone y con las capacitancias disponibles se busca la tensión máxima de salida.

Una vez escogida la capacitancia se realizarán mediciones con: tensión de excitación constante y variación de la velocidad del rotor, en vacío y con 3 cargas diferentes, y para una frecuencia de excitación para el motor motriz constante se variará la tensión de excitación de la fase de excitación del generador, para 3 cargas diferentes.

Los valores a medir son; tensión, intensidad y potencia en la fase de control, tensión e intensidad en la carga resistiva, y velocidad del rotor.

Se analizan los datos obtenidos y se muestra el comportamiento en graficas.

Debido a la limitación de control de la variación de frecuencia para motores de alta potencia se simulará un circuito en PSIM que represente la tendencia del comportamiento del generador en configuración TSCAOI, utilizando los parámetros del motor utilizado como generador, y además simular el comportamiento de un motor de mayor potencia utilizando el mismo circuito actualizando los parámetros a los del motor de mayor potencia.

## 6.2. Parámetros del motor

A partir de los datos de la placa de características del motor utilizado se calcularán aproximadamente los parámetros deseados utilizando la metodología presentada en el proyecto de final de grado [14].

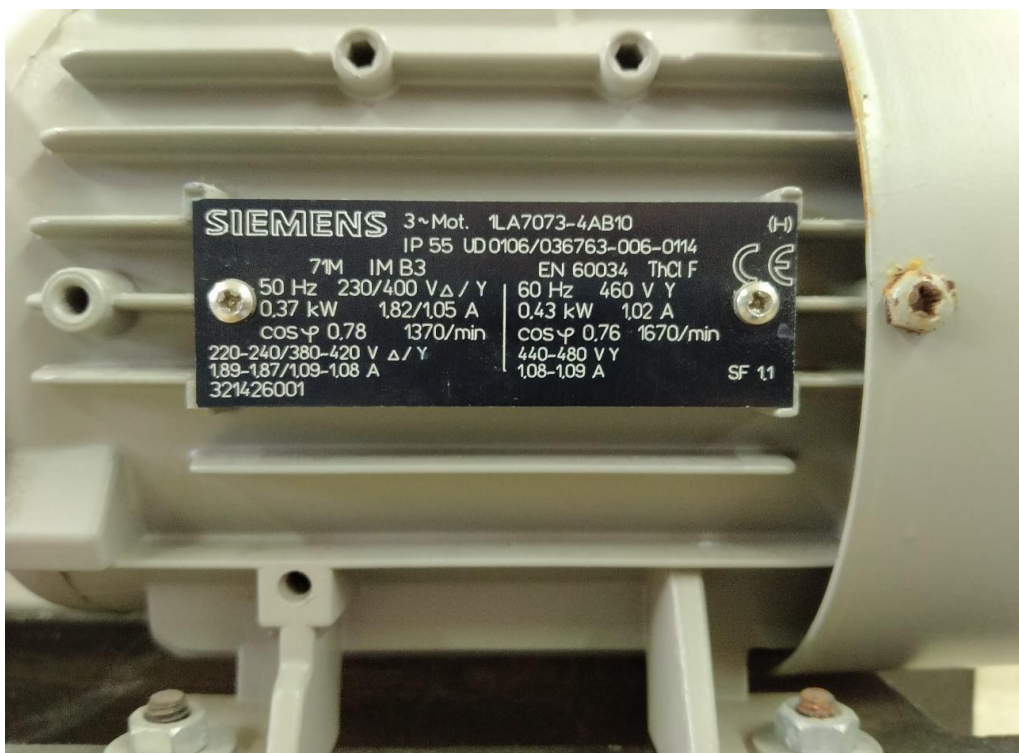


Figura 6 Placa de características del motor del laboratorio.

Al trabajar a 50 hz la velocidad de sincronismo es de 1500 min<sup>-1</sup>

P=4

(Eficiencia al máximo rendimiento 65.8%)

$$S_N = \frac{1500-1370}{1500} = 0,087 \quad (1)$$

$$R_r = \frac{v^2 * S_N}{P_N} = \frac{230^2 * 0,087}{370} = 12,44 \Omega \quad (2)$$

$$R_s = 1,5 * R_r = 18,66 \Omega \quad (3)$$

$$X_m = \frac{v^2}{P_N * \tan((\cos^{-1}(\cos \varphi)))} = \frac{230^2}{370 * \tan((\cos^{-1}(0,78))} = 178,2 \quad (4)$$

$$X_s = 0,05 * X_m = 8,91 \quad (5)$$

$$X_r = 0,05 * X_m = 8,91 \quad (6)$$

$$L_m = \frac{X_m}{2 * \pi * f} = \frac{178,2}{100\pi} = 0,567 \quad (7)$$

$$L_s = \frac{X_s}{2 * \pi * f} = \frac{8,91}{100\pi} = 0,02836 \quad (8)$$

$$L_r = \frac{X_d}{2 * \pi * f} = \frac{8,91}{100\pi} = 0,02836 \quad (9)$$

Obteniendo los siguientes parámetros:

n<sub>s</sub>=1500 min<sup>-1</sup>

R<sub>r</sub>=12,44 Ω

R<sub>s</sub>=18,66 Ω

L<sub>s</sub>=28,36 mH

L<sub>r</sub>=28,36 mH

L<sub>m</sub>=576 mH

### 6.3. Resultados

Al conectar una carga puramente capacitiva a la salida de las fases de potencia, en este caso se observó con la combinación de cargas capacitivas disponibles,  $40\ \mu\text{F}$  proporcionaba la tensión más elevada, los siguientes valores disponibles,  $30\ \mu\text{F}$  y  $50\ \mu\text{F}$  daban valores de tensión inferiores a  $40\ \mu\text{F}$ .

Esta carga capacitiva siempre estará conectada en paralelo a la fase de potencia y carga resistiva.

#### 6.3.1. Sin carga resistiva

A la fase de potencia no se conecta ninguna carga resistiva, en la fase de excitación se aplican  $110\ \text{V}_{\text{rms}}$  y con el variador de frecuencia del motor motriz se modifica la velocidad del rotor del generador, como no hay carga resistiva no hay intensidad de la carga  $I_o$ , ni potencia consumida por esta  $P_o$ .

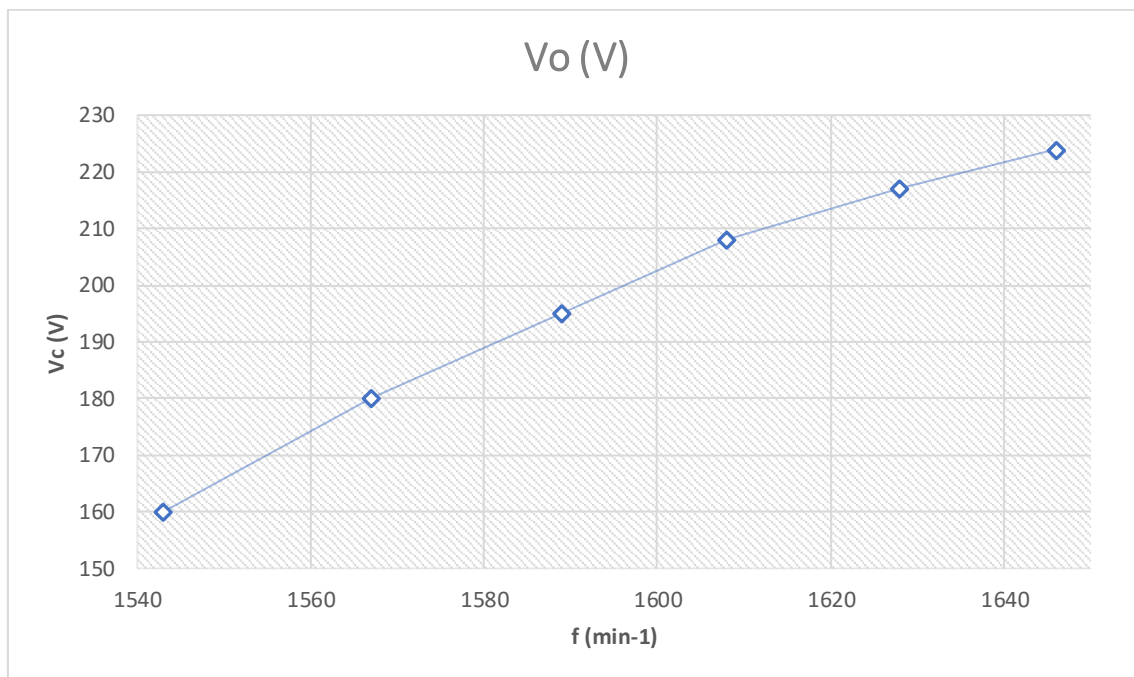


Figura 7 Curva  $V_c$ - $f$  del motor de  $0.37\ \text{kW}$ ,  $V_c$  constante, sin carga resistiva.

Se observa que al aumentar las revoluciones aumenta la tensión de salida con tendencia a disminuir el incremento, aparenta haber un valor de tensión máximo.

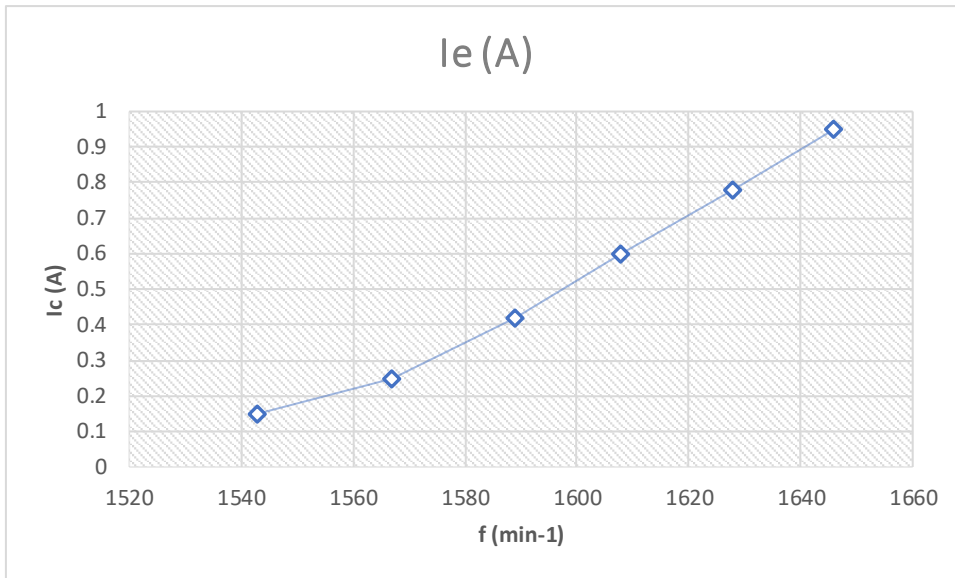


Figura 8 Curva  $I_e$ - $f$  del motor de 0.37 kW,  $V_c$  constante, sin carga resistiva.

Se observa que al aumentar las revoluciones aumenta la intensidad, puesto que la tensión tiende a no aumentar, la intensidad tiende a incrementar proporcionalmente a la potencia.

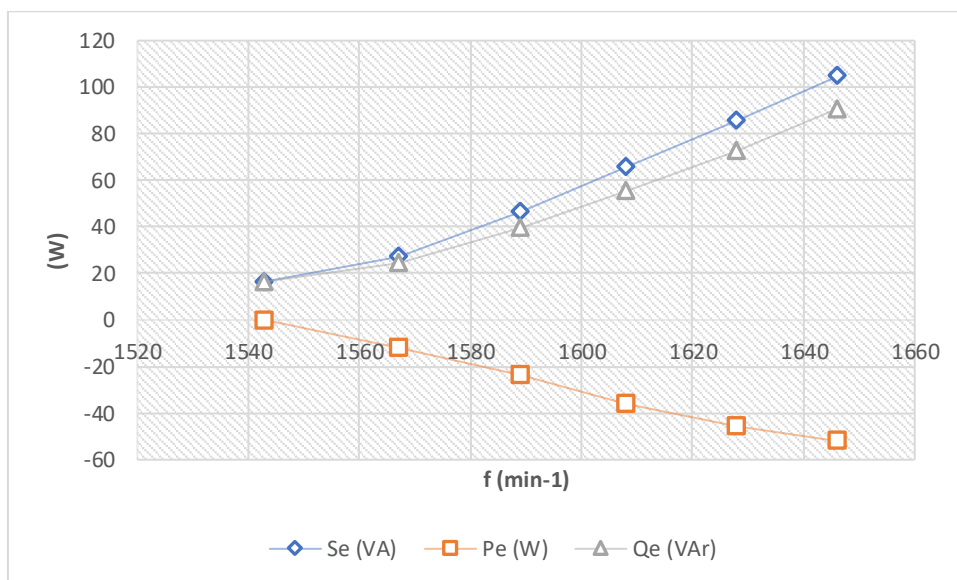


Figura 9 Curva  $P_e$ - $f$ ,  $Q_e$ - $f$   $S_e$ - $f$  del motor de 0.37 kW, sin carga resistiva.

