



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



LAB MIDA: LABORATORIO DE MÁQUINAS DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADAS

MEMORIA DE PROYECTO PRESENTADA A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA POR:

Carlos Rossi - Germán Olivet - Renato Haller

EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUERIMIENTOS PARA LA OBLIGACIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRICISTA

TUTORES

MSc. Ing. Pablo Toscano Universidad de la República
Ing. Diego Fernández Universidad de la República
Ing. Mauricio Riera Universidad de la República

TRIBUNAL

MSc. Ing. Pablo Toscano Universidad de la República
Ing. Diego Fernández Universidad de la República
Ing. Mauricio Riera Universidad de la República
MSc. Ing. Andrés Cardozo Universidad de la República
Ing. Matías Sellanes Universidad de la República

27 de noviembre de 2019

Agradecimientos

Primero que nada, deseamos agradecer a nuestros tutores que nos acompañaron en este proceso de trabajo y aprendizaje, en especial a Pablo Toscano por su tiempo y dedicación.

Agradecer a Diego Beltramini por prestarnos el variador de frecuencia que se utilizó hasta culminar el Proyecto de forma inmediata, sin el cual se hubiera dificultado culminar el Proyecto en el tiempo estimado.

Además, realizar una mención especial para el personal del Taller de Máquinas, que nos brindaron todos los equipos, materiales y herramientas que nos permitieron llevar a cabo nuestro Proyecto de Fin de Carrera. También para Andrés Cardozo por el estudio de armónicos realizado al transformador que se encuentra en el Taller de Máquinas Eléctricas.

Por último y no menos importante, queremos agradecer a nuestras familias, amigos, amigas, y novias por el apoyo incondicional en que siempre nos brindaron durante toda la carrera de grado.

Introducción

El Proyecto de Fin de Carrera engloba el desarrollo de una práctica de laboratorio para el curso Taller de Máquinas Eléctricas. La misma está enfocada en Máquinas de Inducción Doblemente Alimentadas (MIDA).

El objetivo general de este Proyecto es desarrollar una práctica de laboratorio que permita mostrar y estudiar las características más notables de funcionamiento de las Máquinas de Inducción Doblemente Alimentadas.

En este trabajo se describen los equipos utilizados, los aspectos teóricos puestos de manifiesto en la práctica y las dificultades de implementación del sistema.

El sistema implementado consiste en un motor de inducción, alimentado por el estator con la red y por el rotor con un variador de frecuencia. Además, se desarrolló una parte documental que comprende instructivos de trabajo de la práctica. Estos tienen en cuenta, tanto los aspectos teóricos que es posible observar, como los tiempos que los alumnos disponen para realizarla.

Índice general

1. Definición del problema y antecedentes	11
2. Máquina de inducción doblemente alimentada	13
2.1. Aplicaciones	13
2.2. Ventajas sobre MI clásica	15
2.2.1. Modelo eléctrico estrella equivalente de la MIDA	16
3. Equipos y conexionado	21
3.1. Diagrama de conexionado	21
3.2. Listado de equipos	23
3.2.1. Máquina de inducción de rotor bobinado	23
3.2.2. Máquina de continua	24
3.2.3. Variadores de frecuencia	24
3.2.4. Regulador de Inducción	24
3.2.5. Instrumentos de medida	25
3.2.6. Panel de potencia y medida AC	25
3.2.7. Banco de resistencias	26
3.2.8. Panel de potencia DC	26
3.2.9. Grupo generador MI-MCC	27
3.3. Análisis del equipamiento del LME	28
3.3.1. Variadores de frecuencia	28
3.3.2. Motor de inducción con rotor bobinado	34
3.3.3. Máquina de corriente continua	38
3.3.4. Instrumentos de medida	39
4. Modelado	43
4.1. Modelo estrella equivalente	43
4.2. Ensayos	43
4.2.1. Resistencia de bobinados	45
4.2.2. Medición impedancias de cortocircuito y de vacío	46
4.3. Modelo	49
5. Armado del sistema	51
5.1. Prueba de la MIDA	51
5.1.1. Primeros acoples	51
5.1.2. Comportamiento oscilatorio	53
5.1.3. Pruebas con carga	54

6. Análisis de los resultados	73
6.1. Comportamiento oscilatorio	73
6.2. Pruebas como motor	77
6.3. Pruebas como generador	79
6.4. Flujo de reactiva	82
7. Diseño de la práctica	87
7.1. Apartado de seguridad	87
7.1.1. Layout sugerido	87
7.1.2. Elementos de protección personal (EPP)	89
7.2. Diagramas de conexiones	90
7.2.1. Bosquejo del sistema	90
7.3. Instrumentos	93
7.4. Procedimientos para el manejo del sistema	93
7.4.1. Acoplamiento	93
7.4.2. Pruebas como motor	98
7.4.3. Pruebas como generador	98
7.4.4. Estudio del comportamiento oscilatorio	99
7.5. Puntos de funcionamiento a analizar en la práctica	100
8. Conclusiones y pendientes	101
8.1. Conclusiones	101
8.2. Pendientes	103
A. Código del programa	109
B. Datos de los componentes del equipo de control	115
Índice de figuras	118

Índice de abreviaciones

- MIDA : Máquina de inducción doblemente alimentada.
- MCC : Máquina de corriente continua.
- MI : Máquina de inducción.
- V_e : Tensión fase-neutro del estator de la MIDA, a nivel de tensión del estator.
- U_e : Tensión fase-fase del estator de la MIDA, a nivel de tensión del estator.
- U_{er} : Tensión fase-fase del estator inducida en el rotor.
- V_r : Tensión fase-neutro del rotor de la MIDA, a nivel de tensión del rotor.
- U_r : Tensión de fase-fase del rotor de la MIDA, a nivel de tensión del rotor.
- I_e : Corriente por una fase del estator de la MIDA, a nivel de tensión del estator.
- I_r : Corriente por una fase del rotor de la MIDA, a nivel de tensión del rotor.
- f_e : Frecuencia de la tensión del estator de la MIDA.
- f_{er} : Frecuencia de la tensión del estator inducida en el rotor.
- f_r : Frecuencia de la tensión del rotor de la MIDA.
- f_n : Frecuencia nominal de una máquina eléctrica.
- ω_e : Velocidad angular del campo magnético del estator, referenciado al estator.
- ω_r : Velocidad angular del campo magnético del rotor, referenciado al rotor.
- Ω : Velocidad angular del eje de la MIDA.
- f_m : Frecuencia de giro del eje de la MIDA.
- P_e : Potencia activa entregada por la fuente que alimenta el estator de la MIDA.
- P_r : Potencia activa entregada por la fuente que alimenta el rotor de la MIDA.
- Q_e : Potencia reactiva entregada por la fuente que alimenta el estator de la MIDA.

- Q_r : Potencia reactiva entregada por la fuente que alimenta el rotor de la MIDA.
- p : Número de pares de polos de la MIDA.
- g : Deslizamiento de una máquina eléctrica.
- n : Relación de transformación de tensiones entre dos bobinados.
- R_e : Resistencia del bobinado del estator de la MIDA, a nivel de tensión del estator.
- R_r : Resistencia del bobinado del rotor de la MIDA a nivel de tensión del rotor.
- R_0 : Resistencia de pérdidas en el núcleo magnético de la MIDA a nivel de tensión del estator, modelo paralelo.
- R_0^S : Resistencia de pérdidas en el núcleo magnético de la MIDA a nivel de tensión del estator, modelo serie.
- R_{0r}^S : Resistencia de pérdidas en el núcleo magnético de la MIDA a nivel de tensión del rotor, modelo serie.
- X_e : Reactancia de fugas de flujo magnético del estator de la MIDA, a nivel de tensión del estator.
- X_r : Reactancia de fugas de flujo magnético del rotor de la MIDA a nivel de tensión del rotor.
- X_{re} : Reactancia de fugas de flujo magnético del rotor de la MIDA a nivel de tensión del estator.
- X_0 : Impedancia de la rama magnetizante de la MIDA a nivel de tensión del estator, modelo paralelo.
- X_0^S : Impedancia de la rama magnetizante de la MIDA a nivel de tensión del estator, modelo serie.
- X_{0r}^S : Impedancia de la rama magnetizante de la MIDA a nivel de tensión del rotor, modelo serie.
- R_a : Resistencia del bobinado de armadura de la MCC.
- R_c : Resistencia de carga.
- i_f : Corriente de campo de la MCC.
- V_a : Voltaje en bornes de la armadura de la MCC.
- I_a : Corriente de armadura de la MCC.

Capítulo 1

Definición del problema y antecedentes

Las Máquinas de Inducción Doblemente Alimentadas permiten ampliar las características de funcionamiento respecto de la MI tradicional (con rotor cortocircuitado y alimentada por el estator). Como característica principal, se destaca la capacidad de operar como generador por debajo de la velocidad de sincronismo (generador sub-sincrónico), y como motor por encima de ella (motor hiper-sincrónico). También es capaz de controlar el intercambio de potencia reactiva con la red en ambos sentidos.

A nivel industrial, estas máquinas se han desarrollado principalmente en el campo de la energía eólica aprovechando las características antes mencionadas. En la actualidad, hay dos grandes tecnologías que predominan en el mercado: los *full converter* y las MIDA. Los generadores eólicos *full converter*, funcionan con un motor sincrónico acoplado eléctricamente a un equipo de electrónica de potencia que lo vincula a la red. La principal desventaja de esta tecnología es que la electrónica de potencia debe ser capaz de soportar toda la potencia del generador, lo cual resulta muy costoso. La MIDA utiliza electrónica de potencia que solo alimenta al rotor, manejando una fracción de la potencia total, lo cual reduce el costo del equipo. Hoy en día, aproximadamente el 70 % de los generadores eólicos están implementados con MIDA¹.

En la carrera de grado en Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, las MIDA se estudian muy superficialmente en el curso de Máquinas Eléctricas y no se cuenta con ninguna instancia práctica. El amplio uso de estos equipos y la falta de un sistema implementado para estudiarlo motivan a la realización de este Proyecto.

Como antecedente directo y similar a esta temática, se destaca el Proyecto de Fin de Carrera “VISLAB” (2014-2015), el cual también consistió en desarrollar equipamiento concreto para el Laboratorio de Maquinas Eléctricas (LME). En ese caso se desarrolló un equipo para adquirir señales AC y DC, y un software para su procesamiento e interacción en el laboratorio.

¹La justificación de que en la MIDA la electrónica de potencia maneja una fracción de la potencia nominal será estudiada más a fondo en el capítulo 2.

Capítulo 2

Máquina de inducción doblemente alimentada

2.1. Aplicaciones

Como lo indica su nombre, una máquina de inducción doblemente alimentada cuenta con dos alimentaciones, una por el estator y otra por el rotor. Al tener una segunda alimentación se puede controlar la tensión, fase y frecuencia de la tensión del rotor. Esto permite operar la máquina como un generador controlando su velocidad y la potencia reactiva intercambiada con la red.

Poder generar energía controlando la velocidad de la máquina es de especial importancia en generadores eólicos, ya que permite una operación más eficiente ante las variaciones de la velocidad del viento. Los generadores eólicos cuentan con convertidores, cuyo control varía la frecuencia del voltaje del rotor de forma que el intervalo de variación de velocidad sea de $\pm 30\%$ la velocidad de sincronismo. Es decir, la frecuencia del rotor varía entre $0,3f_n$ y $-0,3f_n$, siendo f_n la frecuencia nominal de la MIDA. Como se verá más adelante, la potencia absorbida por el rotor es aproximadamente $P_r = P_e \cdot g$, siendo P_e la potencia absorbida por el estator, y g el deslizamiento. De esta ecuación se deduce que la potencia que debe manejar el convertidor es un 30% de la potencia nominal del generador. Manejar menos potencia reduce el costo del equipo y hace de la MIDA una de las mejores opciones para los generadores eólicos.

Como fue mencionado, en la generación eólica es crucial poder controlar la velocidad del equipo para maximizar la potencia generada. Esto se puede explicar a partir de una aproximación de la ecuación de potencia mecánica extraída del viento:

$$P_{mecánica} \simeq \frac{\pi \cdot \rho \cdot D^2 \cdot v}{8} \cdot C_p \quad (2.1)$$

Siendo:

- D : el diámetro del disco generado por las aspas al girar

- v : velocidad del viento en el hub¹ del generador eólico
- ρ : densidad del viento
- C_p : Coeficiente de potencia

A su vez, el coeficiente de potencia depende de varios factores, teniendo un límite teórico de 0,59 que indica que no es posible extraer toda la energía del viento. Entre estos factores, dos de ellos son controlables, por lo que se buscará en todo momento controlarlos de forma de obtener la máxima extracción de potencia. Estos factores son: el ángulo del aspa con respecto al viento (β), y la relación de velocidad de la punta del aspa con respecto a la velocidad del viento en el hub (λ). Es en la variación del valor de λ donde se vuelve imprescindible el control de la velocidad del generador de forma de obtener la máxima transmisión de potencia.