En la gráfica observamos las potencias activa, reactiva y aparente de la fase de excitación. Como no hay una carga resistiva, la potencia activa que se aprecia es la potencia generada por el generador que es absorbida por la fuente de tensión de la fase de excitación, al aumentar las revoluciones aumenta la potencia producida por el generador y la potencia absorbida por la fuente de tensión.

La potencia reactiva proporcionada por la fuente de tensiones debida a las inductancias del motor y la carga capacitiva de las fases de potencia se observa que esta potencia reactiva aumenta al aumentar las revoluciones.

Al aumentar las revoluciones del motor aumenta la potencia de este, viéndose reflejado en un aumento de intensidad y tensión.

### 6.3.2. Frecuencia del motor constante variación de la tensión de excitación

En este apartado se muestran gráficamente los datos recopilados al trabajar con una alimentación del motor motriz a frecuencia constante y variación de la tensión de excitación.

Se inicia las mediciones calibrando la tensión de excitación para que la intensidad de excitación sea de 0.3 A, después se observará como afecta la variación de tensión de excitación a la velocidad de rotación del rotor, intensidad y potencia de la fuente de excitación, la tensión intensidad y potencia de la carga y la potencia producida por el generador. Estas mediciones se comparan para 3 cargas diferentes: 220  $\Omega$ , 440  $\Omega$  y 660  $\Omega$ .

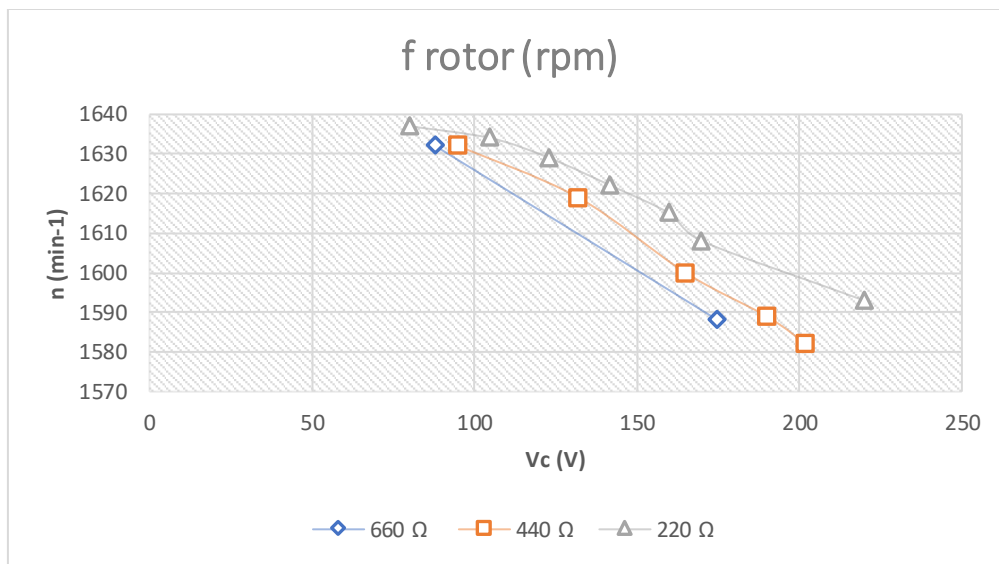


Figura 10 Curva n-Vc del motor de 0.37 kW, f constante.

Podemos observar cómo al aumentar la tensión de excitación disminuye la velocidad del rotor, esto es debido a que la tensión de la carga se incrementa, aumentando la potencia consumida, provocando un mayor esfuerzo que ralentiza el motor.

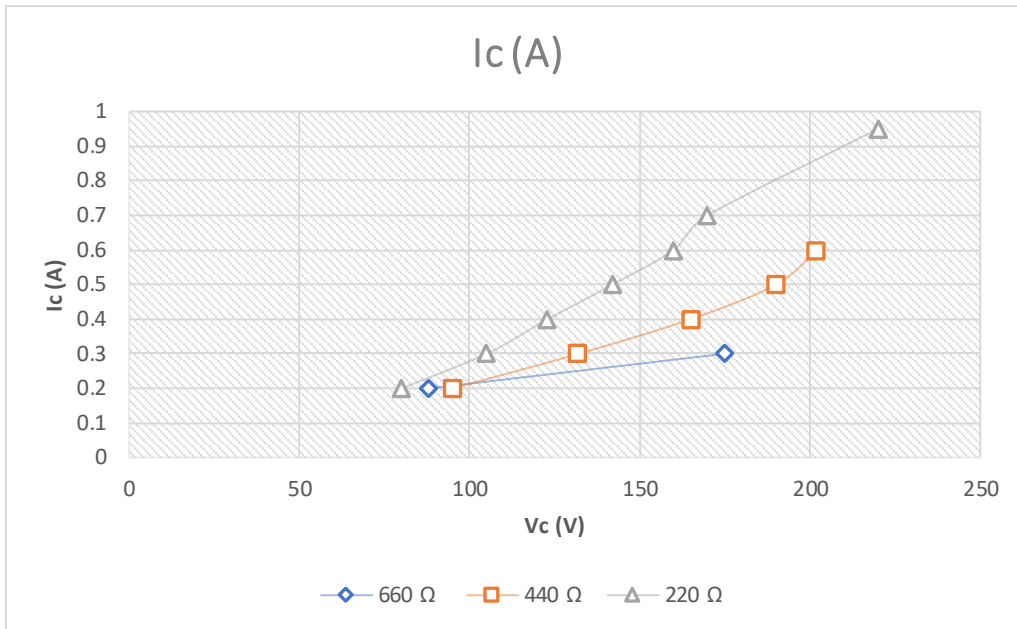


Figura 11 Curva  $I_c$ - $V_c$  del motor de 0.37 kW,  $f$  constante.

Al aumentar la tensión de excitación observamos como aumenta la intensidad de excitación aparentemente con una pendiente lineal, por lo tanto, directamente proporcional a la tensión de excitación y inversamente proporcional a la resistencia.

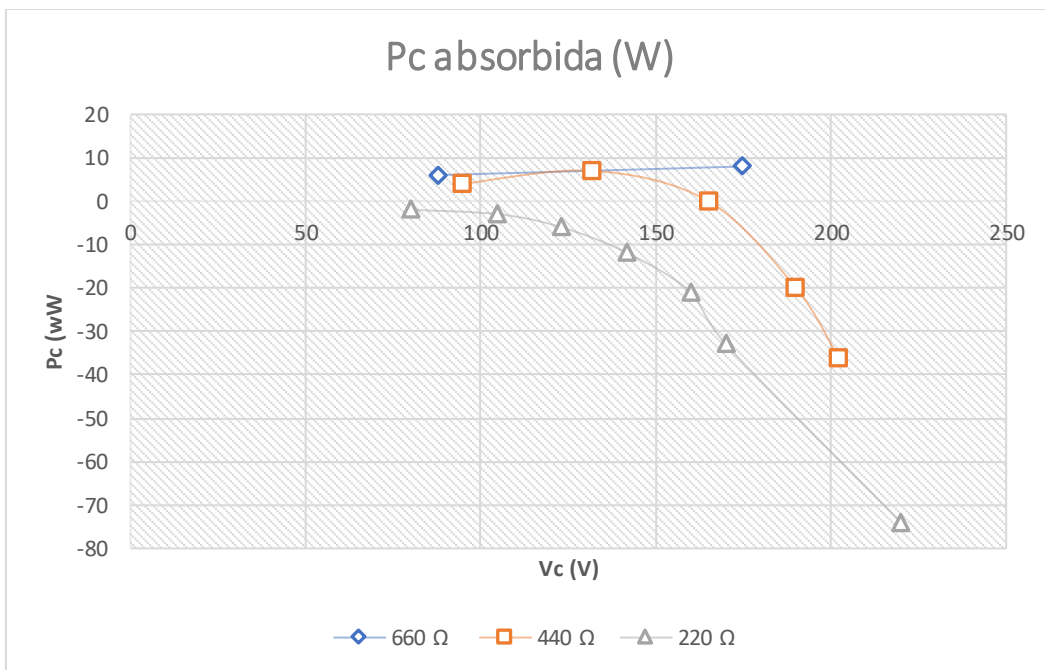


Figura 12 Curva  $P_c$ (absorbida)- $V_c$  del motor de 0.37 kW,  $f$  constante.

En esta grafica observamos la potencia que aporta la fuente de tensión de control, al aumentar la tensión de la fuente controlada aumenta la tensión de la carga, consecuentemente aumenta la potencia consumida por la carga y como el motor no puede aportar suficiente potencia, la fuente deja de absorber y comienza a suministrar la potencia restante.

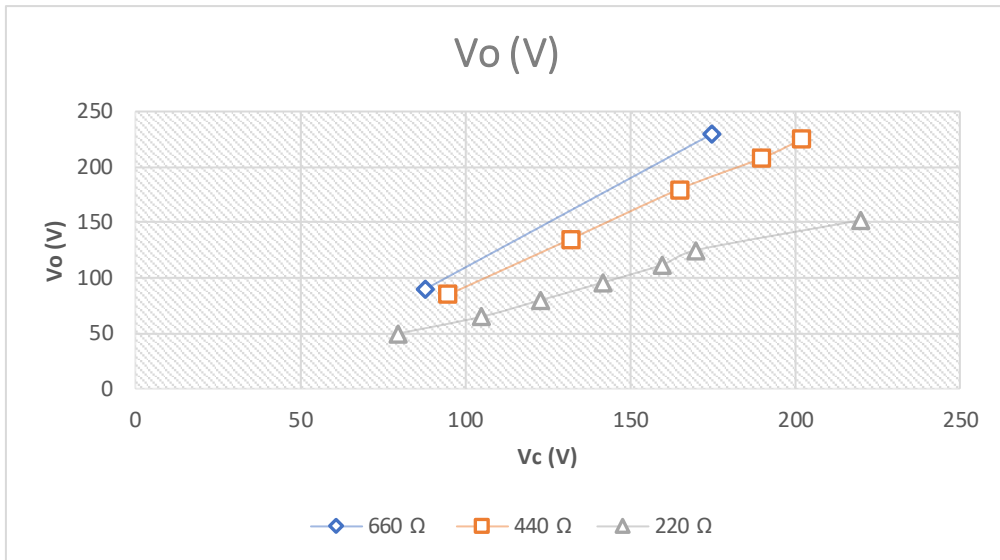


Figura 13 Curva  $V_o$ - $V_c$  del motor de 0.37 kW,  $f$  constante.

Comprobamos que la tensión de salida aumenta de forma lineal directamente proporcional a la fuente de tensión de excitación, a su vez, a pendiente es inferior a menor resistencia de carga, debido a las pérdidas en las resistencias de los devanados del generador, que son mayores al circular más corriente.

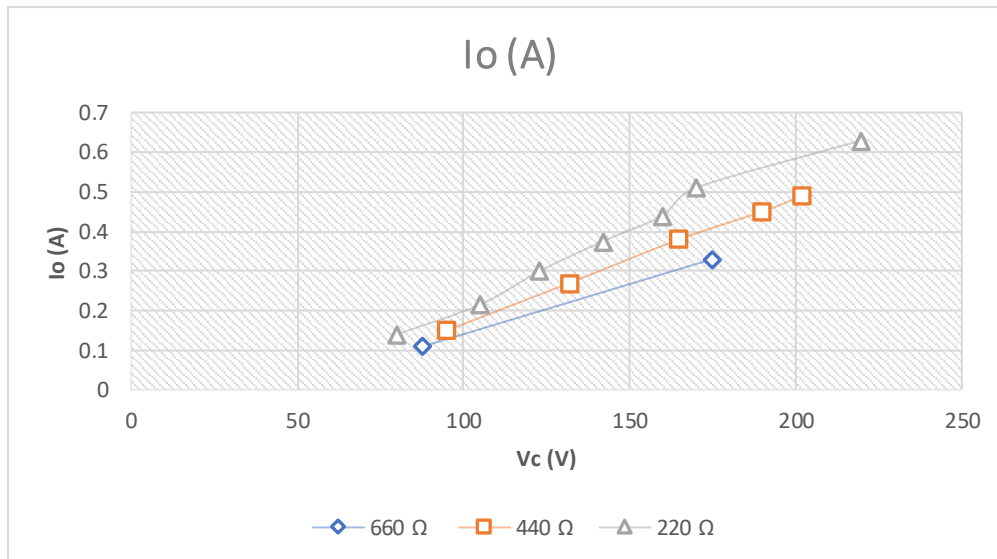


Figura 14 Curva  $I_o$ - $V_c$  del motor de 0.37 kW,  $f$  constante.

Como se puede observar en la gráfica anterior al aumentar la tensión de excitación aumenta a intensidad de la carga de forma aparentemente lineal y la pendiente es inversamente proporcional al valor de la carga resistiva.

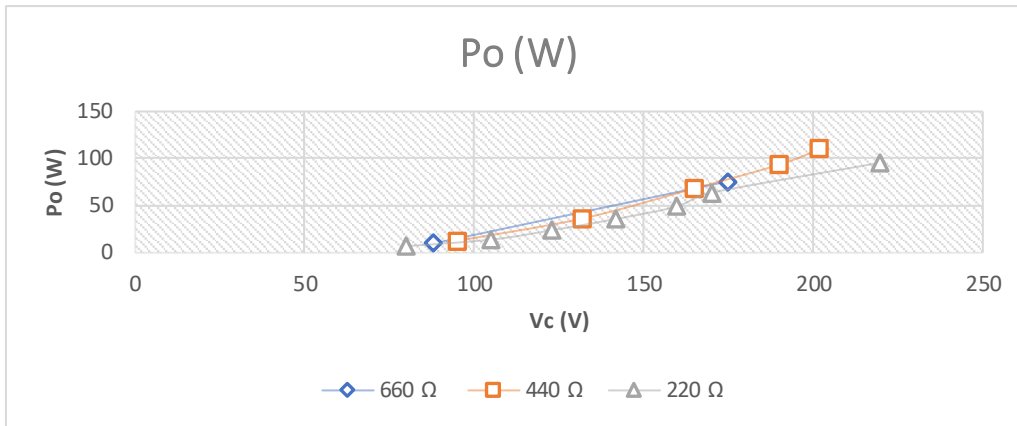


Figura 15 Curva Po-Vc del motor de 0.37 kW, f constante.

Al aumentar la tensión de excitación aumenta la potencia en la carga, se esperaría una pendiente  $\frac{V^2}{R}$  pero se ve reducida por las pérdidas del motor. En 660 Ω no se aprecia una tendencia exponencial, se necesitaría una mayor variación en la tensión para apreciar la curvatura, en 440 Ω se logra apreciar la tendencia exponencial, y en 220 Ω se aprecia más la tendencia exponencial, pero el último dato no parece seguir la tendencia, no se pudo tomar más datos en 220 Ω debido a que la corriente de excitación alcanzó los 0.95 A y el máximo permitido por los aparatos de mediciones es de 1 A.

El cambio de tendencia de la curva da 220 Ω puede ser debido al error humano al obtener erróneamente los datos de las dos últimas mediciones para 220 Ω o otros motivos.

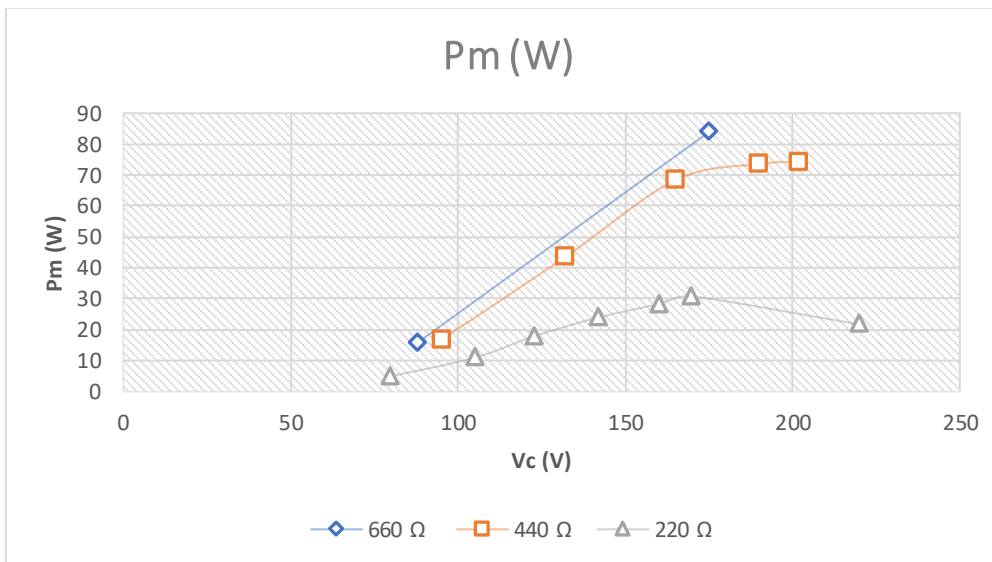


Figura 16 Curva Pm-Vc del motor de 0.37 kW, f constante.

En esta grafica se observa que la potencia generada por el generador aumenta hasta alcanzar un máximo, después disminuye, esto es debido a que al aumentar la potencia que consume la carga aumenta la intensidad que circula por las fases, esto produce el aumento del torque ralentizando el rotor, reduciendo la potencia producida.

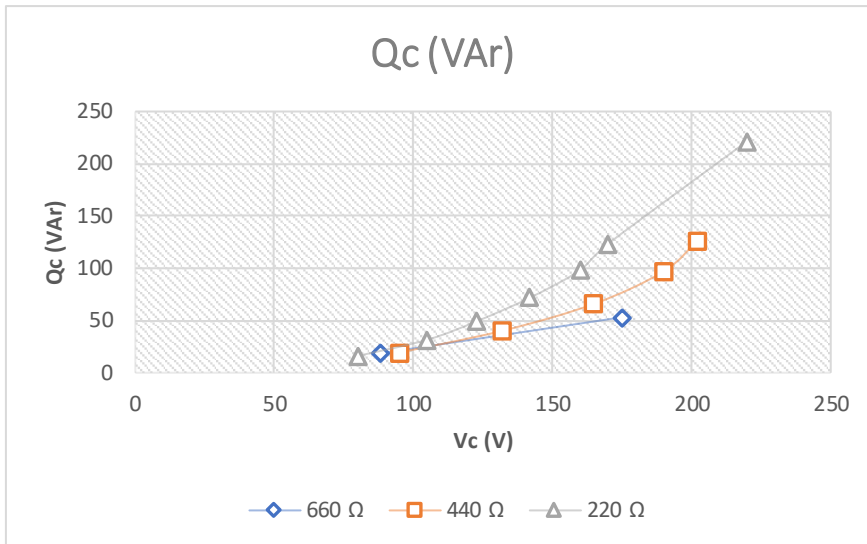


Figura 17 Curva  $Q_c$ - $V_c$  del motor de 0.37 kW,  $f$  constante.

En esta gráfica se observa que la potencia reactiva aumenta exponencialmente en función de la tensión de control y la pendiente de crecimiento es mayor para las cargas menos resistivas, las mediciones de la carga de 660 no se observa la evolución porque se necesitarían más mediciones.

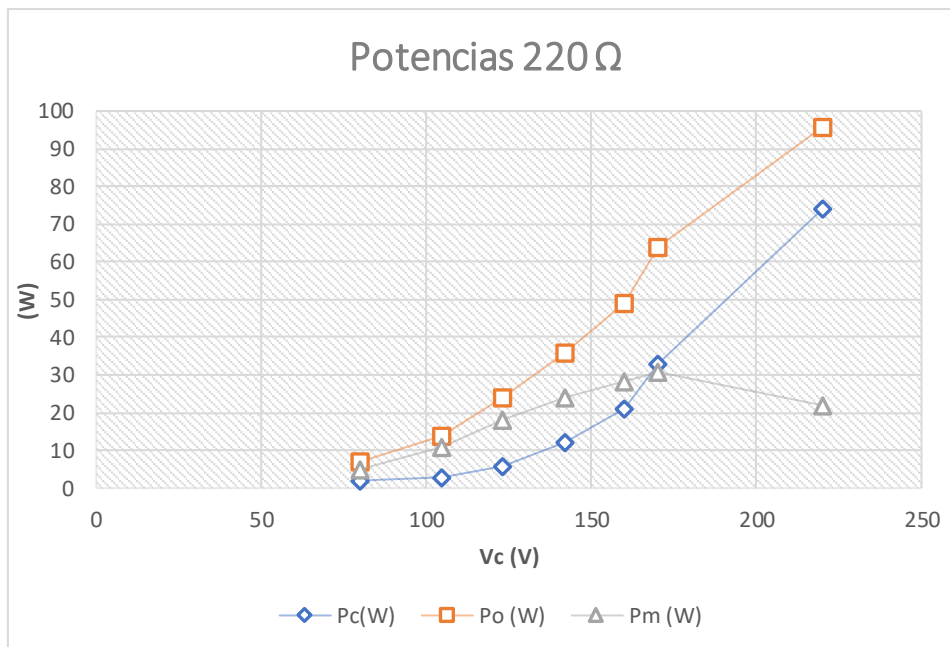


Figura 18 Curva  $P_e$ - $V_c$ ,  $P_o$ - $V_c$  i  $P_m$ - $V_c$  del motor de 0.37 kW,  $f$  constante.

Esta grafica observamos la potencia consumida por la carga, la potencia producida por el motor y a la potencia proporcionada por la fuente de excitación. Con esta gráfica se aprecia como la potencia del generador varía según la tensión de excitación ya que afecta también a las revoluciones del rotor, y al no producir suficiente potencia la fuente de excitación aporta la faltante.

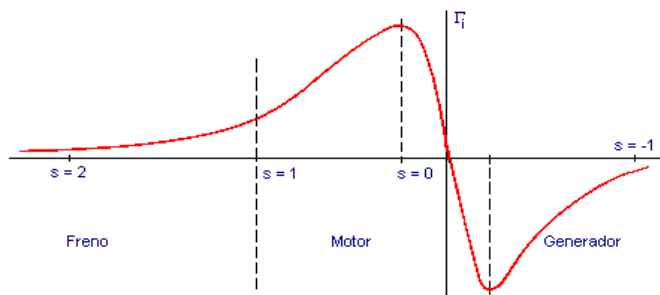


Figura 19 Grafica par de un motor en función del deslizamiento.

En esta imagen podemos observar el par producido por un motor depende del deslizamiento, al compararlo con la figura 17 se aprecia que el generador se encuentra en el punto de máxima potencia generada, la figura 17 está en función de  $V_c$ , pero como hemos visto en la figura 10,  $V_c$  afecta a la velocidad del rotor y por lo tanto deslizamiento, así justificando la variación del deslizamiento del rotor y el punto de máxima potencia producida en función de  $V_c$ .

### **6.3.3. Variación de la velocidad del motor con tensión de excitación constante:**

En este apartado se observará como afecta la variación de la velocidad del rotor a la tensión, intensidad y potencia de la carga, y la intensidad y potencia de la fuente de tensión para una tensión de excitación constante.

Los preparativos han consistido en: una vez alimentado el motor motriz a 55 Hz se modifica la tensión de excitación hasta medir una corriente de excitación de 0.3 A.

La metodología ha sido: medir los datos mencionados anteriormente para frecuencias de alimentación del motor motriz a 55, 54, 53, y 52 Hz (en el caso de 660  $\Omega$  no se apreciaba variación suficiente en la intensidad de excitación por lo cual se prescindió de las mediciones de 52 Hz), y se repiten las mediciones para 660  $\Omega$ , 440  $\Omega$  y 220  $\Omega$ .

Los gráficos están en función de la velocidad del rotor en  $\text{min}^{-1}$ . Excepto la figura 20 donde la gráfica muestra la velocidad del rotor en función de la frecuencia de alimentación del motor motriz.