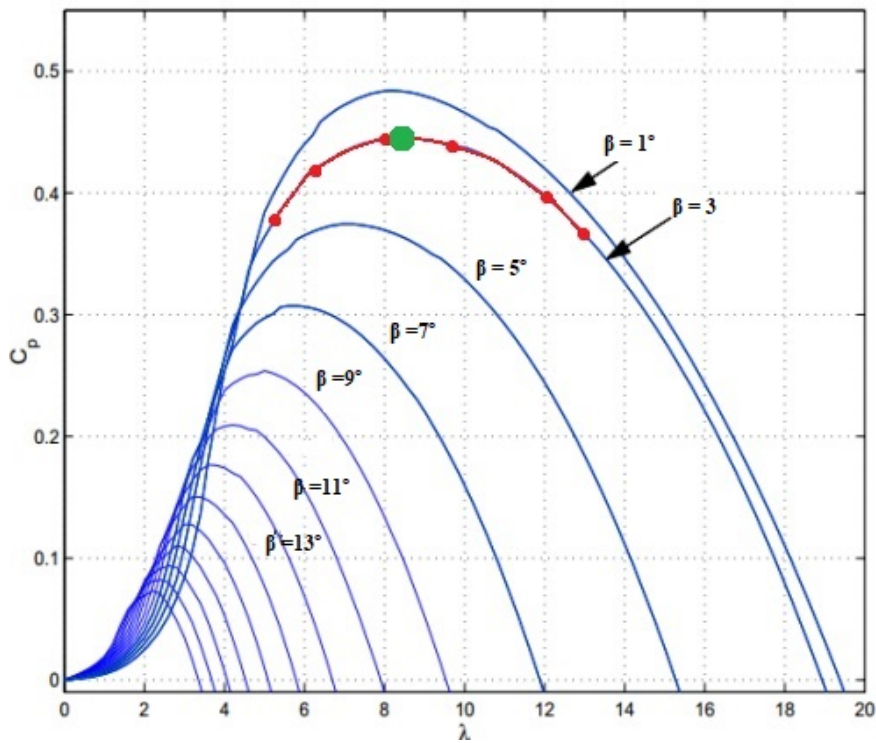


Figura 2.1: $C_p = f(\beta; \lambda)$ (fuente [4]).

En el gráfico de la figura 2.1 se observa la dependencia del coeficiente de potencia según el ángulo de la pala β y la velocidad relativa λ . Como puede apreciarse en la curva roja, dado un ángulo β determinado, el control debe ser capaz de variar la velocidad del generador para permanecer siempre en el punto de transferencia óptima de potencia (punto verde).

¹El cubo donde se montan las aspas

2.2. Ventajas sobre MI clásica

La máquina de inducción clásica tiene el rotor cortocircuitado y es alimentada por el estator. En las figuras siguientes se muestran el modelo estrella equivalente y la curva par-velocidad de la MI clásica.

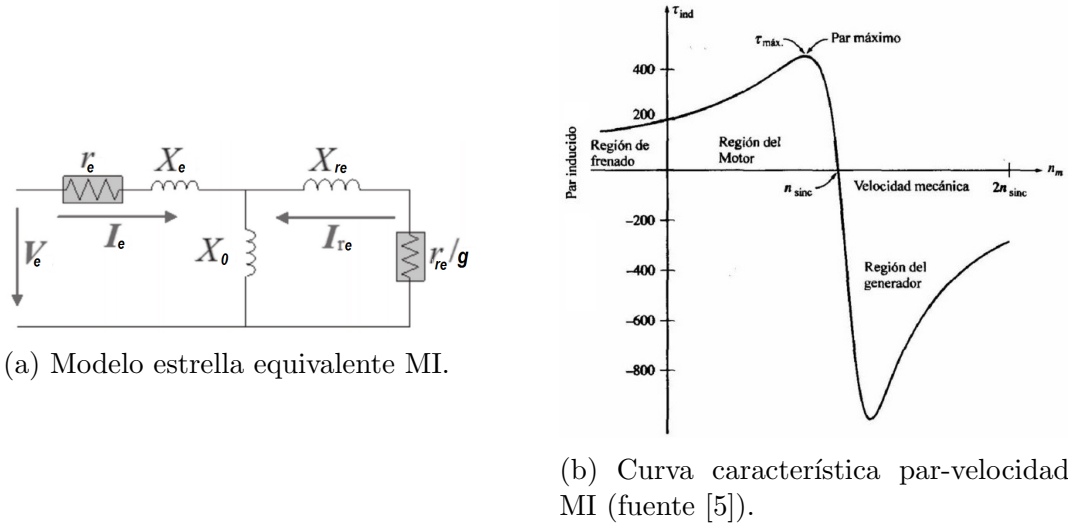


Figura 2.2: Modelo y curva característica de la máquina de inducción.

En la figura 2.2a se presenta el modelo eléctrico estrella equivalente de la MI convencional. En este modelo se encuentra una resistencia dependiente del deslizamiento $\frac{R_{re}}{g}$. Esta resistencia puede descomponerse en dos factores $\frac{R_{re}}{g} = R_{re} + R_{re} \cdot \frac{1-g}{g}$, donde se separa en estos términos ya que $3 \cdot I_{re}^2 \cdot R_{re}$ representan las pérdidas Joule en el bobinado del rotor y $3 \cdot I_{re}^2 \cdot R_{re} \cdot \frac{1-g}{g}$ la potencia mecánica intercambiada por el eje. Utilizando este modelo puede calcularse la curva par-velocidad característica de las MI (ver figura 2.2b). En esta curva se aprecian 3 regiones: freno (par positivo, velocidad negativa), motor (par positivo, velocidad positiva), generador (par negativo, velocidad positiva). El punto de transición entre la región motor y generador es donde la máquina alcanza la velocidad de sincronismo (n_{sync} en la figura). Esta curva queda completamente determinada dada la tensión y frecuencia de alimentación. Por lo tanto, para una frecuencia dada, la MI será un motor a velocidades entre 0 y n_{sync} , y un generador para velocidades mayores a n_{sync} .

Además, la velocidad de giro del rotor no es controlada. La misma queda determinada en el punto donde el par de la máquina iguala al par resistivo.

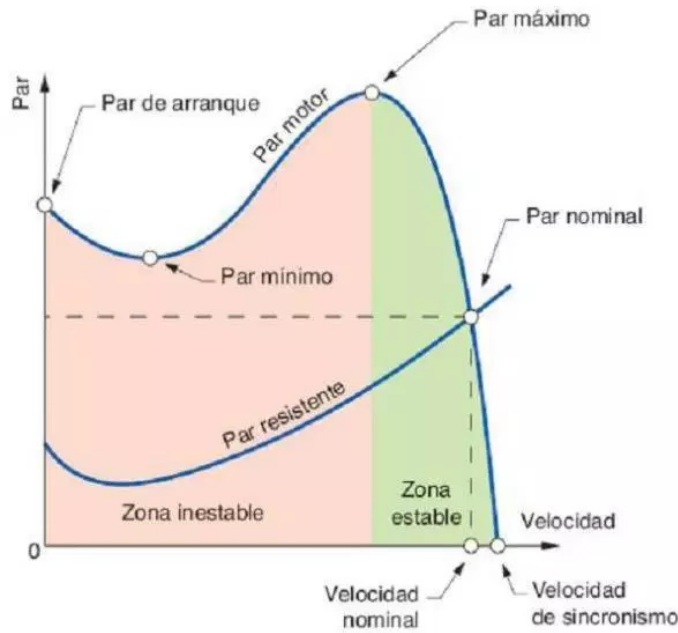


Figura 2.3: Punto de funcionamiento MI (fuente [6]).

En la figura 2.3 puede observarse el comportamiento mencionando anteriormente, dadas las curvas par-velocidad del motor y la carga, la velocidad en la que queda funcionando la MI que arrastra dicha carga es la intersección entre ambas. Este comportamiento es igual para la región generador. En el caso de los motores de inducción, para controlar la velocidad se utiliza un variador de frecuencia, equipo que se conecta entre la red y el estator y varía la tensión y frecuencia de alimentación de forma de alterar la curva del motor para lograr controlar su velocidad. Por lo tanto para las MI convencionales se cuenta con dos opciones: conectarlas directamente a la red, donde no se tendría control sobre la velocidad de giro, o conectarlas a un variador de frecuencia, pero éste debe tener una potencia nominal igual a la del motor², lo cual incrementa los costos del equipo.

Es por esta característica que la MIDA es superior a la MI convencional para utilizarlas como generadores eólicos.

2.2.1. Modelo eléctrico estrella equivalente de la MIDA

Para obtener el modelo de la máquina, se debe estudiar el comportamiento eléctrico de la misma.

²Los generadores *full converter* funcionan de esta manera pero utilizando una máquina sincrónica en vez de una de inducción para no tener que compensar el deslizamiento.

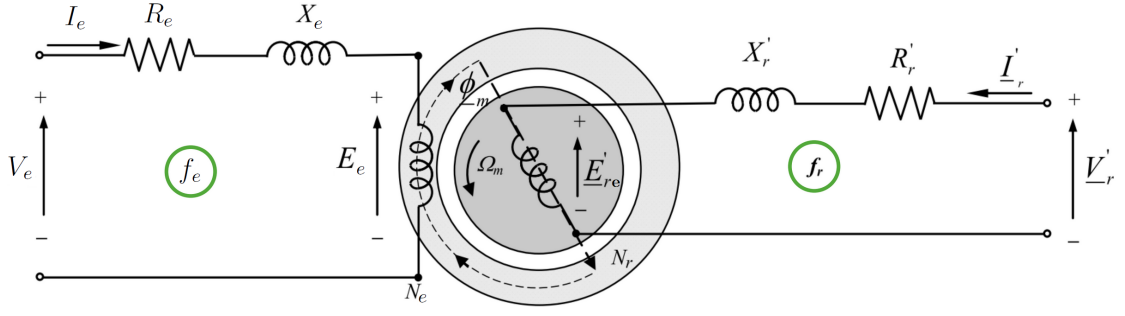


Figura 2.4: Modelo de una máquina doblemente alimentada (fuente [4]).

Este modelo considera por un lado en el estator una fuente de voltaje V_e de frecuencia f_e , donde se representa con R_e la resistencia del bobinado y X_e la reactancia debido a las fugas de flujo de la bobina a f_e . Luego se representan las bobinas del estator y rotor que generan el flujo de magnetización Φ_m .

Del lado del rotor se tiene, de forma análoga al lado del estator, una fuente de voltaje V_r de frecuencia f_r , donde se representa con R_r la resistencia del bobinado y X_r la reactancia debido a las fugas de flujo de la bobina a f_r .

La *fem* inducida en el estator por el campo giratorio es E_e , mientras que E'_{re} es la *fem* inducida en el rotor con frecuencia f_r , debido al deslizamiento entre los campos del rotor y el estator.

$$E = \frac{d\Phi_m}{dt}$$

$$E_e = 2\pi \cdot f_e \cdot N_e \cdot K_e \cdot \Phi_m / \sqrt{2}$$

$$E'_{re} = 2\pi \cdot f_r \cdot N_r \cdot K_r \cdot \Phi_m / \sqrt{2}$$

Donde, N_e y N_r es el número de vueltas de cada bobinado, y K_e y K_r es una constante que depende de la geometría de la máquina. Luego se obtiene la relación de transformación para poder representar todo en un mismo nivel de tensión del estator.

$$\frac{E'_{re}}{E_e} = \frac{N_r \cdot K_r \cdot f_r}{N_e \cdot K_e \cdot f_e}$$

$$\frac{N_r \cdot K_r}{N_e \cdot K_e} = n$$

$$\frac{f_r}{f_e} = g$$

$$\frac{E'_{re}}{E_e} = n \cdot g$$

Con esta relación se obtiene que n es la relación de transformación entre dos bobinados como si fuera un transformador y g es el deslizamiento ya que $g = \frac{f_r}{f_e} =$

$\frac{f_e - f_m \cdot p}{f_e}$ donde p es el número de pares de polos de la máquina y f_m la frecuencia de giro de la máquina.

Con la relación obtenida es posible pasar las inductancias a nivel de tensión del estator.

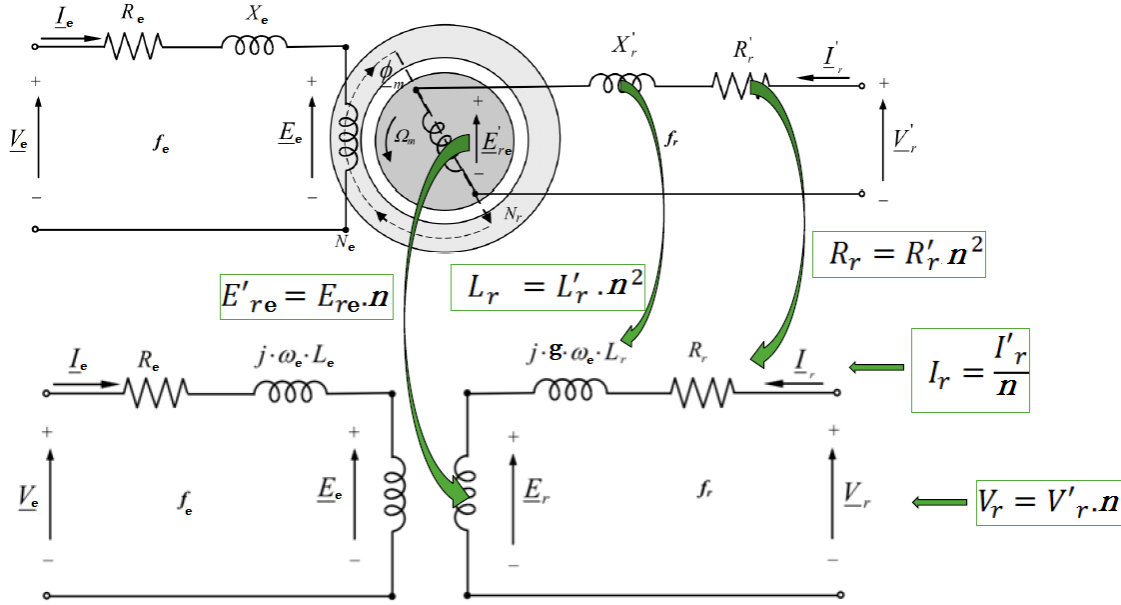


Figura 2.5: Modelado de componentes al mismo nivel de tensión (fuente [4]).

En la figura 2.6 se pueden ver todas las magnitudes a nivel de tensión del estator. Ahora se procede a ver el circuito completo del lado del estator a frecuencia f_e .

$$\begin{aligned}
 E_{re} &= gE_e \\
 V_r - gE_e &= (j\omega_r L_r + R_r)I_r \\
 E_e &= \frac{V_r}{g} - \frac{(j\omega_r L_r + R_r)}{g} I_r \\
 V_e - E_e &= (j\omega_e L_e + R_e)I_e \\
 V_e - \frac{V_r}{g} - (j\omega_e L_e + R_e)I_e + \frac{(j\omega_r L_r + R_r)}{g} I_r &= 0 \\
 E_e &= j\omega_e L_m(I_e + I_r)
 \end{aligned}$$

Con las ecuaciones presentadas es posible modelar el sistema. En ellas se desprecian las pérdidas en el hierro son despreciadas ya que normalmente son mucho más pequeñas que las pérdidas de la rama de cortocircuito.

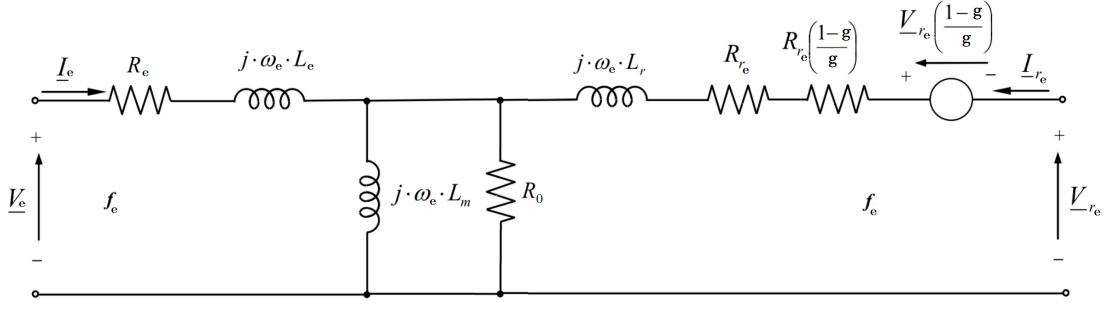


Figura 2.6: Modelo simplificado de una MIDA a mismo nivel de tensión y frecuencia.

Aquí, los términos $\frac{R_{r_e}}{g} = \frac{R_{r_e}(1-g)}{g} + R_{r_e}$ y lo mismo con $\frac{V_{r_e}}{g} = \frac{V_{r_e}(1-g)}{g} + V_{r_e}$ ya se encuentran desarrollados. Este modelo facilita el estudio de balance de potencia ya que se ve claramente la potencia entrante por el estator ($V_e; I_e$), la potencia entrante por el rotor ($V_{r_e}; I_{r_e}$), la potencia mecánica intercambiada por el eje ($R_{r_e} \cdot \frac{1-g}{g}; V_{r_e} \cdot \frac{1-g}{g}; I_{r_e}$), y las impedancias que generan las pérdidas ($R_{r_e}; I_{r_e}$).

Para este modelo, la potencia del estator puede despejarse de la siguiente manera:

$$\begin{cases} P_e = 3 \cdot \text{Re}\{V_e \cdot I_e^*\} \\ V_e = I_e \cdot R_e + I_e \cdot j \cdot \omega_e \cdot L_e + (I_e + I_{r_e}) \cdot j \cdot \omega_e \cdot L_m \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\Rightarrow P_e = 3 \cdot R_e \cdot |I_e|^2 + 3 \cdot \text{Re}\{j \cdot \omega_e \cdot L_m \cdot I_{r_e} \cdot I_e^*\} \quad (2.3)$$

De forma análoga, la potencia por el rotor es

$$\begin{cases} P_r = 3 \cdot \text{Re}\{V_{r_e} \cdot I_{r_e}^*\} \\ V_{r_e} = I_{r_e} \cdot R_{r_e} + I_e \cdot j \cdot \omega_e \cdot L_r + (I_e + I_{r_e}) \cdot j \cdot \omega_e \cdot L_m g \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\Rightarrow P_r = 3 \cdot R_{r_e} \cdot |I_{r_e}|^2 + 3 \cdot \text{Re}\{g \cdot j \cdot \omega_e \cdot L_m \cdot I_e \cdot I_{r_e}^*\} \quad (2.5)$$

En las expresiones de las potencias pueden identificarse dos términos, siendo uno de ellos la potencia que se intercambia entre el rotor, el estator y el eje, y el otro la potencia disipada en la resistencias de los bobinados ($3 \cdot R \cdot |I|^2$). Si se desprecian las pérdidas se llega a la siguiente relación:

$$P_r \approx -g \cdot P_e \quad (2.6)$$

La ecuación anterior justifica lo explicado en el capítulo 2: si se hace trabajar a la MIDA con g en el entorno de $(-0, 3; +0, 3)$, entonces la potencia intercambiada por el convertidor del rotor será como máximo un 30 % de la potencia intercambiada

por el estator.

El sentido de las potencias del modelo es el siguiente:

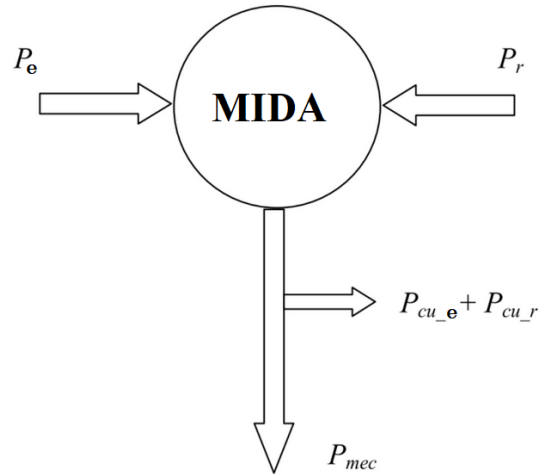


Figura 2.7: Sentido de las potencias utilizado en el modelo.

Capítulo 3

Equipos y conexionado

3.1. Diagrama de conexionado

En la siguiente figura se presenta el diagrama de conexiones del sistema implementado.

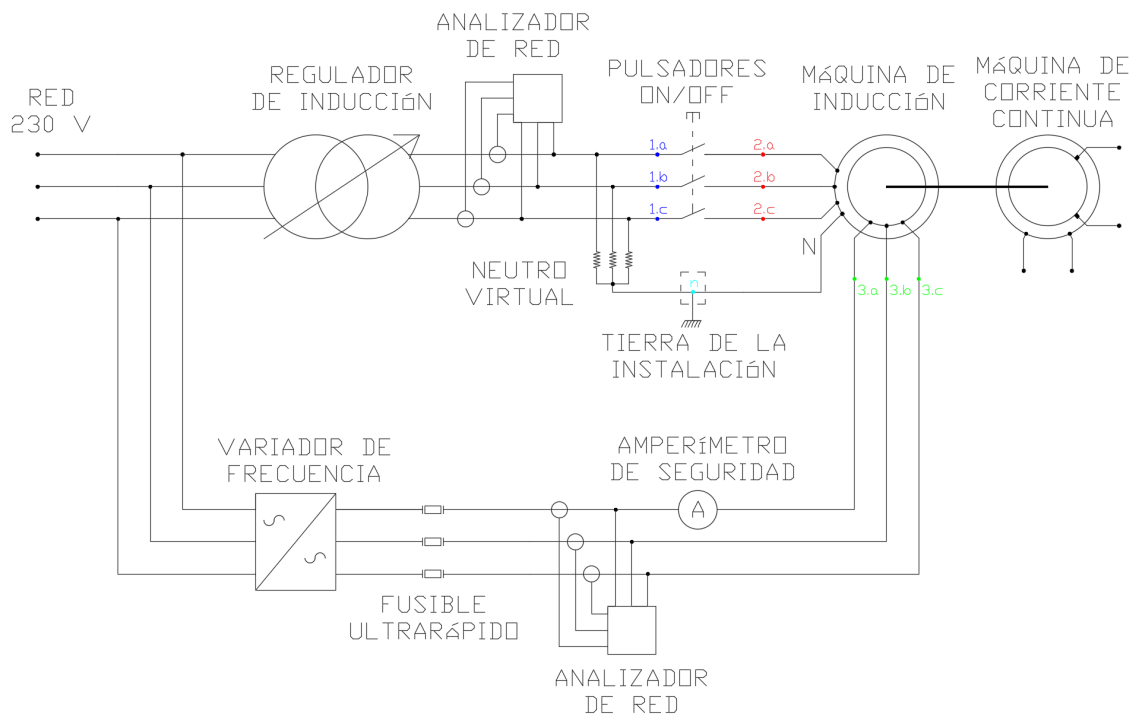


Figura 3.1: Diagrama de conexiones.

En el diagrama de la figura 3.1 se encuentran representados los equipos fundamentales para la realización de la práctica, los cuales se presentan en la sección 3.2.

Para la implementación de la MIDA, el estator de una máquina de inducción de rotor bobinado es alimentado a través de un regulador de inducción y un contactor actuado mediante pulsadores. El rotor, el cual cuenta con bornes accesibles, es

alimentado a través de un variador de frecuencia. Se puede observar que el conexionado es un anillo cerrado con dos fuentes de tensión independientes (regulador de inducción y variador de frecuencia). El circuito debe energizarse con ambas fuentes con sus salidas desvinculadas, ya que éstas pueden imponer tensiones diferentes y generar un cortocircuito. El momento de vincular las salidas de las fuentes se denominará “acople” y se hará a través del contactor controlado por pulsadores que conectará los puntos 1.a con 2.a, 1.b con 2.b, y 1.c con 2.c.

Para realizar el acople se debe verificar que las tensiones de los puntos que se conectarán al cerrar el contactor sean similares, de forma que el transitorio al momento del acople no resulte en corrientes demasiado elevadas. Sin embargo, pueden no ser iguales ya que, una vez pasado el transitorio, las tensiones impuestas por cada fuente quedan conectadas a través de la impedancia del motor, permitiendo que ambas tensiones tengan distinto módulo. Además, el libre movimiento del rotor permite corregir diferencias de fase y frecuencia.

La similitud entre los voltajes se verifica mediante el uso de un osciloscopio, midiendo tensión fase-neutro impuesta por el regulador de inducción (punto 1.a) y la inducida en el estator (punto 2.a)¹, corroborando su similitud en módulo y fase.

El objetivo de este conexionado es poder regular la tensión del estator y rotor de forma independiente, ya que son las diferencias entre las tensiones que hacen funcionar al sistema.

El eje de la MIDA está acoplado a una máquina de corriente continua, la cual es utilizada como motor de arrastre o como generador, en caso que se quiera aportar o extraer potencia por el eje. Los posibles conexionados de la máquina de continua se presentan a continuación.

¹Puede ser 1.a con 2.a, 1.b con 2.b, o 1.c con 2.c

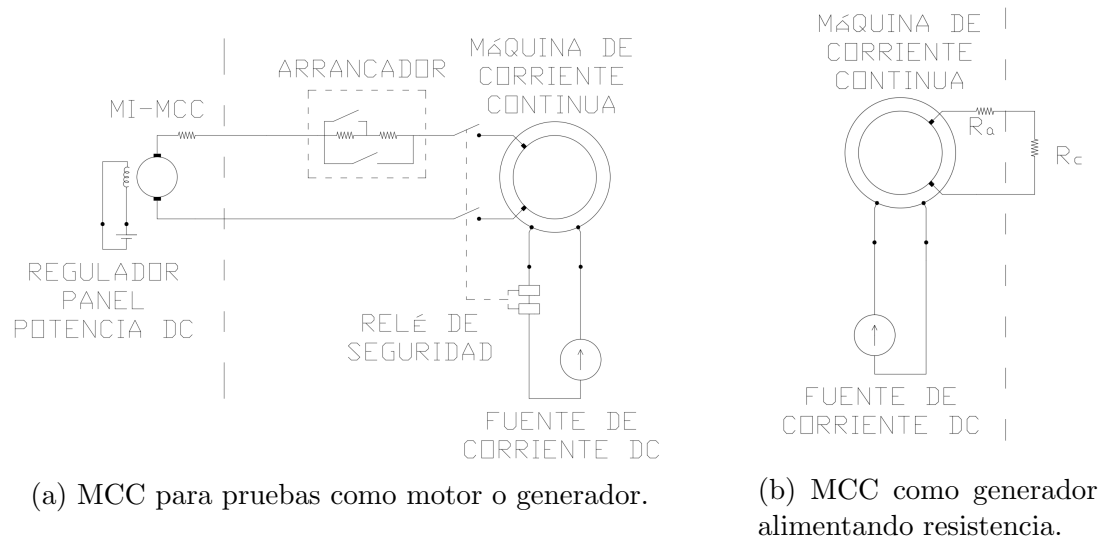


Figura 3.2: Posibles conexiones para la máquina de continua.

Para realizar mediciones de potencia se utilizan analizadores de red en el estator y rotor.

3.2. Listado de equipos

3.2.1. Máquina de inducción de rotor bobinado

- Marca: Siemens
- Modelo: OR69n-4
- Tensión Nominal del Estator: 220(D)-380(Y) V
- Corriente Nominal del Estator: 29,2(D)-16,9(Y) A
- Potencia Nominal: 8 kW
- $\cos(\varphi)$ Nominal: 0,84
- Velocidad Nominal: 1440 rpm
- Frecuencia Nominal: 50 Hz
- Tensión Nominal del Rotor: 165(Y) V
- Corriente Nominal del Rotor: 30(Y) A

3.2.2. Máquina de continua

- Marca: Westinghouse
- Modelo: 6-b-6210
- Tensión Nominal: 250 V
- Corriente Nominal: 20 A
- Potencia Nominal: 5 kW
- Velocidad Nominal: 1440 rpm

3.2.3. Variadores de frecuencia

- Variador Danfoss
 - Marca: Danfoss
 - Modelo: 3011
 - Código: 175H7274
 - Tensión Nominal: 380-415 V
 - Potencia Nominal: 7.5 kW
 - Corriente Nominal: 24 A
- Variador Schneider
 - Marca: Schneider
 - Modelo: Altivar ATV312-HU55M3
 - Tensión Nominal: 240 V
 - Potencia Nominal: 5.5 kW
 - Corriente Nominal: 27.5 A

3.2.4. Regulador de Inducción

El regulador de inducción es un transformador trifásico de relación de transformación variable. Alimentando con una tensión en el primario de 230 V, cuenta con dos rangos de funcionamiento seleccionables mediante una manivela: 0 – 120 V y 80 – 380 V. En cada rango de funcionamiento se puede variar manualmente de manera continua la relación de transformación mediante el accionamiento de un volante.