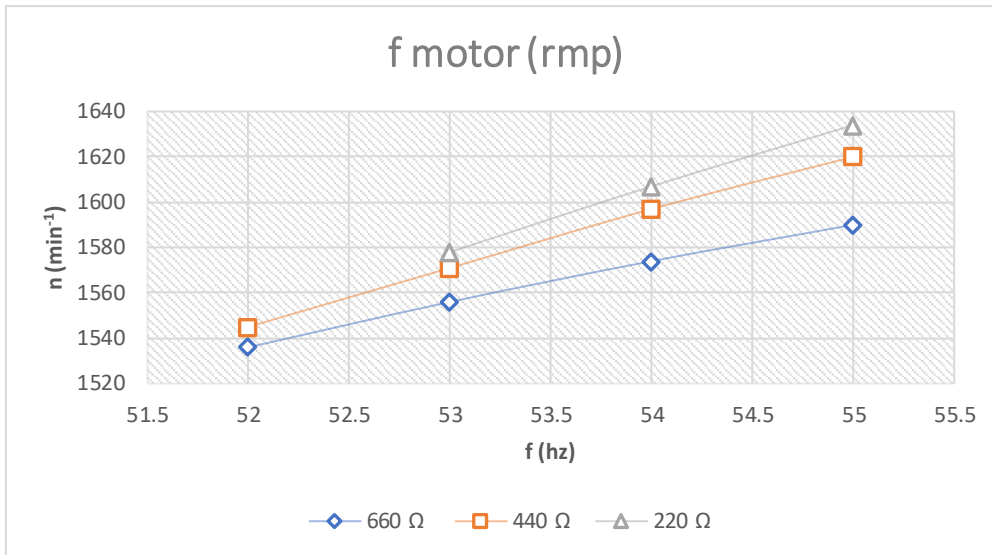


Figura 20 Curva n-f del motor de 0.37 kW, Vc constante.

Esta grafica representa la variación de la velocidad del rotor en función de la frecuencia aplicada al motor motriz. Se observa que para cargas resistivas más pequeñas se alcanzan velocidades de rotación más altas, debido a que el torque necesario es menor y el punto de equilibrio es para un deslizamiento más pequeño.

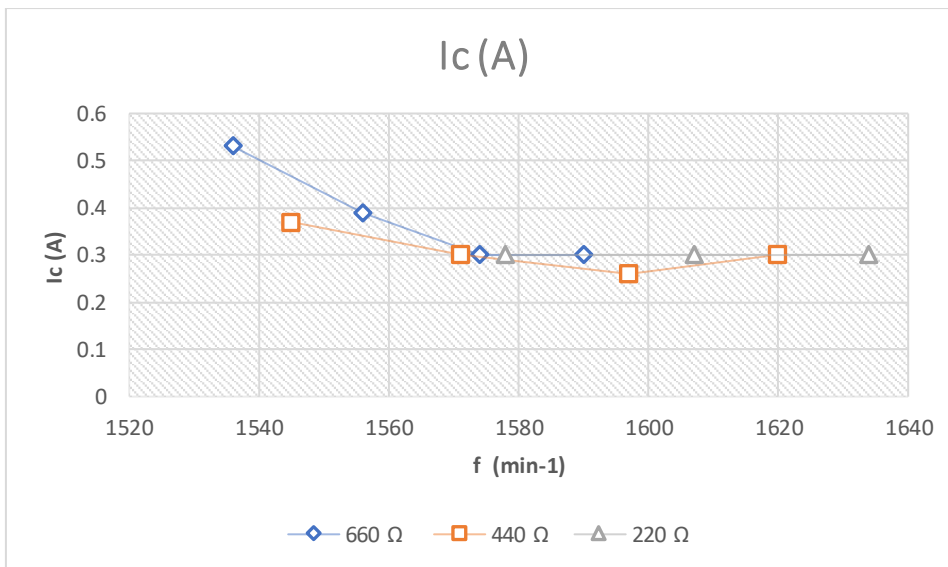


Figura 21 Curva Ic-f del motor de 0.37 kW, Vc constante.

Observamos que al aumentar las revoluciones disminuye la intensidad de excitación, esto es debido a que la potencia aportada por la fuente de control es inferior gracias al aumento de la potencia producida por el generador.

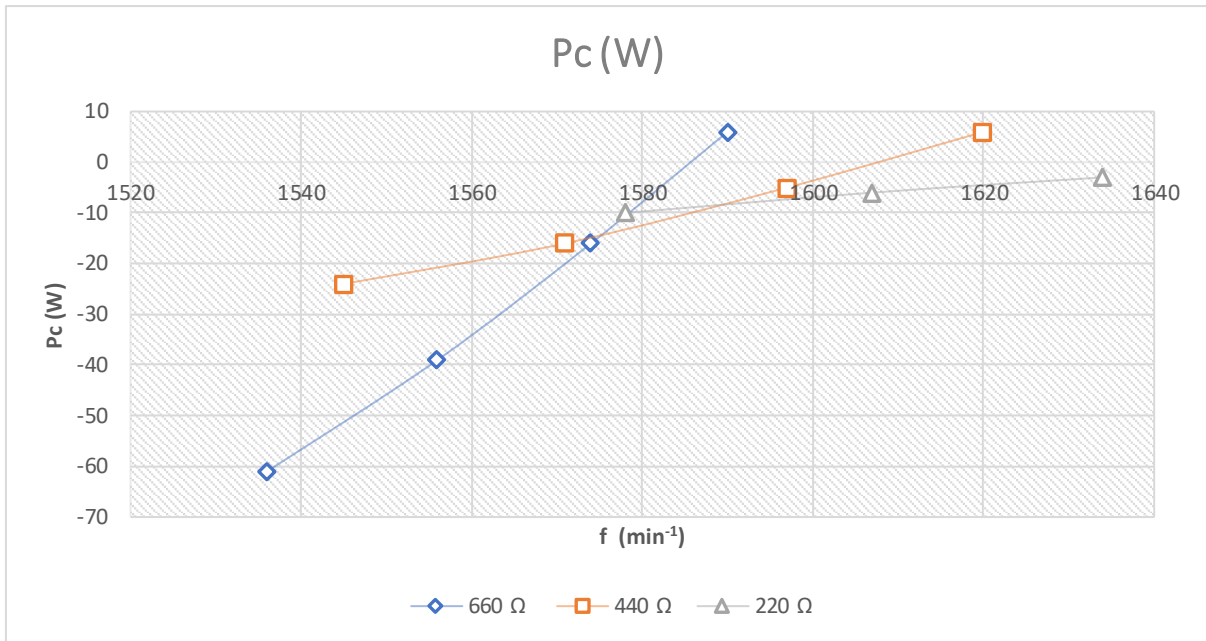


Figura 22 Curva  $P_c$ - $f$  del motor de 0.37 kW,  $V_c$  constante.

Esta grafica es sobre la potencia absorbida por la fuente de excitación. Como se observa al aumentar las revoluciones disminuye la potencia otorgada y empieza a absorber, la pendiente es proporcional a la carga resistiva y la velocidad del rotor de equilibrio (potencia absorbida nula) es inversamente proporcional a la carga resistiva.

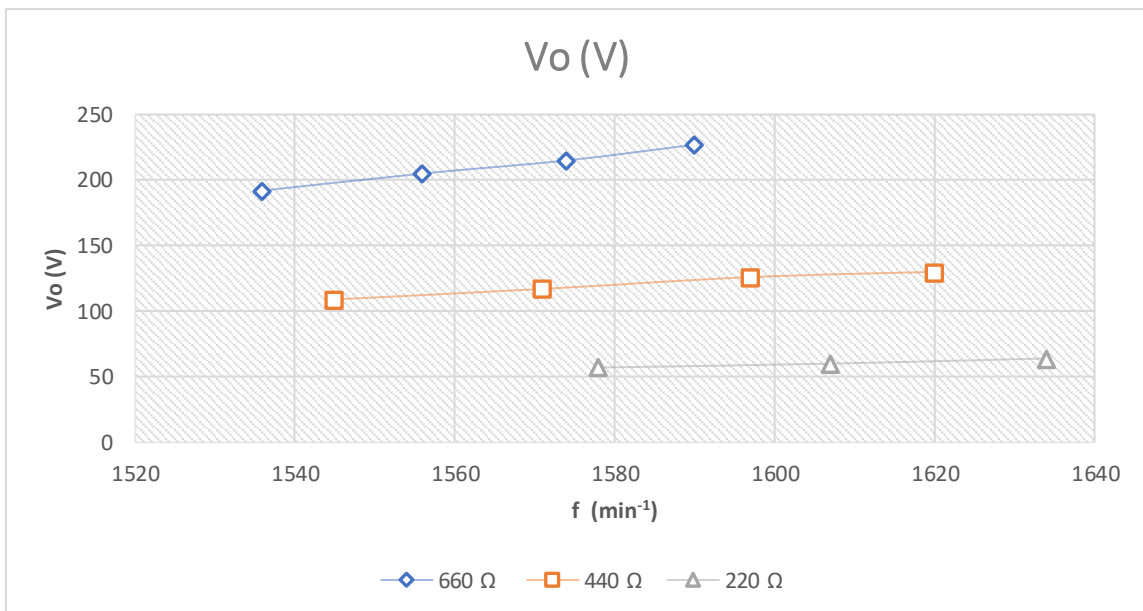


Figura 23 Curva  $V_o$ - $f$  del motor de 0.37 kW,  $V_c$  constante.

La tensión en la carga parece aumentar linealmente para el rango de valores utilizados, además la pendiente es mayor para las cargas resistivas más grandes.

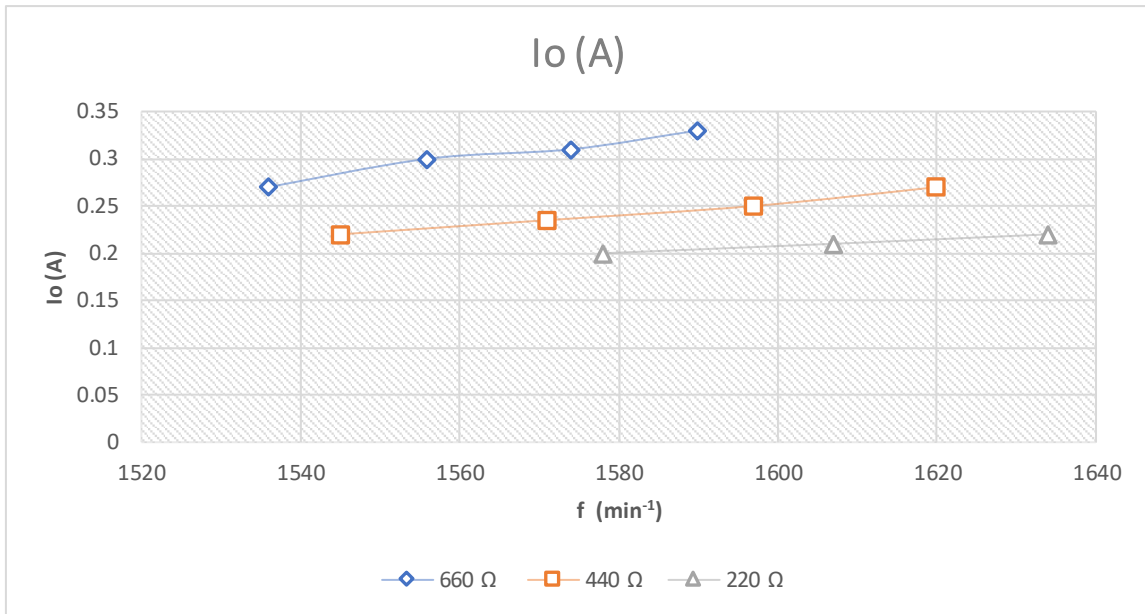


Figura 24 Curva  $I_o$ - $f$  del motor de 0.37 kW,  $V_c$  constante

Las intensidades aumentan linealmente para el rango de valores utilizados y como era esperable al igual que la tensión la pendiente es superior para las resistencias más grandes.

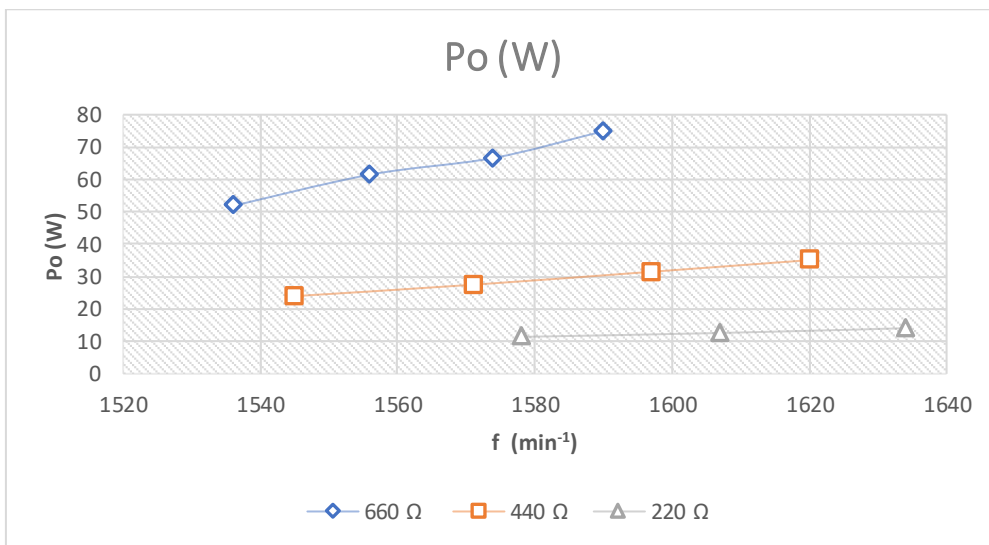


Figura 25 Curva  $P_o$ - $f$  del motor de 0.37 kW,  $V_c$  constante.

La potencia consumida por la carga aumenta linealmente para el rango de valores utilizados, como la tensión de la carga aumenta linealmente la potencia de la carga y su intensidad también.

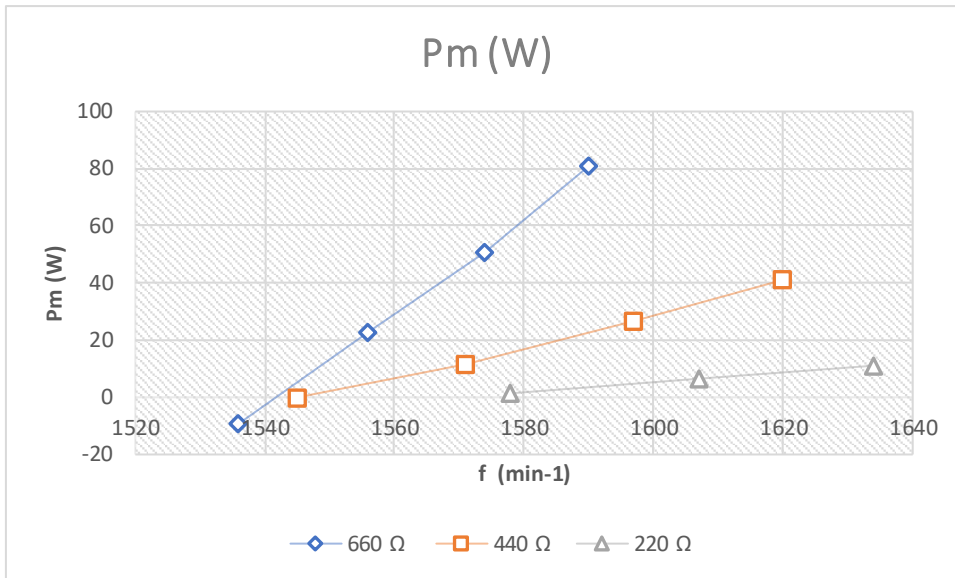


Figura 26 Curva  $P_m$ - $f$  del motor de 0.37 kW,  $V_c$  constante.

En esta grafica se observa que la potencia del motor aumenta en función de la velocidad del rotor y la pendiente es mayor para las cargas resistivas más grandes.

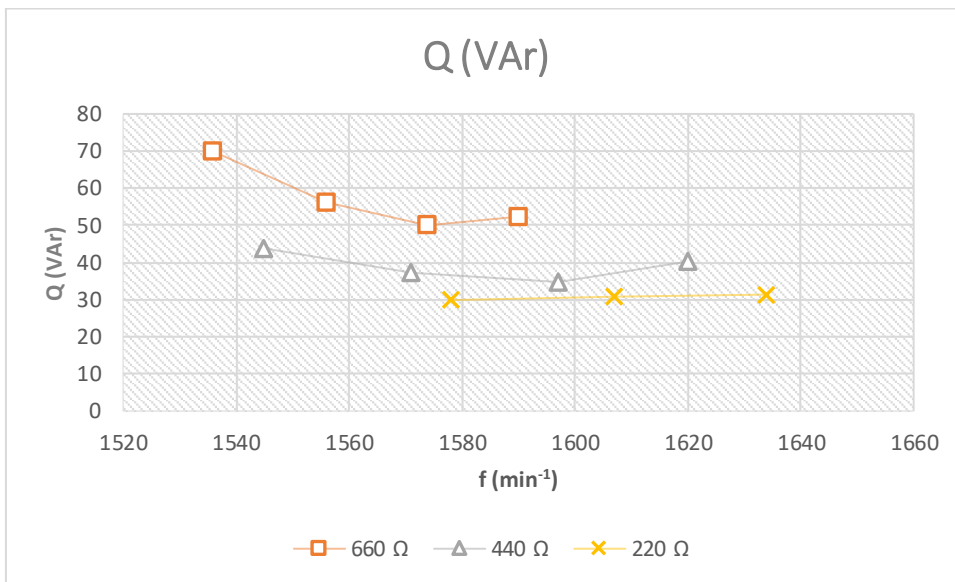


Figura 27 Curva  $Q$ - $f$  del motor de 0.37 kW,  $V_c$  constante.

En esta gráfica se comparan las potencias reactivas para las cargas resistivas de 660 Ω, 440 Ω y 220 Ω en función de la velocidad de giro del rotor.

La primera observación es que la potencia reactiva es proporcional a la carga resistiva, también se aprecia que hay un punto de mínima potencia reactiva en función de la velocidad del rotor y este aumenta al disminuir la carga resistiva, y por último la pendiente del aumento de potencia reactiva es mayor para las cargas más grandes, en el caso de 220 Ω la pendiente es muy pequeña.

## 7. Simulación

Una vez obtenido los parámetros del motor y su comportamiento ante la configuración TSCAOI, sería preferible repetir las mediciones experimentalmente con un motor de gran potencia y mayor eficiencia, pero al no poseer los recursos necesarios para este propósito se ha optado por simular un modelo en el PSIM, el cual simule aproximadamente el comportamiento de un generador en configuración TSCAOI, utilizando los parámetros del motor utilizado y los parámetros de un motor asíncrono comercial de gran potencia.

El circuito propuesto es el siguiente y se ha simulado en PSIM:

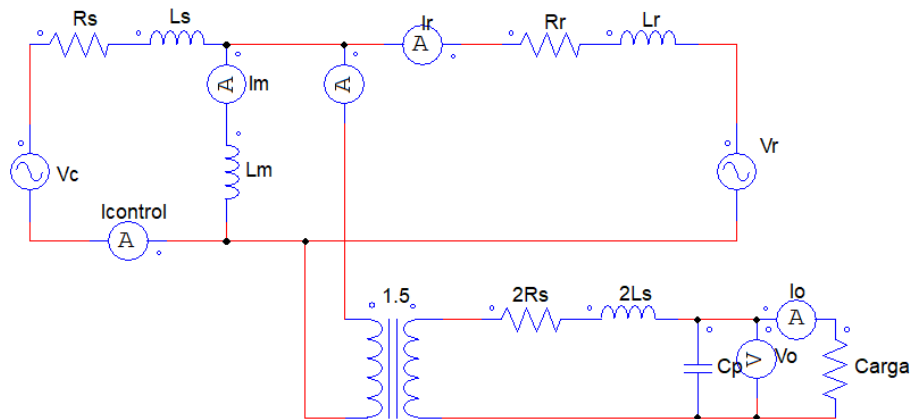


Figura 28 Circuito que simula el comportamiento del motor en configuración TSCAOI en el programa PSIM.

En la rama superior se representa la fase utilizada como control, compuesta por la fuente de tensión controlada  $V_c$  y las impedancias de una fase  $R_s$  y  $L_s$ , también se representa la potencia aportada por el generador a través de la fuente de tensión  $V_r$ , cuyo valor es directamente proporcional a la tensión de control y el deslizamiento ( $V_r = V_c * (1 - s)$ ), Las ramas superior e inferior están conectadas mediante un transformador que representa la interacción entre la fase de control y las dos de la carga. La rama inferior representa las dos fases conectadas en serie, por eso las impedancias son el doble, además se conecta una resistencia representando la carga del consumo y un condensador para compensar la carga inductiva del motor y alcanzar valores de tensión más altos, como se ha hecho en la práctica.

### 7.1. Parámetros del motor de alta potencia

De la misma manera que se obtuvo los parámetros del motor utilizado se obtienen una estimación de los parámetros de un motor comercial:

**380V 1500 RPM**



**IE1**

**MOTOR TRIFÁSICO 15 KW / 20 CV IE1 B3  
PATAS 220/380V O 380/660V 1500 RPM**

Referencia: 816  
Condición: Nuevo

**720,00 €**

Motor eléctrico trifásico 220/380/660V.  
Anclaje mediante patas B3.  
Velocidad de giro: 1500 rpm.  
Número de polos: 4.  
Diámetro del eje: 42 mm.  
Potencia máxima: 15 kw/ 20 cv.  
Amperios de motor 49.7/28.9/16.7 A  
Tamaño de motor 160.  
Calificación energética IE1.

Figura 29 Motor comercial.