(a) Variador Schneider.



(b) Variador Danfoss.

Figura 3.3: Variadores utilizados.

3.2.5. Instrumentos de medida

Se utilizaron los instrumentos de medida presentados a continuación.

- Multímetro Fluke376.
- Multímetro Fluke45.
- Tacómetro Testo 465.
- Osciloscopio digital Gwistek GDS-2062.
- Analizador de red CIRCUTOR CVMk2.
- Analizador de red AEMC 3945.
- Amperímetro analógico de hierro móvil, fondo de escala 30 A.

3.2.6. Panel de potencia y medida AC

Se trabajó con el panel de potencia y comando presente en el laboratorio. Este equipo se utiliza para la alimentación del estator de la MIDA y cuenta con un guardamotor y un contactor. El contactor se comanda mediante dos pulsadores. El panel ya cuenta con el analizador de red Circutor conectado a la entrada del mismo.



Figura 3.4: Panel de potencia y control.

3.2.7. Banco de resistencias

El banco de resistencias utilizado como carga es un banco trifásico, con 10 resistencias de $220\ \Omega$ en paralelo entre fases que se conectan o desconectan de forma independiente mediante contactores.

3.2.8. Panel de potencia DC

Este panel cuenta con varias funcionalidades. Por un lado, es una fuente de tensión DC variable, conformada por un “variac”² y un puente rectificador de diodos. Este equipo permite disponer de una fuente DC de rango 0 a 200 V variable de forma continua, con una corriente de salida máxima de 8 A. A la salida del sistema se encuentra conectado un voltímetro digital a efectos de conocer la tensión de salida.

Por otro lado, cuenta con un sistema de arranque para motores de corriente continua mediante el método de cortocircuitado de resistencias. A su vez, el sistema de arranque cuenta con protección contra pérdida de campo, utilizando dos relés por los que se hace pasar la corriente de campo de la máquina.

Finalmente, el panel cuenta también con dos amperímetros y un voltímetro analógicos de hierro móvil, con sus bornes accesibles en el frente del panel.

²Auto-transformador de relación de vueltas variable.



Figura 3.5: Panel de potencia de corriente continua.

3.2.9. Grupo generador MI-MCC

Se cuenta con un grupo generador MI-MCC disponible en el laboratorio³. Consiste en un motor de inducción con alimentación propia, desde el tablero general del laboratorio, acoplado por el eje a una máquina de corriente continua, de la cual se tienen accesibles los bornes de armadura y campo. Este equipo es utilizado para contar con una fuente de corriente continua, capaz tanto de entregar como de recibir potencia.

A continuación se presentan los datos de placa de la máquina de corriente continua.

- Marca: Siemens-SCHUCKERT
- Tipo: G147 B3
- Tensión Nominal MCC: 150 V

³Este grupo es distinto al utilizado para implementar la MIDA. Se menciona dentro del equipamiento ya que debió ser utilizado por su capacidad de recibir potencia.

- Tensión Nominal MI: 230 V
- Corriente Nominal: 82,5 A
- Potencia Nominal MCC: 12,4 kW
- Potencia Nominal MI: 19 kW
- Autoexcitación de inducido
- Velocidad Nominal: 1425 rpm

3.3. Análisis del equipamiento del LME

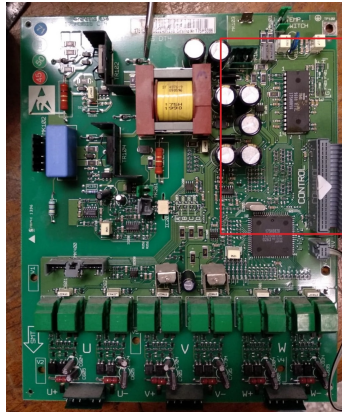
El Laboratorio de Maquinas Eléctricas es el lugar físico donde se desarrolló el Proyecto Final de Carrera y se realizará la práctica de laboratorio.

3.3.1. Variadores de frecuencia

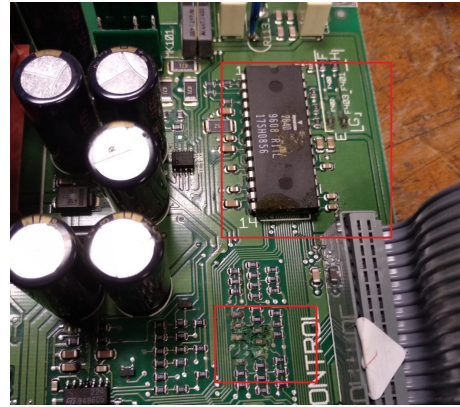
Originalmente se contaba con el variador Danfoss, que estaba disponible en el laboratorio.

Durante las pruebas preliminares, el variador presentaba una falla de *ground fault* al conectarle una carga, apagándose posteriormente. Debido a esto, se investigó y se halló que una placa estaba dañada (ver figura 3.6). Revisando el laboratorio se encontró otro variador Danfoss de la misma línea. Examinando este variador se observó que utilizaba la misma placa, por lo cual se reemplazó en el variador a utilizar, lo cual permitió un correcto funcionamiento.

Con este variador se desarrolló el Proyecto durante 7 meses, hasta que en busca de una falla (el variador reparado no podía ser comandado de forma remota) se realizó una maniobra incorrecta y ocurrió un incidente. El resultado fue que uno de los integrantes del Equipo de Proyecto recibió una descarga, sin lesiones, y el variador dañado. Ante esto, se consiguió prestado el variador Schneider, con el cual se logró terminar el Proyecto de Fin de Carrera.



(a) Placa.



(b) Componentes dañados.

Figura 3.6: Placa dañada del variador Danfoss.

Protecciones

La alimentación de los variadores se protege con llaves termo-magnéticas adecuadas. Además, los variadores cuentan con un sistema propio de protección, considerando el sistema de alimentación hacia el motor, y potencia fluyendo en dicho sentido.

En el Proyecto (y la práctica de laboratorio) se utilizan los variadores de frecuencia con un conexionado fuera de lo común, siendo conectados al rotor de una MIDA, conectada a su vez a la red por el lado del estator. Dado este conexionado, una falla del lado del estator puede generar problemas en el variador debido a que hay otra fuente aportando potencia. Este caso no está contemplado en el sistema de protecciones del variador, ya que en una configuración normal conectado al estator no estaría previsto tener otra fuente de tensión conectada en el rotor. Por este motivo, para proteger los variadores de picos de corriente producidas por fallas del lado del estator, se colocaron en sus salidas fusibles ultra-rápidos. Los fusibles utilizados son de 20 A, marca MERSEN, clase gR según norma IEC-60269, con un bajo I^2t , código de fabricante FR10GR69V20.



(a) Fusibles montados próximos al VSD.



(b) Fusible.

Figura 3.7: Fusibles ultra-rápidos para protección de VSD.

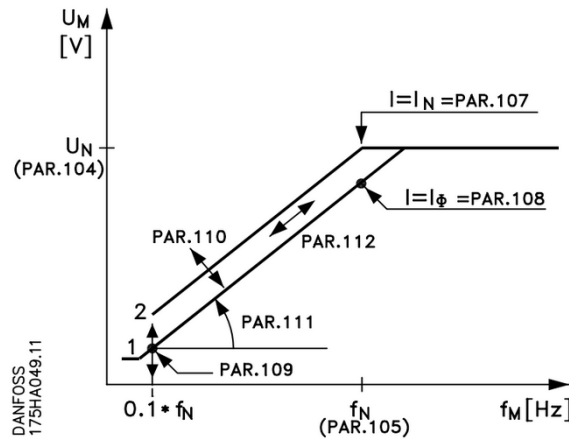
Configuración

Los variadores tienen dos modos en los que imponen la tensión de salida. Uno de ellos es el modo Vectorial, que se basa en un control que estima la posición del eje magnético del campo del rotor. Para lograr esto, calcula la tensión inducida en el estator por el campo del rotor. Una vez obtenida esta posición, el sistema puede imponer el eje magnético del campo del estator, de forma de obtener el máximo torque. Este modo tiene muchas funcionalidades, entre ellas permite al motor entregar el máximo par a bajas velocidades. Sin embargo, este control no es aplicable en la práctica a diseñar, ya que para poder realizar los cálculos el variador requiere del modelo del motor y estar conectado en la configuración clásica (alimentando el estator con el rotor cortocircuitado). El otro modo es el control escalar, en el cual la tensión es un valor determinado por el *setpoint* de frecuencia en base a una curva $V(f)$ determinada. Esta curva es en principio una recta que pasa por el origen, tiene esta forma para evitar la saturación de la máquina al imponer altos voltajes a bajas frecuencias. En general, esta curva puede modificarse mediante la configuración de determinados parámetros de forma de obtener distintas características, como por ejemplo la compensación de deslizamiento. Además, la curva $V(f)$ de la tensión inducida en el rotor a través del estator también es una recta que pasa por el origen⁴. Como estas dos tensiones (la impuesta por el variador y la inducida en el rotor a través del estator) quedan conectadas a través de la impedancia de cortocircuito del la MIDA, estos voltajes deben tener curvas similares.

Dado que la curva es configurable, durante el Proyecto se estudiaron los parámetros que podían llegar a afectar su forma. El manual del variador Danfoss utilizado presenta una gráfica que indica como modificar esta curva. Sin embargo, en la práctica se observó que no todos los parámetros modificaban la curva de la forma esperada.

⁴La explicación teórica se da en el sub-capítulo 3.3.2, apartado “Relación voltaje-frecuencia”.

Constant torque CT
(Parameter 100)



(a) Configuración de la curva.

Parameter
103 Motor power
104 Motor voltage
105 Motor frequency
107 Motor current
108 Motormagnetizingcurrent
109 Start voltage
110 Start compensation
111 U/F ratio
112 Slip compensation

(b) Descripción de parámetros.

Figura 3.8: Configuración control escalar Danfoss serie VLT3000.

Como se puede apreciar en la figura 3.8a, extraída del manual, para tener un control escalar debe configurarse el parámetro 100 en “Constant Torque”. Según el manual, los parámetros que afectan a la curva son 104, 105, 107, 108, 109, 110, 111, y 112. Se realizaron ensayos para comprender como afectaban estos parámetros a la curva V/f , obteniendo los siguientes resultados:

#	104 (U_n)	105 (f_n)	107 (I_n)	108 (I_{mag})	109 (start volt.)	110 (start comp)	111 (V/f)	112 (slip comp.)	301 (start freq.)
1	380	50	15	5	0	0	5	0	10
2	380	50	15	5	20	0	5	0	10
3	380	50	5	5	0	0	5	0	10
4	380	50	15	15	0	0	5	0	10
5	380	50	15	5	0	0	10	0	10
6	380	50	15	5	0	0	2	0	10
7	380	50	15	5	0	0	5	0	0
8	400	50	15	5	0	0	5	0	10
9	380	50	15,8	5,4	35,2	1,19	5	1,72	10
10	380	60	15	5	0	0	5	0	10
11	380	50	15	5	0	0	5	10	10
12	380	50	15	5	0	20	5	0	10

Tabla 3.1: Pruebas configuración curva $V(f)$ VLT3000.

En la tabla 3.1 se encuentran las 12 configuraciones probadas. A cada configuración se modificaba un solo parámetro con respecto al caso base (caso 1) y se relevaba la nueva curva “ V/f ” obtenida. Los únicos tres parámetros que presentaron cambios en la curva fueron “ f_n ” (105), “Start Voltage” (109), “ V/f ” (111). Ya que se observó que el comportamiento no era exactamente igual a lo que decía el manual, se probó también cambiar el parámetro “Start Frecuency” (301, configuración 7) pensando que podría influir en la curva. La configuración 9 se obtiene luego de hacer

un *reset* de fábrica al variador. Cabe destacar que al resetear el variador, el mismo selecciona los parámetros con el objetivo de tener la tensión nominal del motor, a la frecuencia nominal del mismo. Para apreciar las variaciones en la curva de salida, se modificaron uno a uno los distintos parámetros.

En la tabla 3.2 se muestran las curvas relevadas para los parámetros que efectivamente modificaban la curva de salida V/f .

Conf. base (1)		Conf. 2		Conf. 6		Conf.10	
Frecuencia (Hz)	Voltaje (V)	Frecuencia (Hz)	Voltaje (V)	Frecuencia (Hz)	Voltaje (V)	Frecuencia (Hz)	Voltaje (V)
0	25	0	45	0	15	0	25
10	25	10	45	12	15	20	25
11	30	11	50	13	16	30	75
12	35	50	245	14	18	90	375
50	225	92	455	120	230	106	455
96	455	93	457	13	16	107	457
97	457	120	457	12	15	106	455
120	457	93	457	5	15	18	15
98	457	92	455	4	0	0	0
96	455	4	15	0	0	-	-
9	20	3	15	-	-	-	-
8	15	1	15	-	-	-	-
5	15	0	0	-	-	-	-
4	0	-	-	-	-	-	-

Tabla 3.2: Relevamiento de curva $V(f)$, configuraciones 1, 2, 6, 10.