# DATOS TECNICOS PARA MOTORES TRIFASICOS IE1

IP55 – Ventilación Exterior IC 411 – Aislamiento clase F - temperatura clase B

IE1

1500 RPM – 4 Polos

Tipo de motor	Potencia nominal		Par nominal	Corriente 400V	Velocidad (a carga nominal)	Eficiencia (rendimiento)			Factor de potencia	Corriente de arranque / Corriente nominal		Par mínimo / Par nominal	Par máximo / Par nominal	Par de arranque / Par nominal	Nivel Sonoro	Peso Neto	
	Pn	Pn				Mn	A	nn		n						cos	Is/In
	Kw	CV	N.m	min-1	100%	75%	50%	Tmax / Tn	Ts / Tn	dB							
AL-56-4A	0,06	0,08	0,43	0,34	1330	46	46	40	0,55	4,4	2	2,2	2,1	48	3,2		
AL-56-4B	0,09	0,12	0,65	0,41	1330	50	50	49	0,63	4,4	2	2,2	2,1	48	3,4		
AL-63-4A	0,12	0,17	0,86	0,42	1340	57	57,1	52,6	0,72	4,4	2	2,2	2,1	52	4		
AL-63-4B	0,18	0,25	1,28	0,61	1340	58	58,5	56,5	0,73	4,4	2	2,2	2,1	52	4		
<b>*AL-633-4</b>	<b>0,25</b>	<b>0,33</b>		<b>0,91</b>	<b>1350</b>	<b>60</b>	<b>60,5</b>	<b>58</b>	<b>0,66</b>	<b>6</b>	<b>1,7</b>	<b>2,4</b>	<b>2,2</b>	<b>54</b>	<b>4,8</b>		
AL-71-4A	0,25	0,33	1,78	0,75	1345	65	65,1	63,1	0,74	5,2	2,2	2,2	2,1	55	6,1		
AL-71-4B	0,37	0,5	2,64	1,06	1340	67	67,2	65,7	0,75	5,2	2,2	2,2	2,1	55	6,7		
<b>*AL-713-4</b>	<b>0,55</b>	<b>0,75</b>		<b>1,6</b>	<b>1380</b>	<b>66</b>	<b>66,4</b>	<b>65,8</b>	<b>0,75</b>	<b>6</b>	<b>1,7</b>	<b>2,4</b>	<b>2,2</b>	<b>57</b>	<b>7,3</b>		
AL-80-4A	0,55	0,75	3,81	1,49	1380	71	71,4	70,6	0,75	5,2	2,4	2,3	2,4	58	8,8	15	
AL-80-4B	0,75	1	5,19	1,96	1380	72,6	73	71,2	0,76	6	2,3	2,3	2,3	58	9,6	16	
<b>*AL-803-4</b>	<b>1,1</b>	<b>1,5</b>		<b>2,71</b>	<b>1390</b>	<b>75</b>	<b>75</b>	<b>74</b>	<b>0,78</b>	<b>6</b>	<b>1,6</b>	<b>2,4</b>	<b>2,2</b>	<b>60</b>	<b>12,3</b>		
AL-90S-4	1,1	1,5	7,56	2,72	1390	75,7	75,8	75	0,77	6	2,3	2,3	2,3	61	12,5	22	
AL-90L-4	1,5	2	10,31	3,56	1390	78	78,1	76,7	0,78	6	2,3	2,3	2,3	61	15	27	
<b>*AL- 90L2 - 4</b>	<b>2,2</b>	<b>3</b>		<b>4,98</b>	<b>1400</b>	<b>79,7</b>	<b>79,7</b>	<b>79</b>	<b>0,8</b>	<b>7</b>	<b>1,5</b>	<b>2,4</b>	<b>2,2</b>	<b>63</b>	<b>18,3</b>		
AL-100L-4A	2,2	3	14,9	4,9	1410	80	80,2	79,5	0,81	7	2,3	2,3	2,3	64	19,2	34	
AL-100L-4B	3	4	20,32	6,44	1410	82	82,2	81,1	0,82	7	2,3	2,3	2,3	64	23	35	
<b>*AL- 100L3- 4</b>	<b>4</b>	<b>5,5</b>		<b>8,47</b>	<b>1430</b>	<b>83,1</b>	<b>83,1</b>	<b>82</b>	<b>0,82</b>	<b>7</b>	<b>1,5</b>	<b>2,3</b>	<b>2,2</b>	<b>65</b>	<b>29</b>		
AL112M-4	4	5,5	26,53	8,29	1440	83,9	84	83	0,83	7	2,3	2,3	2,3	65	29	44	
<b>*AL- 112L- 4</b>	<b>5,5</b>	<b>7,5</b>		<b>11,29</b>	<b>1440</b>	<b>84,7</b>	<b>84,7</b>	<b>83,5</b>	<b>0,83</b>	<b>7</b>	<b>1,4</b>	<b>2,2</b>	<b>2,2</b>	<b>68</b>	<b>34,8</b>		
AL-132S-4	5,5	7,5	36,35	11,3	1445	85	85,2	84	0,82	7	2,3	2,3	2,3	71	43	61	
AL-132M-4	7,5	10	49,57	14,9	1445	86,4	87	86,3	0,84	7	2,3	2,3	2,3	71	53,5	73	
<b>*AL-132M2-4</b>	<b>9,2</b>	<b>12,5</b>		<b>18,21</b>	<b>1460</b>	<b>86,8</b>	<b>86,8</b>	<b>86,4</b>	<b>0,84</b>	<b>7,5</b>	<b>1,4</b>	<b>2,3</b>	<b>2,3</b>	<b>74</b>		<b>56,5</b>	
<b>*AL-132M3-4</b>	<b>11</b>	<b>15</b>		<b>21,58</b>	<b>1460</b>	<b>87,6</b>	<b>87,6</b>	<b>86,5</b>	<b>0,84</b>	<b>7,5</b>	<b>1,4</b>	<b>2,3</b>	<b>2,3</b>	<b>74</b>		<b>64</b>	
AL-160M-4	11	15	71,95	21,5	1460	88	88	86,7	0,84	7	2,2	2,3	2,2	75	113	113	
<b>AL-160L-4</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>98,12</b>	<b>29</b>	<b>1460</b>	<b>89</b>	<b>89,2</b>	<b>88,2</b>	<b>0,84</b>	<b>7,5</b>	<b>2,2</b>	<b>2,3</b>	<b>2,2</b>	<b>75</b>	<b>133</b>	<b>133</b>	
<b>*AL-160L2-4</b>	<b>18,5</b>	<b>25</b>		<b>35,2</b>	<b>1465</b>	<b>89,3</b>	<b>89,3</b>	<b>88,8</b>	<b>0,85</b>	<b>7,5</b>	<b>1,2</b>	<b>2,3</b>	<b>2,2</b>	<b>78</b>		<b>140</b>	
AL-180M-4	18,5	25	120,19	34,5	1470	90	90,1	89,2	0,86	7,5	2,2	2,3	2,2	76		170	
AL-180L-4	22	30	142,93	40,9	1470	90,3	90,6	89,7	0,86	7,5	2,2	2,3	2,2	76		181	
<b>*AL-180L2-4</b>	<b>30</b>	<b>40</b>		<b>55,5</b>	<b>1470</b>	<b>90,7</b>	<b>90,7</b>	<b>90</b>	<b>0,86</b>	<b>7,2</b>	<b>1,2</b>	<b>2,3</b>	<b>2,2</b>	<b>79</b>		<b>190</b>	
AL-200L4	30	40	194,9	55,1	1470	91,3	91,4	90,3	0,86	7,2	2,2	2,3	2,2	79		232	
<b>*AL-200L2-4</b>	<b>37</b>	<b>50</b>		<b>68,1</b>	<b>1470</b>	<b>91,2</b>	<b>91,2</b>	<b>90,9</b>	<b>0,86</b>	<b>7,2</b>	<b>1,2</b>	<b>2,3</b>	<b>2,2</b>	<b>81</b>		<b>243</b>	
AL-225S4	37	50	239,56	66,7	1475	92	92,1	91,1	0,87	7,2	2,2	2,3	2,2	81		287	
AL-225M4	45	60	291,36	80,9	1475	92,3	92,4	91,6	0,87	7,2	2,2	2,3	2,2	81		322	
<b>*AL-225M2-4</b>	<b>55</b>	<b>75</b>		<b>99,1</b>	<b>1475</b>	<b>92,1</b>	<b>92,1</b>	<b>91,6</b>	<b>0,87</b>	<b>7,2</b>	<b>1,1</b>	<b>2,3</b>	<b>2,2</b>	<b>83</b>		<b>338</b>	
AL-250M4	55	75	354,9	98,6	1480	92,5	92,5	91,6	0,87	7,2	2,2	2,3	2,2	83		385	
<b>*AL-250M2-4</b>	<b>75</b>	<b>100</b>		<b>134,2</b>	<b>1480</b>	<b>92,7</b>	<b>92,7</b>	<b>91,9</b>	<b>0,87</b>	<b>7,2</b>	<b>1</b>	<b>2,3</b>	<b>2,2</b>	<b>86</b>		<b>404</b>	
AL-280S4	75	100	483,95	133,1	1480	93,5	93,5	92,2	0,87	7,2	2,2	2,3	2,2	86		510	
AL-280M4	90	125	580,74	159,5	1480	93,6	93,6	92,5	0,87	7,2	2,2	2,3	2,2	86		540	
AL-315S4	110	150	709,8	192,6	1480	93,7	93,7	92,7	0,88	6,9	2,1	2,2	2,1	93		930	
AL-315M4A	132	180	851,76	230,8	1480	93,8	93,9	92,9	0,88	6,9	2,1	2,2	2,1	93		1010	
AL-315L14	160	220	1032,43	276,1	1480	94	94	93	0,89	6,9	2,1	2,2	2,1	97		1070	
AL-315L24	200	270	1290,54	344,3	1480	94,2	94,2	93,4	0,89	6,9	2,1	2,2	2,1	97		1170	
AL-355M4	250	340	1602,35	424,7	1490	94,4	94,5	93,4	0,9	6,9	2,1	2,2	2,1	101		1720	
AL-355L4	315	430	2018,96	534	1490	94,6	94,7	93,9	0,9	6,9	2,1	2,2	2,1	101		1950	

Figura 30 Tabla de características de diferentes motores asincronos de jaula comerciales.

$$s_N = \frac{1500-1460}{1500} = 0,026 \quad (10)$$

$$R_S = 1,5 * R_r = 18,66 \Omega \quad (11)$$

$$R_r = \frac{V^2 * s_N}{P_N} = \frac{230^2 * 0,026}{15000} = 91,69 m\Omega \quad (12)$$

$$X_m = \frac{v^2}{P_N * \tan((\cos^{-1}(\cos \varphi)))} = \frac{230^2}{15000 * \tan((\cos^{-1}(0,84))} = 5,46 \quad (13)$$

$$X_s = 0,05 * X_m = 0,273 \quad (14)$$

$$X_d = 0,05 * X_m = 0,273 \quad (15)$$

$$L_m = \frac{X}{2 * \pi * f} = \frac{5,46}{100\pi} = 17,38 mH \quad (16)$$

$$L = \frac{X}{2 * \pi * f} \quad (17)$$

$$L_s = \frac{X_s}{2 * \pi * f} = \frac{0,273}{100\pi} = 0,869 mH \quad (18)$$

$$L_r = \frac{X_d}{2 * \pi * f} = \frac{0,273}{100\pi} = 0,869 mH \quad (19)$$

Eficiencia al máximo 89 %

A continuación, se muestran las características de los dos motores:

	Motor utilizado	Motor comercial
P	0.35 kW	15 kW
cos φ	0.78	0.84
Eficiencia al máximo rendimiento	65.8%	89 %
n <sub>s</sub>	1500 min <sup>-1</sup>	1500 min <sup>-1</sup>
R <sub>r</sub>	12,44 Ω	91,69 mΩ
R <sub>s</sub>	18,66 Ω	137,53 mΩ
L <sub>s</sub>	28,36 mH	0,869 mH
L <sub>r</sub>	28,36 mH	0,869 mH
L <sub>m</sub>	576 mH	17,38 mH

## 7.2. Resultados simulación

El procedimiento seguido ha sido:

- Asignar los valores del motor a simular y en vacío encontrar cual es el valor del condensador adecuado para la máxima tensión en la carga.
- Observar el comportamiento de la tensión en las bobinas de potencia a la variación de la velocidad de rotación del rotor y tensión de control constante. Simular en vacío y con las cargas resistivas de  $660\ \Omega$ ,  $440\ \Omega$  y  $220\ \Omega$ .
- Observar el comportamiento de la tensión en las bobinas de potencia a la variación de la tensión de control y velocidad de rotación del rotor constante. Simular en vacío y con las cargas resistivas de  $660\ \Omega$ ,  $440\ \Omega$  y  $220\ \Omega$ .
- Repetir los puntos anteriores con los parámetros del motor comercial.

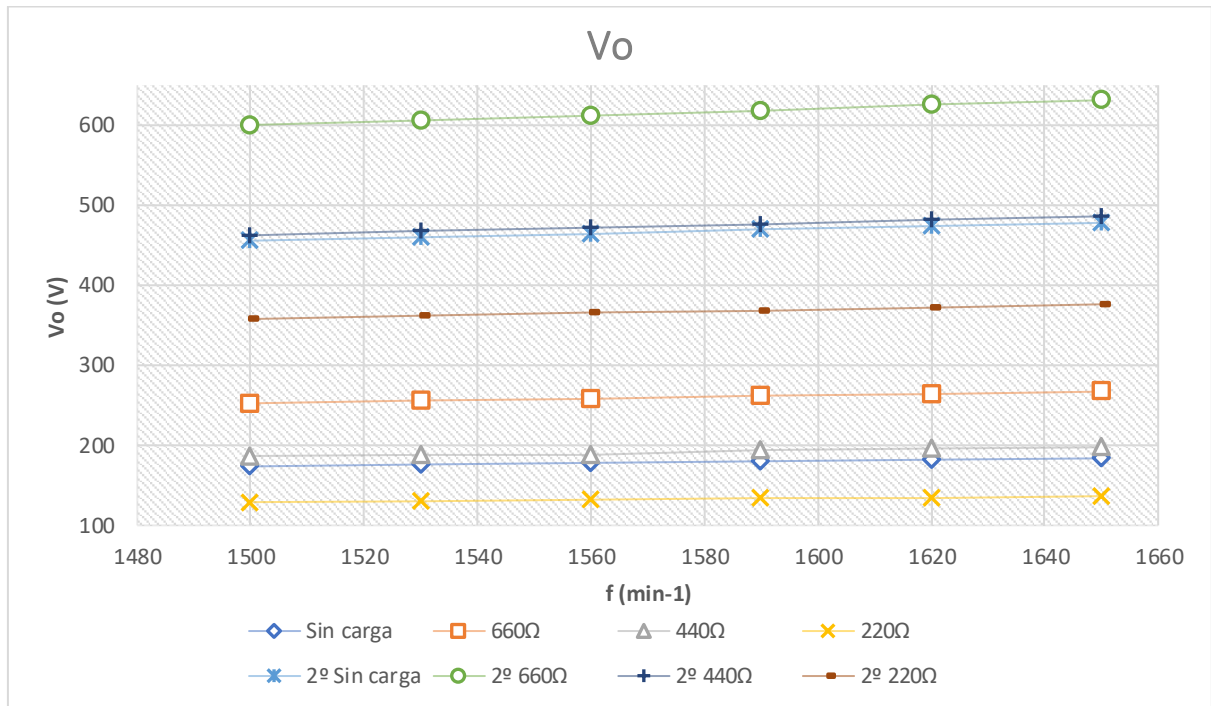


Figura Curvas  $V_o$ - $f$  simuladas de los motores de  $0.37\ kW$  i  $15\ kW$ ,  $f_c$  constante.