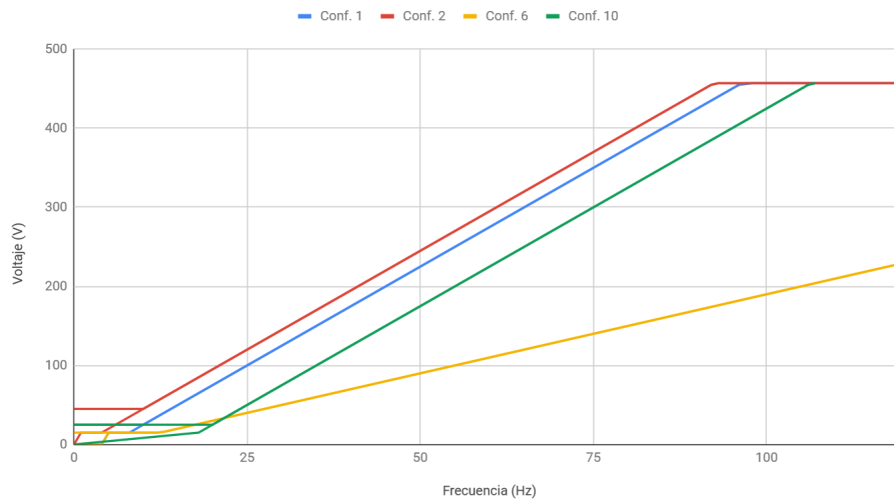


Figura 3.9: Curvas obtenidas variando parámetros 105, 109, 111.

Como se puede observar en la figura 3.9, a partir de la curva base (azul), si se aumenta “*Start Voltage*” la curva es desplazada hacia arriba por un valor igual a la diferencia de este valor (20 V de la curva base a la curva 2). Si se altera “ V/f ”, la pendiente de la curva pasa a ser el nuevo valor. Si se cambia “ fn ”, la curva se desplaza hacia la derecha un valor igual a la diferencia de estos valores ($60 - 50 = 10Hz$ de la curva base a la curva 10).

Conocido este comportamiento, cuando se debió imponer una curva determinada, primero se ajustó la pendiente de la curva y luego el “*Start Voltage*”. No fue

necesario cambiar la frecuencia nominal mientras fue utilizado este variador.

Como se relató anteriormente el variador de marca Danffos se descartó luego del incidente y se continuó utilizando el variador de marca Schneider. Por lo cual se estudió la configuración que presenta éste para la utilización del control escalar. A continuación se presenta la configuración del variador ATV312:

Grupo de parámetro	Parámetro	Valor	Descripción
REF	AIUI	0-100	Referencia local de velocidad
SET	ACC	120	Tiempo de aceleración
SET	DEC	120	Tiempo de desaceleración
SET	LSP	0	Frec. del motor a mínima referencia
SET	UFR	0	Compensación IR
SET	UFR2	0	Compensación 2 IR
SET	Ftd	100	Frecuencia del variador que prende una salida
DRC	bFr	50	Frecuencia nominal del motor
DRC	UrS	240	Voltaje nominal del motor
DRC	FrS	150	Frecuencia máxima de alimentación
DRC	rSC	no	-
DRC	UFt	n	Tipo de curva V/f
CTL	LAC	L3	Nivel de acceso
CTL	Fr1	UPdt	Tipo de control de frecuencia
CTL	Fr2	no	Tipo de control de frecuencia
CTL	rfe	Fr1	Referencia de frecuencia
CTL	chcf	sim	-
I_0	tCC	2C	Control de 2 hilos
Fun	UPd >usp	LI2	Entrada digital para aumentar la frecuencia
Fun	UPd >dsp	LI3	Entrada digital para disminuir la frecuencia

Tabla 3.3: Configuración del variador ATV312.

Con la configuración planteada en la tabla se obtiene el siguiente tipo de curva V/f :

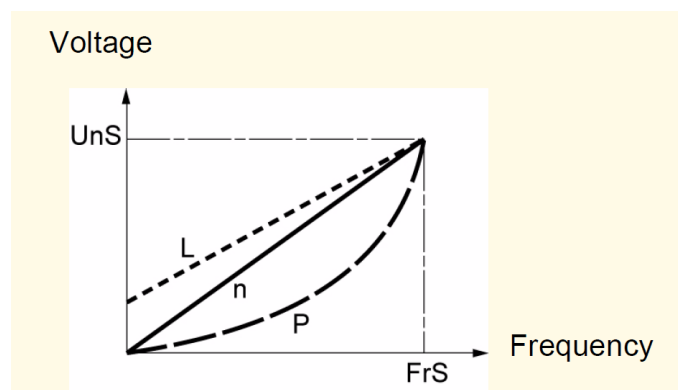


Figura 3.10: Tipos de curvas obtenidas del variador ATV312.

Como se observa en la tabla 3.3 y en la figura 3.10, extraída del manual, el tipo de curva seleccionado será el tipo “ n ”. Con los parámetros de la tabla se obtendrá una pendiente $V/f = \frac{U_{ns}}{F_{rs}} = \frac{150\text{ V}}{240\text{ Hz}} = 0,625\text{ V/Hz}$.

Para variar la pendiente de esta curva basta con modificar U_{ns} y/o F_{rs} . Para todas las medidas realizadas experimentalmente se utilizó el valor de pendiente mencionado, ya que es el adecuado según los resultados obtenidos durante los ensayos de estabilidad con el variador Danfoss.

3.3.2. Motor de inducción con rotor bobinado

El motor de inducción utilizado para la Tesis es de rotor bobinado, con los bobinados del rotor conectados en estrella y los tres bornes accesibles mediante anillos deslizantes. En el estator son accesibles los 6 bornes de los bobinados, permitiendo conectarlo tanto en estrella como en triángulo.

Con respecto al conexionado del estator, dado que es deseable contar con el neutro para realizar medidas, el conexionado del mismo debe ser en estrella. La menor capacidad de conducción de corriente de este conexionado no es un inconveniente ya que los puntos de funcionamiento en los que opera la máquina están lejos de su corriente nominal.

Sobre esta máquina se realizaron numerosos ensayos. Todos los relacionados con los parámetros eléctricos del modelo clásico serán presentados en el capítulo 4.

Relación de transformación

Dado que en este sistema se trabaja con dos alimentaciones, es importante conocer la relación de transformación entre el estator y el rotor. Para medir esto, se alimentó desde el rotor con el regulador de inducción, y utilizando un osciloscopio digital, se determinó la tensión entre fases en el rotor y en el estator. Luego se calculó el promedio de la tensión entre fases para el estator y el rotor, y por último se dividieron estos valores. El ensayo se repitió en 3 valores de tensión diferente.

$U_{12}\text{ e.}$ (V)	$U_{23}\text{ e.}$ (V)	$U_{31}\text{ e.}$ (V)	$U_{12}\text{ r.}$ (V)	$U_{23}\text{ r.}$ (V)	$U_{31}\text{ r.}$ (V)	$U\text{ e. prom.}$ (V)	$U\text{ r. prom.}$ (V)	$n = \frac{U_r}{U_e}$
262,2	261,0	263,1	129,3	129,6	130,1	262,1	129,67	0,49
279,7	279,2	277,2	136,8	137,5	138,0	278,7	137,43	0,49
315,7	314,3	311,4	153,0	154,4	154,6	313,8	154,00	0,49

Tabla 3.4: Ensayo relación de vueltas MI.

Como se puede apreciar en la tabla 3.4, la relación de transformación del estator al rotor es $n = 0,49$.

Cabe destacar que este ensayo se realizó 2 veces, en la primera instancia se encontró una relación de vueltas $n = 0,42$. Estos resultados se encuentran en la tabla 3.5. Luego, en la segunda instancia se llegó a la relación de transformación $n = 0,49$.

U_e (V)	U_r (V)	U_r/U_e
30,8	12,70	0,41
55,0	22,96	0,42
78,3	33,14	0,42

Tabla 3.5: Ensayo de relación de vueltas con voltaje distorsionado.

En un principio se tomó el primer valor, $n = 0,42$, como el correcto. Sin embargo, a la hora de realizar el modelado de la máquina se observó que varios parámetros con mucha sensibilidad al valor de n no tenían un resultado correcto, por lo que se decidió volver a realizar la medida. El primer valor se obtuvo realizando las medidas con un multímetro. Cuando se realizó la segunda medida, se visualizaron las formas de onda de los voltajes con un osciloscopio digital y se observó que para niveles de tensión cercanos a los 50 V (primer ensayo, tabla 3.5) la tensión presentaba una distorsión de quinto armónico, cuya fase dependía de la posición del rotor. Luego, se aumentó la tensión hasta que la forma de onda del voltaje fuera sinusoidal, y si tomaron nuevamente las medidas (aproximadamente 300 V, tabla 3.4). Estos resultados son expuestos ya que ayudan a explicar los valores medidos en el ensayo de la curva $V(f)$ mostrado más adelante.

Relación voltaje-frecuencia

Como fue mencionado en el apartado de configuración de los variadores (subcapítulo 3.3.1), se eligió el modo de control escalar del variador ya que se busca que las curvas V/f impuestas por el variador e inducida en el rotor a través del estator fueran similares.

Al modificar la velocidad del rotor, varía la velocidad de giro del campo magnético generado por el estator visto desde el rotor, según la ecuación:

$$f_{er} = f_e - f_m \cdot p \quad (3.1)$$

Es claro que cuando el rotor está detenido, la máquina se comporta como un transformador con relación de vueltas n , por lo que la tensión vista desde el rotor será $V_r = V_e \cdot n$ y la frecuencia $f_r = f_e$. Cuando se hace girar el rotor, la frecuencia de la tensión inducida es igual a f_{er} y el módulo del voltaje es linealmente proporcional al mismo valor. Por lo que, definiendo el deslizamiento $g = \frac{f_e - f_m \cdot p}{f_e}$, las ecuaciones quedan:

$$\begin{cases} V_r = V_e \cdot n \cdot g \\ f_r = f_e \cdot g \end{cases} \quad (3.2)$$

Dado que el coeficiente $\frac{V_r}{f_r}$ no depende de g , es esperable que la curva $V(f)$ relevada sea una recta con pendiente $\frac{V_e \cdot n}{f_e}$ que pase por el origen (cuando $g = 0$, la velocidad de giro del campo el estator respecto al rotor es 0 por lo que no hay inducción).

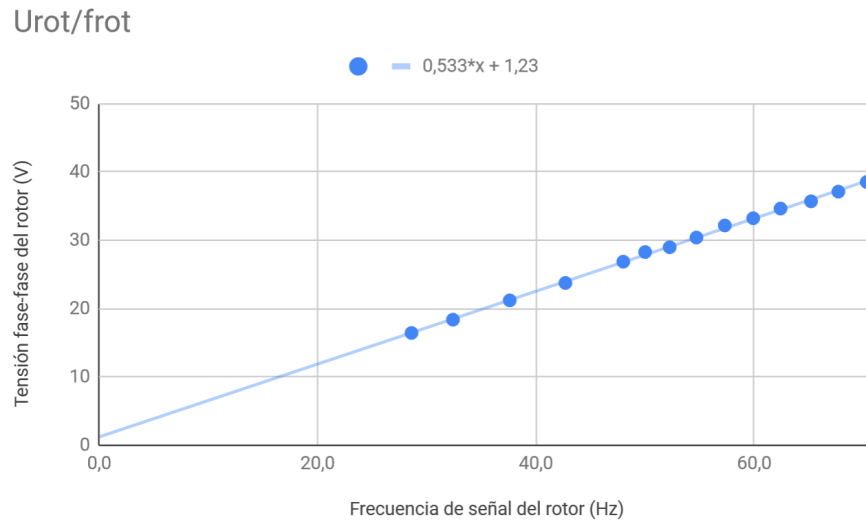
Por lo tanto, otro de los ensayos realizados a la máquina fue el relevamiento de la curva $V(f)$ de la tensión inducida en el rotor a través de una alimentación de estator fija, al variar la velocidad de giro del rotor.

Para realizar este ensayo se alimentó el estator de la máquina a través del regulador de inducción, y con la máquina de continua se varió la velocidad de giro del rotor. Colocando el osciloscopio en bornes del rotor, se tomaron valores de tensión y frecuencia para distintas velocidades.

$V_{prom,red}(V)$	Velocidad (rpm)	$f_{r_1 r_2}(Hz)$	$U_{r_1 r_2}(V)$
37,0	68	52,3	29
37,0	141	54,7	30
37,0	221	57,3	32
37,0	297	59,9	33
37,0	373	62,4	35
37,0	455	65,2	36
37,0	531	67,7	37
37,0	611	70,3	39
37,0	60*	48,0	27
37,1	220*	42,7	24
37,1	372*	37,6	21
37,1	527*	32,4	18
37,1	642*	28,6	16
37,1	0	50,0	28

* Sentido de giro opuesto a los datos anteriores.

Tabla 3.6: Ensayos $\frac{V_r}{f_r}(\omega_r)$.

Figura 3.11: Relación $U_{e_r} - f_{e_r}$.

En la figura 3.11 se observa que las medidas obtenidas se aproximan muy bien mediante una recta. Es razonable considerar que la misma pasa por el origen, y la pendiente de la recta de tendencia es 0,53, esta relación es $\frac{U}{f}$.

Curva de magnetización

El relevamiento de la curva de magnetización de la máquina se realizó para poder determinar la tensión a la que se realizarían los ensayos, garantizando que la misma operara en la zona de comportamiento lineal. De esta manera se evita que pequeñas variaciones de tensión generen elevados aumentos de corriente, evitando la saturación en el hierro.

Para realizar este ensayo se mantuvo el rotor abierto y se alimentó el estator utilizando el regulador de inducción. Para la medición se utilizó el analizador de red CVMk2. Partiendo desde tensiones pequeñas, se varió la tensión de alimentación, registrando para distintos puntos las potencias activa y aparente consumida. A partir de estos valores, se calculó la corriente. Se decidió realizar este procedimiento debido a que la medida de corriente entregada por el instrumento no se mantenía estable. Sin embargo, las medidas de potencia sí lo hacían y el resultado de la corriente calculada concordaba con las fluctuaciones que mostraba el analizador. Se pueden ver los datos registrados en la tabla 3.7.

U (V)	P (kW)	S (kVA)	I (A)
21,7	0,006	0,028	0,43
41,3	0,019	0,096	0,78
61,0	0,036	0,200	1,09
80,1	0,059	0,348	1,45
101,6	0,087	0,551	1,81
122,8	0,121	0,827	2,24
139,8	0,158	1,102	2,63
149,9	0,173	1,295	2,88
164,6	0,208	1,639	3,32
175,9	0,240	1,962	3,72
184,3	0,268	2,259	4,09
190,7	0,291	2,510	4,39
200,1	0,335	2,980	4,96
208,9	0,385	3,511	5,601
215,9	0,435	4,037	6,234

Tabla 3.7: Relevamiento curva de magnetización.

La figura 3.12 muestra los datos de tensión y corriente medidos. En base a estas mediciones se determinó la tensión de trabajo en 50 V, garantizando trabajar en la zona lineal.

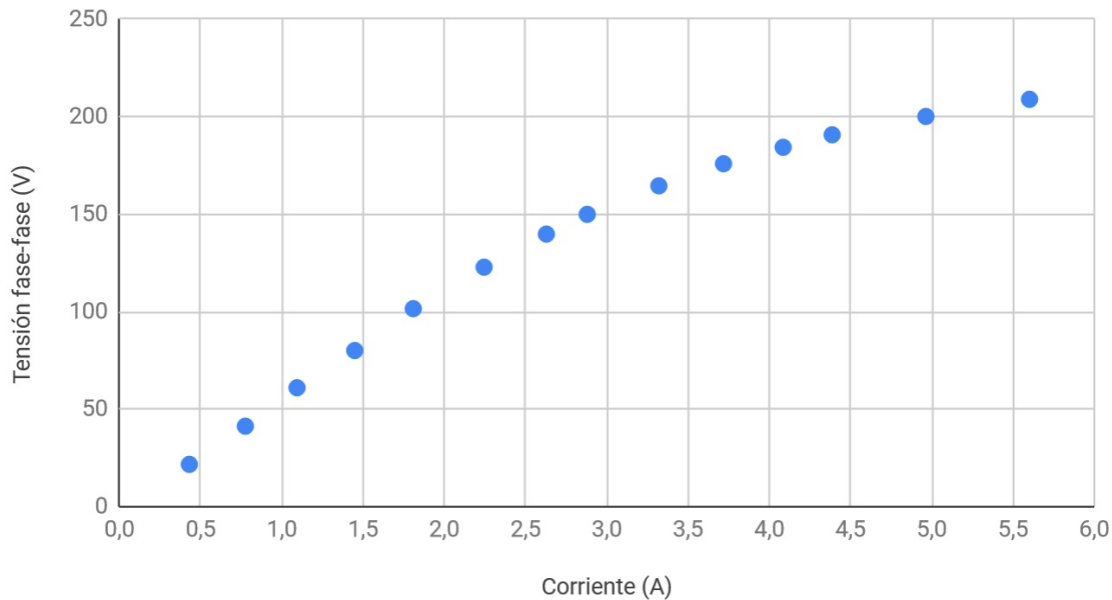


Figura 3.12: Curva de magnetización.

3.3.3. Máquina de corriente continua

La máquina de corriente continua fue utilizada en el Proyecto, tanto para realizar ensayos como el descrito en la sección anterior, como para extraer o entregar potencia

mecánica por el eje de la máquina de inducción. El principal parámetro a medir de esta máquina es la resistencia de armadura, ya que la potencia disipada por la misma debe ser tenida en cuenta al estudiar los flujos de potencia del sistema. Este valor también fue utilizado para calcular las pérdidas mecánicas del sistema a una velocidad determinada.

La medición de las pérdidas mecánicas se realizó haciendo girar el eje de la máquina continua, funcionando como motor, mientras que la máquina de inducción permanecía con su alimentación desconectada. Se midió la potencia consumida por la máquina, la cual sólo tiene los componentes de las pérdidas mecánicas y las eléctricas. A la medida de potencia entrante a la máquina se le resta la potencia calculada de pérdidas Joule en la armadura, obteniendo las pérdidas mecánicas del conjunto de ambas máquinas.

Para medir la resistencia de armadura se utilizó el método voltamperimétrico clásico. Con una fuente de tensión de continua se alimentaron los bornes de la armadura, con el circuito de campo abierto. Se registraron corriente y tensión de armadura.

Al aplicar $\frac{V}{I} = R$, se obtiene la resistencia de forma inmediata. El valor medido fue de $R_A = 2,5 \Omega$.

3.3.4. Instrumentos de medida

Para la realización de la práctica se deben tomar diversas medidas. Se mide corriente del rotor para protección y garantizar que se está lejos de los límites soportados por el variador. El voltaje es necesario medirlo como variable a controlar para diversas pruebas y para realizar el acople de la MIDA. La potencia se debe medir para observar las características del sistema, tanto en el rotor como en el estator.

Analizador de red en el estator

El estator de la MIDA es alimentado por el regulador de inducción a través del panel de control y medida, en el cual se encuentra montado el analizador CVMk2. Con este equipo se registran corriente, tensión y potencia del estator.

Analizador de red en el rotor

Para las medidas del rotor se utilizó el analizador de red AEMC 3945. En este caso, la señal que el equipo debe medir está muy por fuera del rango normal de operación, especialmente en frecuencia, la cual puede variar entre 35 Hz y 65 Hz . Durante el desarrollo del Proyecto, se observó que al salir del rango de 45 Hz a 55 Hz algunas medidas se distorsionan. Fuera del segundo rango mencionado, la tensión entre fases declarada por el instrumento resultaba ser mayor a $\sqrt{3}V$, y la

potencia aparente no concordaba con $\sqrt{P^2 + Q^2}$. Debido a esto, se realizaron pruebas con diferentes equipos tomando las mismas medidas (vatímetros, voltímetros y amperímetros analógicos, multímetros digitales) para determinar cuáles medidas eran confiables.

Las medidas que se ajustaban a la realidad eran la corriente, la tensión fase-neutro, y las potencias activa y reactiva. Probablemente, el método de cálculo de la tensión fase-fase no está pensado para funcionar fuera de esos rangos, y este valor errado es el que distorsiona la medida de potencia aparente ya que coincidía con el valor $S = \sqrt{3}.U.I$. Para valores fuera del rango $35Hz$ y $65Hz$, el equipo ya no realizaba mediciones. Como estas medidas, especialmente la de potencia, son críticas para el estudio del sistema, se definió que la práctica de laboratorio se desarrollará en dos puntos de funcionamiento determinados por el *setpoint* de velocidad del variador, $40Hz$ y $60Hz$.

El instrumento AEMC 3945 presenta estas distorsiones en los rangos de frecuencias porque es un analizador de red, pensado para realizar mediciones a frecuencias de red, $50Hz$ o $60Hz$. Esto depende de la configuración que se elija para el instrumento, pero no está pensado para adquirir datos a una frecuencia variable. Es por esto que ocurren los sucesos anteriormente explicados.

Otros instrumentos de medida

Medida de corriente en el rotor

A modo de garantizar la integridad del variador, se debe medir en todo momento la corriente por el rotor. La relación de transformación genera que el lado del rotor sea el punto de mayor corriente. Como la corriente nominal del variador es la menor comparada con el resto de los equipos, es ésta la que limita la corriente de todo el sistema. Si bien la inductancia del motor funciona como filtro pasabajos, la corriente presenta un contenido armónico apreciable. Para tener una medida estable que facilitara su lectura, se colocó un amperímetro analógico ya que la propia inercia del equipo funciona de filtro pasa-bajos. Por más que los equipos cuentan con protecciones, cuando la corriente supera los $20A$ ⁵ el motor debe ser desacoplado eléctricamente de la red, especialmente durante los fenómenos oscilatorios⁶, para evitar dañar los equipos.

Multímetro Fluke376

El multímetro Fluke376 es utilizado durante la práctica para medir tensión y corriente, tanto en alterna como en continua. En particular, las medidas de tensión de fase en el rotor se realizaron con este equipo. Para medidas de corriente muy pequeñas, este equipo no fue utilizado ya que en general la apreciación del equipo

⁵Se toma este umbral considerando aproximadamente un 15% de margen por debajo de la corriente nominal del variador Danfoss.

⁶Estos fenómenos serán detallados en la sección 5.

resultaba grande comparado con las magnitudes a medir ($0,1\text{ A}$ de resolución contra 5 A de medida). Si bien se puede pasar varias vueltas por la pinza de corriente para obtener mayor resolución, no siempre se puede obtener de esta forma la resolución necesaria para determinadas medidas.

Multímetro Fluke45

Este equipo es sensiblemente más preciso que el anterior, pero menos práctico. En general fue utilizado para realizar medidas de corriente que exigían gran precisión. La mayor precaución que se debe tener con este equipo es la corriente máxima soportada de 10 A .

Tacómetro Testo 465

El tacómetro es utilizado para medir la velocidad en *rpm* del motor. Este equipo es de especial importancia a la hora de sincronizar la MIDA con la red. Tanto para funcionar como motor sub-sincrónico o como generador sub-sincrónico, se utiliza la máquina de continua para hacer girar el motor a la velocidad deseada antes de realizar el acople.

Osciloscopio Gwistek GDS-2062

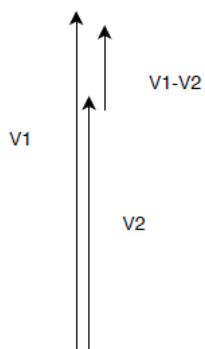
El osciloscopio es la herramienta principal a la hora de sincronizar la MIDA con la red. Para que esto sea lo menos violento posible, se debe regular tanto el módulo de tensión como la fase de la misma. La diferencia de los módulos de las tensiones es el punto menos crítico, ya que si las tensiones están en fase la corriente no hace par⁷.

Como el transitorio es puramente eléctrico, rápidamente se llega a un punto de equilibrio. En la práctica se ha logrado acoplar el sistema con una diferencia de hasta 20 V sin tener picos de corriente demasiado elevados (esta diferencia de tensión es deseable para volver al sistema más estable como será analizado más adelante), de forma que no sea violenta.

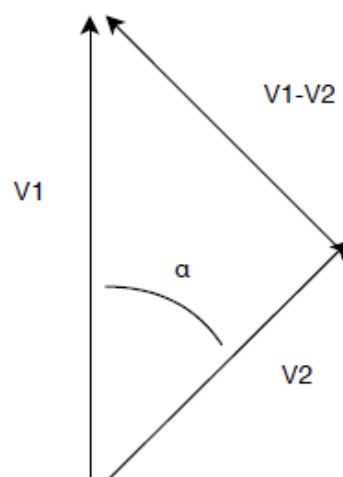
Por otro lado, si se acopla en el momento equivocado y las tensiones tienen una diferencia de fase, se genera un elevado pico de corriente que ejerce par sobre el rotor. Este par genera un movimiento brusco que desfasa aún más los campos⁸ (y con ello las tensiones inducidas aplicadas a la impedancia de cortocircuito) generando un pico de corriente que se mantiene demasiado tiempo, obligando a desacoplar el sistema. En la figura siguiente se esquematizan, a modo ejemplo, los fenómenos mencionados.

⁷Para transmitir potencia a través de una inductancia se necesita defasaje entre los voltajes de sus terminales. Esta característica será estudiada con más detalle en la sección 6.4

⁸Inicialmente el par tiende a poner los campos en fase, pero dada la brusquedad del movimiento el rotor no se detiene en el punto donde las tensiones están en fase.



(a) Sin diferencia de fase.



(b) Con diferencia de fase

Figura 3.13: Variaciones de fase y módulo para sincronización.

Capítulo 4

Modelado

4.1. Modelo estrella equivalente

El modelo eléctrico equivalente de la máquina fue presentado en el capítulo 2. Para obtener los parámetros se realizaron una serie de ensayos, algunos de ellos son los mismos a los que se realizan sobre una MI convencional y otros fueron desarrollados para obtener un modelo más exacto.

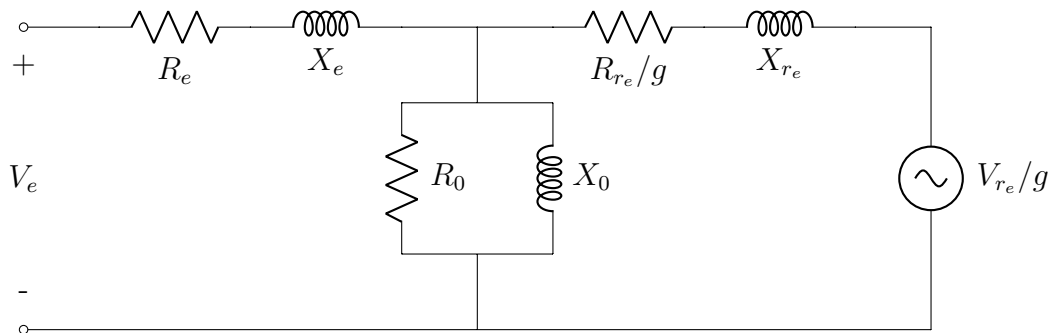


Figura 4.1: Modelo de la MIDA.

4.2. Ensayos

Los valores más sencillos de obtener son las resistencias de los bobinados, las cuales pueden ser medidas de forma directa en corriente continua, desacoplándose de los fenómenos magnéticos. Una vez obtenidos estos valores, resulta sencillo calcular la resistencia de vacío considerando dicha rama en serie. Dejando uno de los dos lados abiertos (estator o rotor) y midiendo la potencia de entrada, se le resta la potencia disipada en la resistencia del bobinado respectivo y se obtiene la potencia disipada en la rama de magnetización. Como no se cuenta con el valor de la impedancia, y por lo tanto no se tiene el valor del voltaje sobre esta rama, es inmediato utilizar el valor de la corriente para calcular la resistencia del modelo considerando la rama de vacío en serie.