En esta grafica se ha utilizado los valores de la tensión de control usados en las mediciones experimentales, después se ha repetido cambiando los parámetros por los del segundo generador. Se observa claramente que el generador de  $15\ kW$  con la misma alimentación produce más tensión, y tiene una pendiente superior al motor de  $0.37\ kW$ .

A partir de esta grafica se espera que al usarse el motor de  $15\ kW$  Sea más eficiente, al tener una mayor pendiente de tensión/deslizamiento permite trabajar con velocidades cercanas a la de sincronismo.

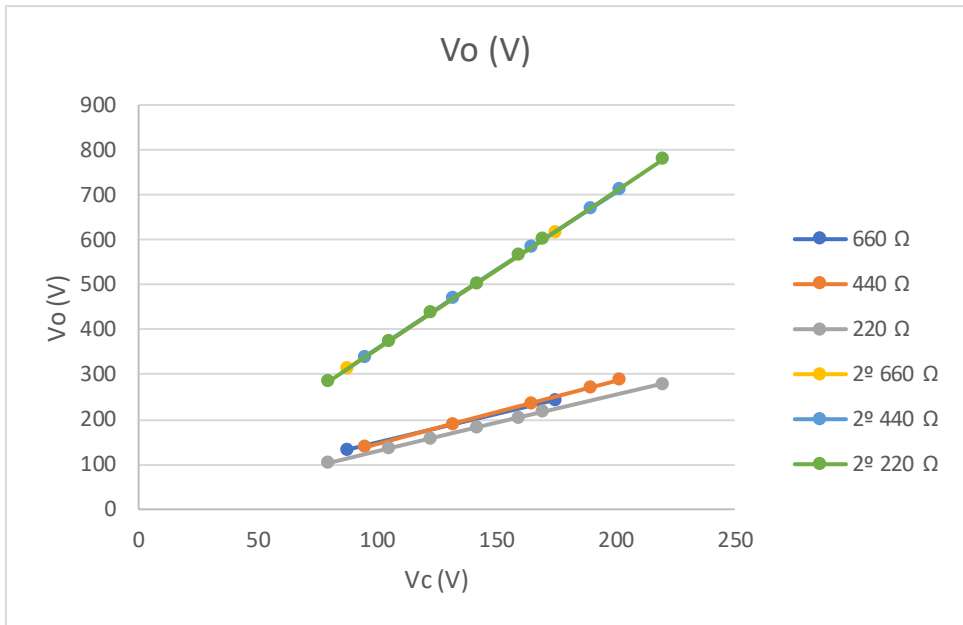


Figura 31 Curvas Vo-Vc simuladas de los motores de 0.37 kW i 15kW, fc constante.

Podemos comparar los resultados entre los dos motores, se aprecia que el control de la tensión en la carga mediante la tensión de control es más eficaz en el motor de 15 kW que en el de 0.37 kW, además tiene el mismo efecto independientemente de la carga en el generador de 15 kW y mayor repercusión que el generador de 0.37 kW.

Como observamos en la simulación podemos variar cientos de voltios la salida, y comparando con la figura 31 en función de la frecuencia, plantea la posibilidad de modificar la tensión de la carga independientemente de la velocidad de rotación del rotor.

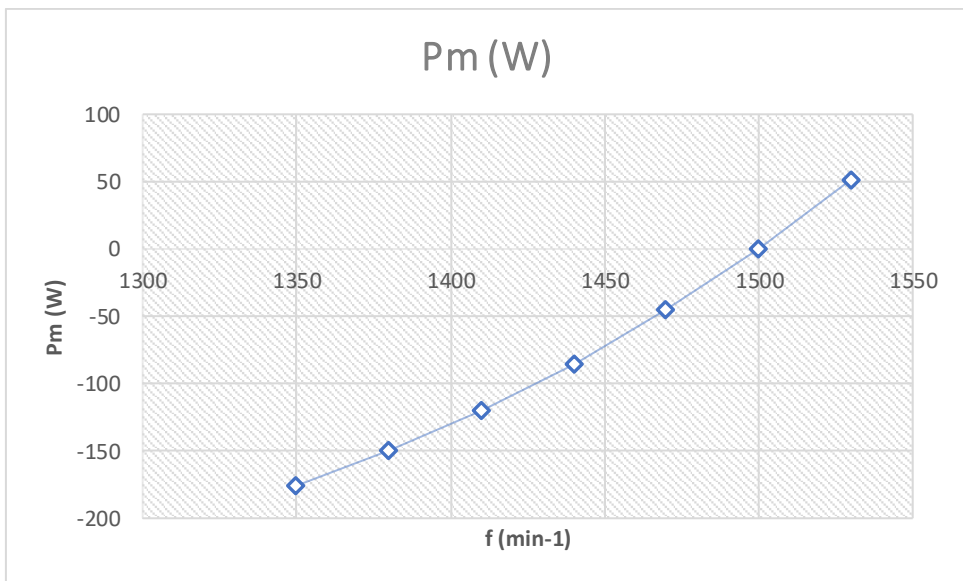


Figura 32 Curva Pm-f del motor de 0.37 kW i 15kW, fc constante.

En esta grafica se observa que según la simulación al trabajar a velocidades por debajo del sincronismo el motor se comporta como un motor y consume potencia, en la velocidad de sincronismo no produce potencia activa y a velocidades superiores al sincronismo genera potencia.

## 8. Sistema de control

Según los experimentos realizados concluyo que es posible utilizar un motor asíncrono en configuración TSCAOI para generar electricidad, pero para mantener una tensión estable de 230 Vrms por ejemplo, sin utilizar convertidores AC-DC DC-AD, es necesario dos lazos de control, uno que modifique la tensión de control para obtener la tensión deseada y el otro lazo que modifique la velocidad de giro del rotor para producir en la frecuencia eléctrica deseada.

Para el lazo de control de tensión, se medirá la tensión eficaz en las fases de potencia, se comparará con el valor eficaz deseado, esta diferencia se transformará en el valor de variación de tensión de la fuente de control, hay que tener en cuenta que la influencia de la tensión de control sobre la tensión en la carga no es de 1, y el valor de la tensión de control se modifica por valor pico.

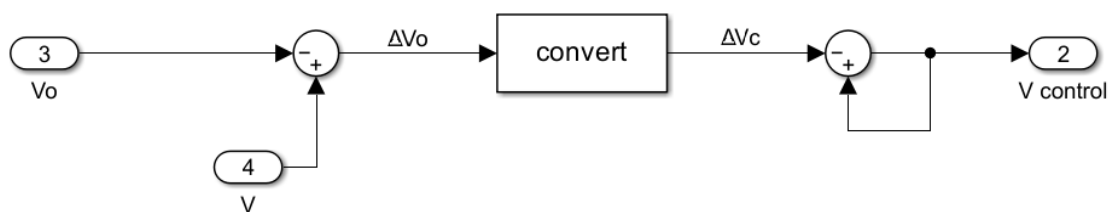


Figura 33 Esquema lazo de control de tensión, tensión de entrada rms.

Configuración en el caso de medir la tensión eficaz, se compara con el valor eficaz deseado obteniendo una diferencia de tensión que se modifica y se aplica a la fuente de control.

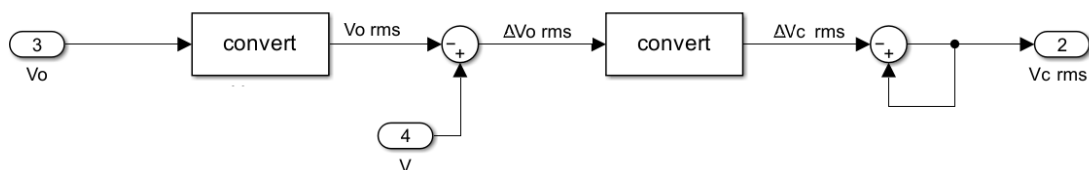


Figura 34 Esquema lazo de control de tensión, tensión de entrada sinusoidal.

Configuración en el caso de medir el valor pico, se añade el paso de transformar el valor pico a valor eficaz y se repiten los pasos del caso anterior.

En el caso de poder controlar la velocidad de rotación del rotor, por ejemplo, una central hidráulica. Se utilizaría el lazo de control de la frecuencia que modificaría el flujo de agua, el ángulo de las hélices, etc.

La frecuencia de la electricidad generada será proporcional a la velocidad del rotor, por lo que se medirá la frecuencia de la tensión en la carga, conociendo las características del motor utilizado se obtiene la velocidad actual de sincronismo, se compara con el valor deseado (ligeramente superior a las 50 Hz para trabajar en velocidades superiores al sincronismo) y la variación se convierte en el aumento de torque para la máquina motriz, esta variable se adaptará a los valores que utilice el control de cada máquina motriz.

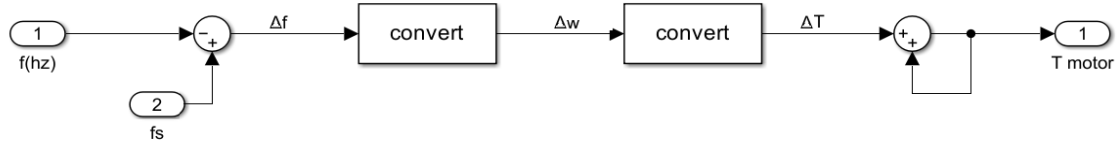


Figura 35 Esquema lazo de control de frecuencia, valor de referencia en Hz.

Configuración del lazo de control de la frecuencia que utiliza como referencia una frecuencia en Hz, se compara la frecuencia de la red con la frecuencia deseada y se transforma hasta una variable en este caso par.

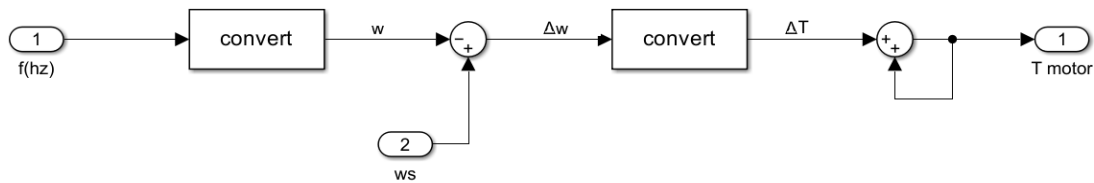


Figura 36 Esquema lazo de control de frecuencia, valor de referencia en  $min^{-1}$ .

Configuración del lazo de control de la frecuencia que utiliza como referencia la velocidad del rotor deseada en rad/s, que se puede modificar a  $min^{-1}$ , esta diferencia se convertirá en la variable deseada, en este caso variación de par.

Para comprobar que funcione la propuesta de lazos de control se ha implementado sobre el mismo modelo utilizado anteriormente con los componentes del motor comercial de 15 kW.