Estudiar la magnetización de la máquina es de interés para este proyecto, ya que se desea medir como se reparte el aporte de las fuentes conectadas al estator y rotor. Para esto resulta necesario obtener todos los parámetros de manera independiente. En el diseño de los ensayos se utilizó la simplificación de despreciar la corriente de magnetización con respecto a la total entrante al estator de la máquina solo en el ensayo de rotor bloqueado, donde se consideró que toda la reactiva consumida por la máquina se debía exclusivamente a las impedancias de cortocircuito de los bobinados. Esta aproximación indujo error en los parámetros calculados, pero redujo en gran medida los cálculos al tener valor de $X_e + X_{r_e}$. Luego para independizar los valores, X_e y X_{r_e} por separado, se debió diseñar dos ensayos, llamados “rotor abierto” y “estator abierto”, de forma de poder obtener $X_e + X_0$ y $X_{r_e} + X_0$. Teniendo estos tres valores, se pueden obtener todos de forma independiente, resolviendo el sistema de ecuaciones.

En los ensayos de rotor y estator abierto, se abre uno de los dos circuitos de alimentación de la máquina y se alimenta por el otro. Midiendo la reactiva, con el rotor abierto se calcula el valor $X_{e0} = X_e + X_0$, y con el estator abierto $X_{r_e0} = X_{r_e} + X_0$. Luego, en el ensayo de rotor bloqueado se desprecia la potencia reactiva consumida por la rama de magnetización y se obtiene el valor de $X_{r_{ee}} = X_{r_e} + X_e$. En este punto se cuenta con tres incógnitas (X_e , X_0 y X_{r_e})¹, y tres ecuaciones (las obtenidas de los tres ensayos, mencionadas anteriormente). Al resolver el sistema se obtienen los tres valores por separado. El punto crítico de estos ensayos es garantizar que la máquina se encuentre magnetizada de igual manera al realizar los ensayos de rotor y estator abierto.

En un principio se realizó el ensayo de rotor abierto, en el cual se midió además la tensión inducida en el rotor. Luego, se realizó el ensayo de estator abierto aplicando en el rotor la tensión medida en el ensayo anterior. En teoría este procedimiento debería garantizar que el punto de magnetización de la máquina es el mismo para ambos ensayos, pero al resolver el sistema de ecuaciones se obtuvieron valores de impedancias negativas, lo que claramente muestra una falla en la obtención de los parámetros. Esto se debe simplemente a que la hipótesis que se manejó para resolver las ecuaciones no se cumplió, la cual es que en ambos casos se debe tener el mismo punto de magnetización de la máquina. Esto no se cumple debido a la caída de tensión de las impedancias de cortocircuito que hacen que para generar la misma tensión inducida en los ensayos se necesite distintos puntos de magnetización.

Luego de analizar el sistema se optó por el siguiente método: se realiza el ensayo de rotor abierto y se calcula la potencia activa disipada por la rama de magnetización, luego se regula la tensión del ensayo de estator abierto para que la rama de vacío consuma la misma potencia que en el ensayo anterior. Esto garantiza que el punto de magnetización de la máquina es el mismo ya que la rama de magnetización consume la misma potencia en ambos casos, X_0 es igual en ambos casos debido a que los niveles de tensión son similares, y todos los ensayos se realizan a 50 Hz.

¹Los valores se miden desde el rotor, pero deben pasarse a nivel de tensión del rotor para resolver el sistema de ecuaciones.

Con este procedimiento se obtuvieron resultados satisfactorios.

4.2.1. Resistencia de bobinados

Para medir estas resistencias se utilizó el método voltamperimétrico. Dado que la resistencia varía con la temperatura, las medidas de resistencia se realizaron luego de dejar el motor operando por varios minutos de forma que todos los bobinados alcanzaran la temperatura de operación. La resistencia de los bobinados del estator se midió en cada bobina, colocando una fuente de tensión en bornes de cada una y midiendo la tensión con el Fluke 45 y la corriente con el Fluke 376. La tensión fue aplicada con una fuente DC presente en el laboratorio, cuidando de aplicar un valor bajo dado que la resistencia de los bobinados es pequeña. Con esta fuente se puede incrementar la tensión a pasos de aproximadamente $0,1\text{ mV}$.

Bobinado E1			Bobinado E2			Bobinado E3		
V_e (mV)	I_e (A)	R_e (Ω)	V_e (mV)	I_e (A)	R_e (Ω)	V_e (mV)	I_e (A)	R_e (Ω)
279,1	0,95	0,29	283,2	0,90	0,31	285,2	0,90	0,32
420	1,40	0,30	419	1,33	0,32	407	1,28	0,32
547	1,80	0,30	547	1,73	0,32	545	1,80	0,30
681	2,18	0,31	678	2,13	0,32	672	2,18	0,31
	R_{e1}	0,30		R_{e2}	0,32		R_{e3}	0,31

Tabla 4.1: Ensayos resistencia del bobinado del estator.

Para el modelo se utilizó el promedio de los tres valores, por lo tanto $R_e = 0,31\Omega$. Como la resistencia se midió por bobinado y el estator se conectó en estrella, el valor del modelo es directamente el valor medido.

Para la medida de resistencia del rotor, se realizó el mismo procedimiento. Como el conexionado del rotor es interno en estrella con neutro no accesible, se debió medir la resistencia entre fases.

Bobinado R1R2			Bobinado R2R3			Bobinado R3R1		
$V_{R_1R_2}$ (mV)	$I_{R_1R_2}$ (A)	$R_{R_1R_2}$ (Ω)	$V_{R_2R_3}$ (mV)	$I_{R_2R_3}$ (A)	$R_{R_2R_3}$ (Ω)	$V_{R_3R_1}$ (mV)	$I_{R_3R_1}$ (A)	R_e (Ω)
690	0,88	0,79	502	0,83	0,61	548	0,88	0,63
790	1,33	0,60	820	1,28	0,64	767	1,30	0,59
969	1,73	0,56	892	1,73	0,52	937	1,73	0,54
1015	2,13	0,48	971	2,13	0,46	1150	2,10	0,55
	$R_{R_1R_2}$	0,61		$R_{R_2R_3}$	0,56		$R_{R_3R_1}$	0,58

Tabla 4.2: Resistencia bobinados del rotor.

En base a los valores de la tabla 4.2, se calcula el valor medio de resistencia entre fases: $R_{r_{fase}} = 0,58\Omega$. A partir de este valor, basta con dividirlo entre 2 para

obtener el correspondiente al modelo, teniendo así $R_r = 0,29 \Omega$.

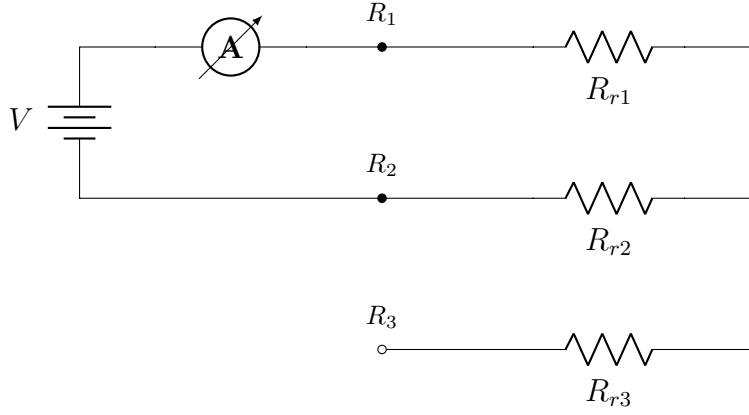


Figura 4.2: Medición de resistencia en rotor.

4.2.2. Medición impedancias de cortocircuito y de vacío

En primer lugar se realizó el ensayo a rotor abierto, alimentando la MIDA por el estator a través del regulador de inducción. En este caso, dado que no hay movimiento, la máquina se comporta simplemente como un transformador en vacío, sin corriente por la rama del rotor. Por lo tanto se tiene:

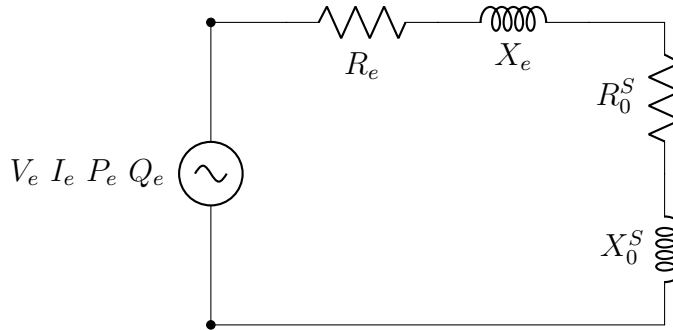


Figura 4.3: Circuito de ensayo a rotor abierto.

Del sistema presentado, se obtienen las ecuaciones mostradas en la ecuación 4.1, donde los supra-índices “S”, indican que se considera la rama de vacío en serie:

$$\begin{cases} \frac{P_e}{3I_e^2} = R_e + R_0^S \\ \frac{Q_e}{3I_e^2} = X_e + X_0^S \end{cases} \quad (4.1)$$

Con el analizador de red CVMk2 se registró: tensión entre fases, corriente por cada fase, potencias activa y reactiva totales.

Luego se alimentó la MIDA a través del rotor, manteniendo el estator abierto. Nuevamente la máquina se comporta simplemente como un transformador, y en este

caso, sin corriente por la rama del estator. De esta manera se tiene:

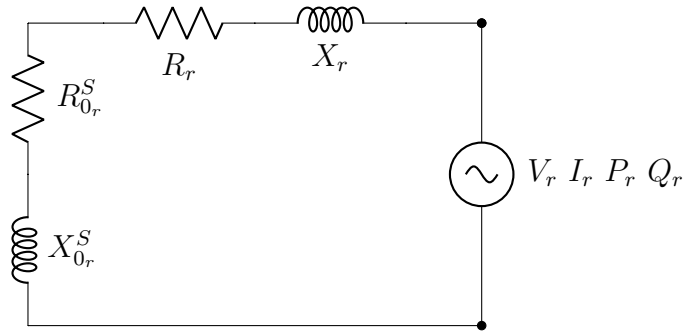


Figura 4.4: Circuito de ensayo a estator abierto.

De lo cual se tiene, de manera similar al caso anterior, las expresiones representadas en la ecuación 4.2, donde los sub-índices “r” indican que se consideran los valores a nivel de tensión del rotor.

$$\begin{cases} \frac{P_2}{3I_2^2} &= R_r + R_{0_r}^S \\ \frac{Q_2}{3I_2^2} &= X_r + X_{0_r}^S \end{cases} \quad (4.2)$$

Para garantizar que la magnetización de la máquina fuera la misma en los dos ensayos, la tensión del ensayo de estator abierto se reguló para que la potencia consumida por la rama de magnetización fuera la misma. En cada ensayo la potencia consumida por la rama magnetizante se calcula como la resta entre la potencia entrante a la máquina y las pérdidas Joule del bobinado.

Las mediciones se presentan en la tabla a continuación:

	U_{12} (V)	U_{23} (V)	U_{31} (V)	I_1 (A)	I_2 (A)	I_3 (A)	$P_{e total}$ (W)	$Q_{e total}$ (W)	$I_{prom.}$	P_{Rcc} (W)	P_{R0} (W)	$R_{0_e}(\Omega)$	$R_{0_r}(\Omega)$
Rotor abierto	81,5	81,3	81,7	0,859	0,853	0,855	23	118	0,86	0,23	7,43	10,15	2,44
Estator abierto	40,6	40,5	40,9	1,767	1,755	1,761	26	120	1,76	0,90	7,77	10,43	2,50

Tabla 4.3: Ensayos de rotor y estator abierto.

Por último, se realizó el ensayo de rotor bloqueado. Cortocircuitando los bornes del rotor, bloqueando el rotor para que no gire y alimentando el estator con el regulador de inducción, se llevó la MIDA hasta su corriente nominal.

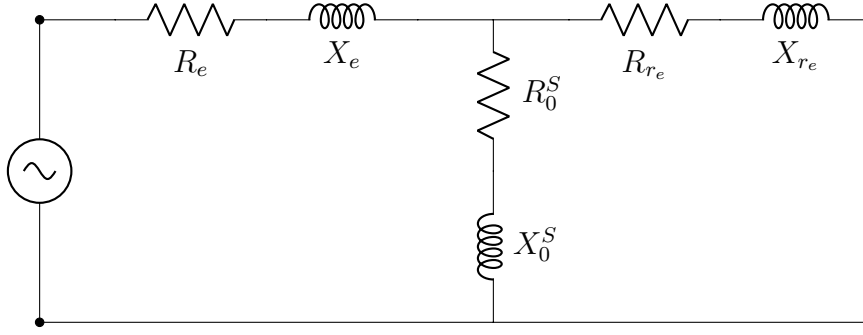


Figura 4.5: Circuito de ensayo de rotor bloqueado.

Dado que este ensayo se hace a una fracción de la tensión nominal, se desprecia la potencia consumida por la rama de magnetizante. De esta manera se obtiene el circuito a continuación.

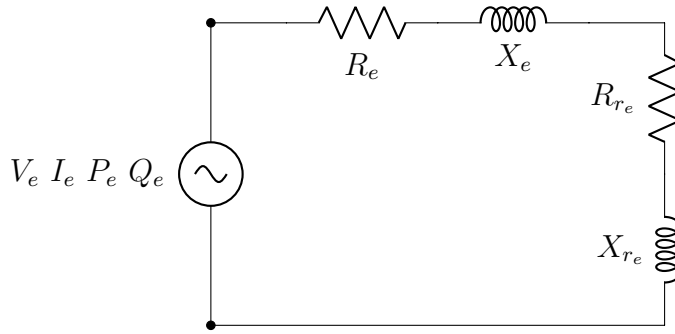


Figura 4.6: Simplificación en ensayo a rotor bloqueado.