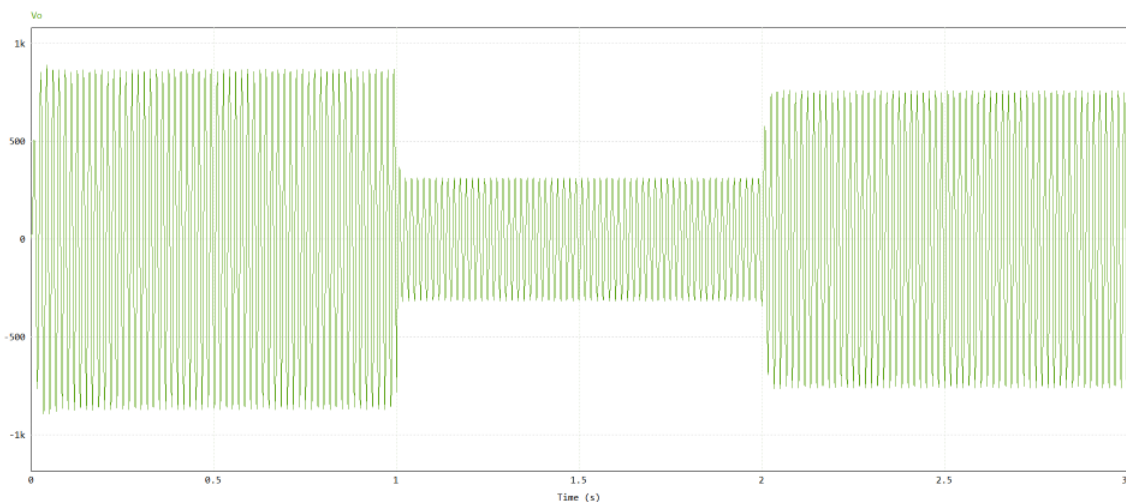


Figura 37 Reacción de la tensión de la carga a la variación de esta sin lazo de control de tensión.

Podemos observar la respuesta del modelo simulado sin lazo de control a la variación de la carga.

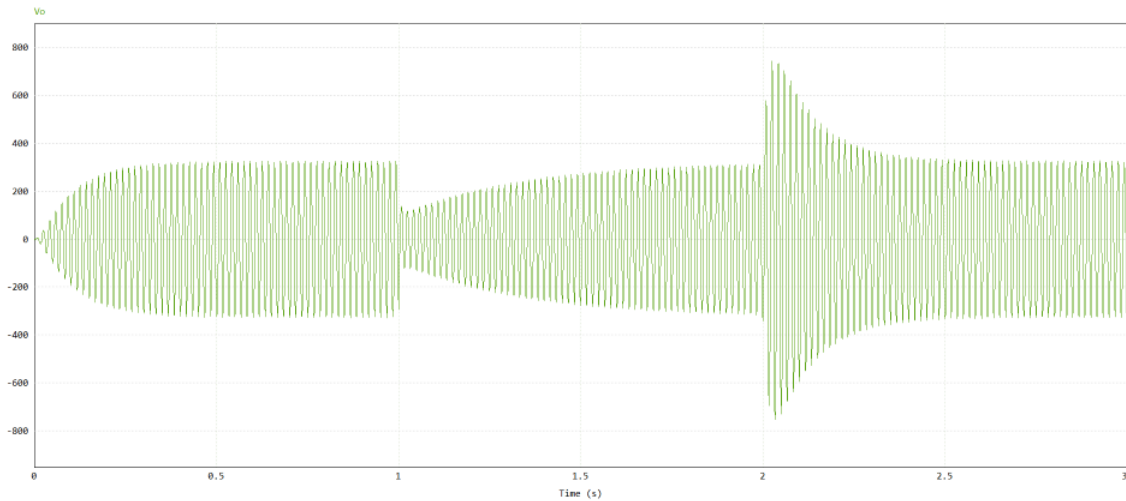


Figura 38 Reacción de la tensión de la carga a la variación de esta con lazo de control de tensión.

Observamos como afecta el lazo de control de la tensión de control, al cambiar las cargas bruscamente cambia la tensión en la carga, el lazo de control modifica la tensión de control hasta obtener los 230 Vrms.

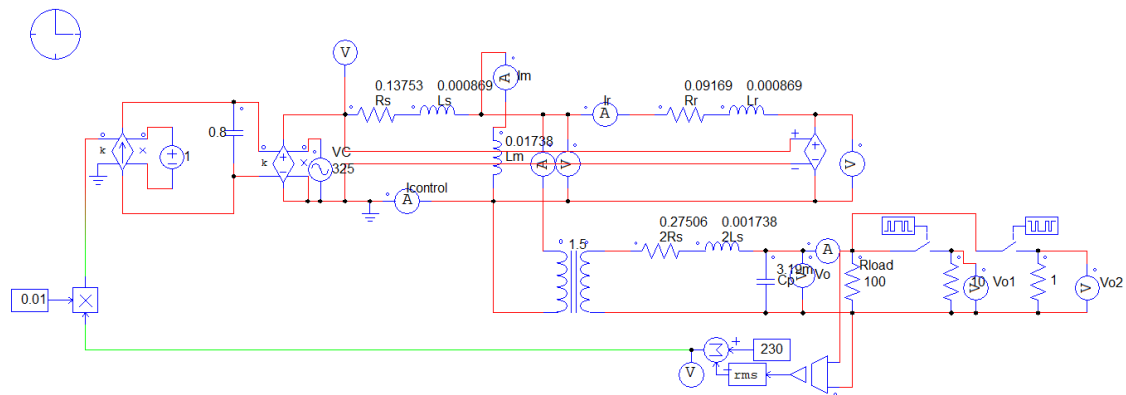


Figura 39 Circuito de simulación del comportamiento de un generador en configuración TSCAOI, con un lazo de control de tensión. Tensión de control mediante fuente de tensión controlada.

Este es el circuito con el lazo de control. Se mide la tensión en la carga se calcula el valor eficaz para una frecuencia de 50 Hz y se resta este valor al valor deseado obteniendo la diferencia de tensión, este valor se reduce y se utiliza como el valor de la ganancia de la fuente de intensidad controlada por tensión con ganancia variable, mientras haya una diferencia de tensión eficaz habrá intensidad la cual modificará la tensión del condensador, y la tensión del condensador actúa como la ganancia de la fuente de tensión controlada de ganancia variable que sustituye la fuente de control utilizada anteriormente.

Para realizar el lazo de control de la frecuencia del sistema no dispongo de las herramientas en el PSIM para realizarlo.

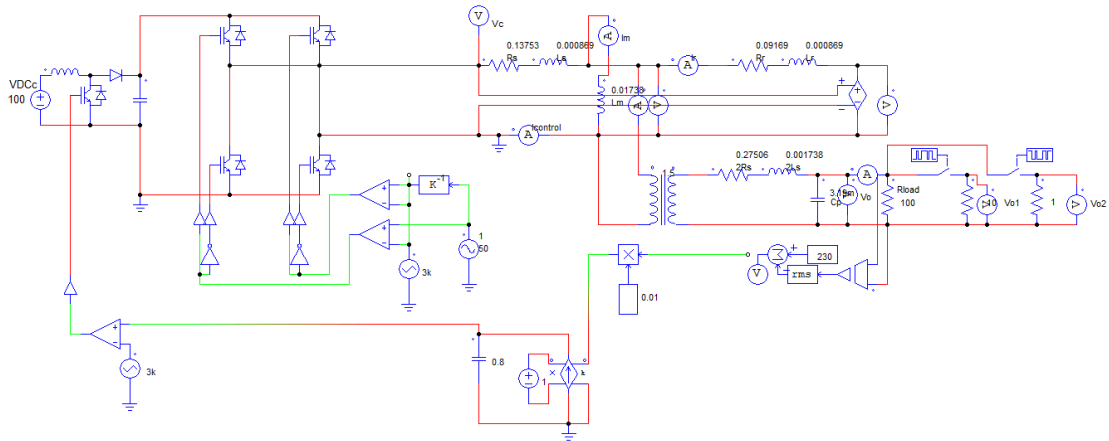


Figura 40 Circuito de simulación del comportamiento de un generador en configuración TSCAOI, con un lazo de control de tensión. Tensión de control mediante inversor pwm.

Quería hacer la simulación con un puente de diodos y un sistema PWM pero al utilizar PSIM demo este sistema supera el límite de elementos de esta versión, obligándome a usar el sistema con menos elementos de la Figura 37.

El funcionamiento sería el mismo, medir el valor rms de las cargas, compararlo con la tensión de control, este valor de tensión aumenta la tensión del condensador que modifica el ciclo del Boost, este aumenta la tensión de la batería, después el inversor la convierte en alterna y alimenta la fase de excitación.

## 9. Conclusiones

Después de haber realizado las mediciones experimentalmente, y simulado el comportamiento que tendría un motor de más potencia y eficiencia, afirmo que parece viable utilizar un motor asíncrono trifásico para generar electricidad monofásica utilizando la configuración TSCAOI. Además, en el caso que el generador no produzca suficiente potencia la fuente de control proporcionará la restante, y en el caso que pueda producir de más la fuente de tensión la absorberá.

Alimentando una fase con una fuente de tensión controlada de 50 Hz capaz de proporcionar y absorber potencia activa y reactiva, con un sistema de control de tensión se puede mantener una tensión en la carga de 230 V con pequeñas variaciones, y en el caso de tener control sobre la fuente motriz se puede mantener una frecuencia estable algo superior a 50 Hz (estudio realizado para valores normalizados en España).

Este estudio se ha visto limitado a un motor de baja potencia y reducida eficiencia, y una variación de la velocidad de rotación del rotor menor a lo deseada. Por lo tanto, sería interesante realizar un estudio similar con un motor de más potencia y eficiencia, y experimentar con un mayor espectro de velocidades, además de construir y comprobar los sistemas de control planteados en un caso real.

## 10. Referencias

- [1] Udaya K. Madawala, Jonathan B. Bradshaw, Tobias Geyer, D. Mahinda Vilathgamuwa, "Madawala12 SEIG 3ph-1 ph\_TSCAOI", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 59, NO. 2, FEBRUARY 2012
- [2] Zhijia Wang<sup>1</sup>, Udaya K. Madawala<sup>1</sup>, Tian-Hua Liu<sup>2</sup> and Duleepa J. Thrimawithana<sup>1</sup>, "Steady-state characteristics of 3-phase cage induction generators in TSCAOI configuration" Department of Electrical and Computer Engineering, The University of Auckland, Auckland, New Zealand
- [3] U. K. Madawala, "An electrical generator," New Zealand Patent 563196, Jan. 29, 2009.
- [4] Chan, T. F. "Performance analysis of a three-phase induction generator connected to a single-phase power system." Energy Conversion, IEEE Transactions on 13.3 (1998): 205-213.
- [5] Durham, Marcus O., and R. Ramakumar. "Power system balancers for an induction generator." IEEE transactions on industry applications 6.IA-23 (1987): 1067-1072. I. S. Jacobs and C. P. Bean, "Fine particles, thin films and exchange anisotropy," in Magnetism, vol. III, G. T. Rado and H. Suhl, Eds. New York: Academic, 1963, pp. 271–350.
- [6] Smith, Otto JM. "Three-phase induction generator for single-phase line." IEEE transactions on energy conversion 3.EC-2 (1987): 382-387.
- [7] Chan, T. F., and L. L. Lai. "Phase balancing for an induction generator operating on a single-phase power system." Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE. Vol. 1. IEEE, 2000.
- [8] Chan, T. F., and Loi Lei Lai. "A novel excitation scheme for a standalone three-phase induction generator supplying single-phase loads." Energy Conversion, IEEE Transactions on 19.1 (2004): 136-143.
- [9] Fukami, Tadashi, Yuichi Kaburaki, Satoru Kawahara, and Toshio Miyamoto. "Performance analysis of self-regulated and self-excited single-phase induction machine using a three-phase machine." IEEE Trans (1999): 622-627.
- [10] Soltani, J., and N. R. Abjadi. "A Novel Stand-Alone Single-Phase Induction Generator Using a Three-Phase Machine and a Single-Phase PWM Inverter." International Journal of Engineering Transactions 16 (2003): 259-268.
- [11] Madawala, Udaya K., Tobias Geyer, Jonathan B. Bradshaw, and D. Mahinda Vilathgamuwa. "Modeling and analysis of a novel variable speed cage induction generator." Industrial Electronics, IEEE Transactions on 59, no. 2 (2012): 1020-1028.
- [12] Novotny, D. W., and T. A. Lipo. Vector Control and Dynamics of AC Machines. Oxford university press, (1996): 36-77.
- [13] Fortescue, Charles L. "Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks." American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the 37.2 (1918): 1027-1140.
- [14] Aimad Hannashi Álvarez. "Estimación de parámetros de la máquina de inducción trifásica mediante la generación de un algoritmo", Universitat Rovir i Virgili, Tarragona, (2018), 25-26
- [15] Zhijia Wang, Udaya K. Madawala, Tian-Hua Liu, Duleepa J. Thrimawithana "Steady-State Characteristics of 3-Phase Cage Induction Generators in TSCAOI Configuration" departmento de Electrical and Computer Engineering, The University of Auckland, Auckland, New Zealand