De este sistema se tienen las expresiones mostradas en la ecuación 4.3, análogas a los casos anteriores:

$$\begin{cases} \frac{P_3}{3.I_3^2} = R_e + R_{re} \\ \frac{Q_3}{3.I_3^2} = X_e + X_{re} \end{cases} \quad (4.3)$$

Los resultados del ensayo son los siguientes:

V_1 (V)	V_2 (V)	V_3 (V)	I_{1e} (A)	I_{2e} (A)	I_{3e} (A)	P_1 (kW)	P_2 (kW)	P_3 (kW)	V_{prom} (V)	$I_{e prom}$ (A)	S_{fase} (VA)	P_{fase} (W)	Q_{fase} (VAr)
57,6	57,1	58,8	17,0	16,9	16,8	0,314	0,322	0,346	57,8	16,9	977,1	327,3	920,6

Tabla 4.4: Ensayo de rotor bloqueado.

De las tablas 4.3 y 4.4, utilizando las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3, se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones.

$$\begin{cases} X_e + X_0^S = \frac{Q_1}{3I_1^2} \\ X_{re} + X_0^S = \frac{Q_2}{3I_2^2} \\ X_e + X_{re} = \frac{Q_3}{3I_3^2} \end{cases} \quad (4.4)$$

Resolviendo este sistema, se tiene que $X_e = 1,62 \Omega$, $X_{r_e} = 1,61 \Omega$, $R_0^s = 10,15 \Omega$ y $X_0^s = 52,11 \Omega$. Realizando la transformación para las impedancias de vacío de modelo serie al modelo paralelo, los valores finales son $R_0 = 277,6 \Omega$ y $X_0 = 54,1 \Omega$.

4.3. Modelo

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos y presentados en las secciones previas, se tienen los siguientes valores² para el modelo de la máquina de inducción doblemente alimentada (figura 4.1):

- $R_0 = 277,6 \Omega$
- $X_0 = 54,1 \Omega$
- $R_e = 0,31 \Omega$
- $X_e = 1,62 \Omega$
- $R_{r_e} = 1,21 \Omega$
- $X_{r_e} = 1,61 \Omega$

²Los parámetros del rotor son a nivel de tensión del estator.

Capítulo 5

Armado del sistema

5.1. Prueba de la MIDA

5.1.1. Primeros acoples

Habiendo estudiado las distintas formas de regulación de las tensiones, configurado el variador y armado el sistema, se procedió a realizar la sincronización y acople del estator con la red. La regulación de voltaje se hizo de forma tal que la tensión inducida en el estator a través del rotor con el *setpoint* del variador en 50 Hz fuera igual que la tensión impuesta por el regulador de inducción.

Teniendo el sistema acoplado, las primeras pruebas consistieron en variar el *setpoint* de frecuencia del variador y verificar la ecuación:

$$\omega_e = \omega_r + \Omega_m \cdot p \quad (5.1)$$

Se disminuyó el *setpoint* del variador generando gradualmente una diferencia entre las frecuencias de los campos, por lo que el rotor de la máquina comenzó a girar. Se continuó con la disminución hasta que el rotor de la máquina girara sin frenarse para que el rozamiento comenzara a tener un comportamiento lineal. Una vez hecho esto, pudo comprobarse la ecuación anterior midiendo la velocidad del rotor con el tacómetro.

Fue en esta primera instancia que se observó un fenómeno que no concordaba completamente con el material teórico estudiado¹. Como se vio en el capítulo 2, la ecuación que aproxima la repartición de potencias entre el estator y el rotor para un motor sub-sincrónico es:

$$P_r = -g \cdot P_e \quad (5.2)$$

El sentido de las potencias está definido según el diagrama de la figura 5.1.

¹Material Teórico del curso Máquinas Eléctricas, Facultad de Ingeniería, UdelaR

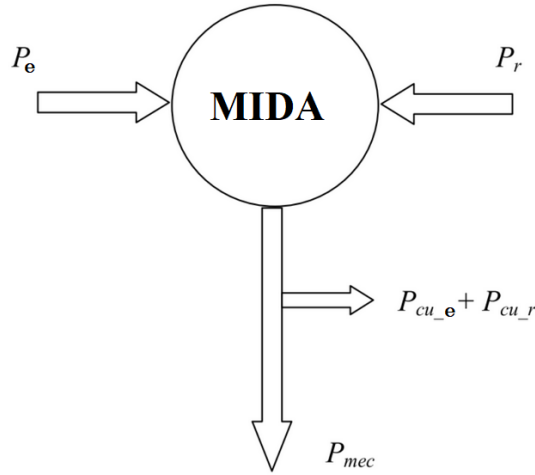


Figura 5.1: Sentido de las potencias utilizado en el modelo.

En el material se asume que esto implica que para el sistema funcionando como un motor sub-sincrónico, la potencia por el estator es positiva y por el rotor negativa. Durante el primer acople se observó que el sentido de las potencias se podía invertir llevando el *setpoint* del variador por encima o por debajo de 50 Hz . Modificar el *setpoint* en un entorno de los 50 Hz , significa que g variará en un entorno cercano de 1, por lo cual no habría motivo según la ecuación 5.2 para que se invierta el flujo de potencia. En el caso de los generadores eólicos el sentido de giro es único, mientras que en la MIDA para poder invertir el flujo de potencia, debe cambiarse el sentido de giro. Como esto no es posible en el caso de los generadores, se estima que esta es la razón por la cual la posibilidad de potencia entrante por el rotor, para motores sub-sincrónicos, no fue contemplada.

El primer acople se realizó con el *setpoint* en 50 Hz y el rotor detenido. En este punto el deslizamiento es $g = 1$ y las potencias prácticamente nulas, solo se alimentan las pérdidas eléctricas. Como en este caso no es posible despreciar las pérdidas, no se cumple la ecuación 5.2. Durante esta primera prueba se observó que al disminuir el *setpoint* del variador ($g < 1$) la potencia era entrante por el estator y saliente por el rotor, lo cual está acorde al material teórico.

El variador no puede recibir potencia² ya que el único lugar a donde puede ir es a los capacitores de bus de continua, aumentando el voltaje del mismo³. Por esta razón, instintivamente se llevó el *setpoint* del variador por encima de 50 Hz ($g > 1$) y se obtuvo un resultado inesperado: se invirtió el sentido de las potencias. La potencia se volvió positiva por el rotor y negativa por el estator, es decir, saliente por el variador y entrante a la red, mientras el punto de funcionamiento seguía siendo un motor sub-sincrónico porque la velocidad de giro era 85 rpm saliendo potencia

²Para poder recibir potencia debe conectarse una resistencia de frenado. En el capítulo 8.2 se detalla este tema.

³Para evitar el daño del equipo por sobre tensión en el bus de continua, los variadores cuentan con una protección interna que desconecta la salida en caso de superar el umbral programado.

mecánica por el eje.

Más adelante se observó el mismo comportamiento para el generador sub-sincrónico, en ambos puntos de funcionamiento se puede cambiar del cuadrante $[P_e < 0; P_r > 0]$ al cuadrante $[P_e > 0; P_r < 0]$, invirtiendo el sentido de giro del rotor, manteniendo el mismo punto de funcionamiento. Observando la figura 5.1, sabiendo que los sentidos de las potencias son opuestos y que en $g = 1$ las potencias deben ser iguales se puede deducir la razón por la cual $g = 1$ es el punto de inflexión. Como el rotor siempre “corrige” su posición para que los campos magnéticos estén alineados y no haya par, las tensiones siempre están en fase. Si las tensiones están en fase, no puede haber intercambio de potencia a través de la inductancia serie de la máquina, por lo que el intercambio de potencia activa entre el rotor y estator debe ser 0. Cuando $g < 1$, la potencia del rotor es menor que la del estator y como parte de la potencia tiene que salir por el eje, es inmediato ver que la potencia por el estator tiene que ser entrante a la máquina: parte de esa potencia es entregada por el eje y la otra fluye hacia el circuito de alimentación del rotor. Cuando $g > 1$, la potencia por el rotor es mayor y el razonamiento es análogo.

5.1.2. Comportamiento oscilatorio

Una vez realizado el primer acople, se varió el *setpoint* del variador aumentando la velocidad de la máquina. Es aquí que se encontró un fenómeno inesperado: a medida que aumenta la velocidad, el sistema se vuelve cada vez más oscilatorio. Cuando se llevó el sistema hasta los 150 rpm aproximadamente, los picos de corriente debidos a la oscilación superaban los valores soportados por los equipos y se debió desacoplar el sistema. En teoría el sistema debería ser estable, pero en la práctica es tan susceptible a las variaciones de las alimentaciones que se vuelve inoperable. Además, al aumentar el *setpoint* del variador se generaban oscilaciones, por lo que el aumento de velocidad debía hacerse muy lentamente (de a 0,1 Hz cada unos 3 segundos). En una primera instancia, se supuso que la diferencia entre las curvas $V(f)$ del variador y la inducida al rotor desde el estator era responsable por hacer la oscilación tan brusca. El siguiente paso fue modificar la configuración del variador de forma que las pendientes de las curvas coincidieran.

La ecuación de la tensión del estator vista desde el rotor es:

$$\begin{cases} V_{er}(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot V_e \cdot g}{n} \cdot \text{sen}(g \cdot w_e \cdot t + \phi) \\ g = \frac{f_r}{f_e} \end{cases}$$

$$\Rightarrow V_{er}(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot V_e \cdot f_r}{n \cdot f_e} \cdot \text{sen}(w_r \cdot t + \phi) \quad (5.3)$$

Por lo tanto, conociendo el valor de n y V_e , se ajustó la pendiente de la curva $V(f)$ del variador a $\frac{V_e}{n \cdot f_e}$ y se subió el parámetro *Start Voltage*, de forma tal que al momento de acoplar, la tensión inducida y la impuesta por el variador fueran iguales. Opuestamente a lo esperado, cuando se realizó el acople, el resultado obtenido fue que al llegar a los 100 rpm aproximadamente el sistema se volvía inestable.

La explicación de este fenómeno es que al emparejar las curvas, se tiene la configuración de corriente mínima (se igualan dos tensiones en bornes de la impedancia de cortocircuito, generando diferencia de potencial solo mediante el desfase). Como el par es proporcional a la corriente, para la misma perturbación de velocidad mecánica, la corriente era menor y por lo tanto la velocidad de respuesta del sistema también lo era, impidiendo que éste corrigiera la perturbación y volviéndolo inestable a menores velocidades.

Por otro lado, si se modificaba la pendiente de modo que las curvas difirieran demasiado, ante una pequeña perturbación la diferencia de potencial en la impedancia era demasiado grande y la amplitud de la oscilación de corriente era tal que sobrepasaba los límites permitidos por el variador.

En base a estas observaciones, se definió buscar de forma experimental la configuración de máxima estabilidad. Para hallar este punto, se partió de la configuración en que las dos curvas V/f eran iguales, se modificaba la pendiente de la curva manteniendo los módulos de las tensiones iguales al acoplar, y se llevaba la máquina a la mayor velocidad posible para cada caso. El mismo ensayo se repitió manteniendo ambas pendientes iguales pero variando la tensión a la que se realizaba el acople.

Voltaje trafo (f-n)	V/f	Start voltage	Voltaje inducido en estator pre acople (V)	Límite de estabilidad [Setpoint de Vdf] (Hz)
37,1	0,63	14	37,6	51,5
37,1	0,63	12	35,6	51,3
37,1	0,63	10	33,6	51,5
37,1	0,63	8	31,6	51,4
37,1	0,63	20	43,6	56
37,1	0,63	24	47,6	57,8
37,1	0,63	28	51,6	57
-	-	-	-	-
37,1	0,85	7	37,1	65,5
37,1	0,95	7	39,3	65,5
37,1	1,1	7	42,1	63,2

Tabla 5.1: Pruebas de configuración de máxima estabilidad.

La configuración utilizada desde esta prueba en adelante fue $f_n = 50$, $V/f = 0,85$, *Start Voltage* = 7. Este punto resultó en la mayor estabilidad del sistema ya que la respuesta del mismo era lo suficientemente rápida, sin que los picos de corriente de las oscilaciones fueran demasiado grandes para los equipos.

5.1.3. Pruebas con carga

Dado que la configuración hallada permitía un rango de operación de $\pm 15 Hz$, lo cual resultaba aceptable, se pasó a realizar pruebas con carga. Para esto, se colocó una fuente de corriente continua alimentando el campo de la máquina de continua y en la armadura se colocó un banco de resistencias. Al hacer girar la máquina de

continua con campo, ésta genera voltaje que se aplica sobre la resistencia, disipando potencia en forma de calor. Para el mismo campo, cuanto más velocidad más voltaje, y por lo tanto mayor potencia disipada.

El principal efecto detectado al conectar la carga fue que la MIDA se estabilizaba. Si bien las oscilaciones se habían reducido mediante configuración, las mismas seguían presentes, exigiendo atención para desconectar el sistema en caso de que el motor se embalara.

Al conectar la carga se redujeron la amplitud de las oscilaciones y la frecuencia en la que el sistema se desestabilizaba completamente. Con la carga conectada era posible llevar el sistema a más de 70 Hz. La estabilización del sistema por parte de la carga se debe a que partiendo de un punto de estable, si el motor acelera aumenta la tensión generada por la máquina de continua, aumentando la potencia entregada a la carga y por lo tanto elevando también el par resistivo. Este aumento de par tiende a frenar la máquina, forzando a la máquina a volver al punto de equilibrio. De la misma forma, al frenarse la máquina, disminuye la potencia entregada a la carga y con ésta disminuye el par resistivo, haciendo acelerar al motor.

A continuación se presenta una ilustración donde se puede observar de manera gráfica lo explicado.

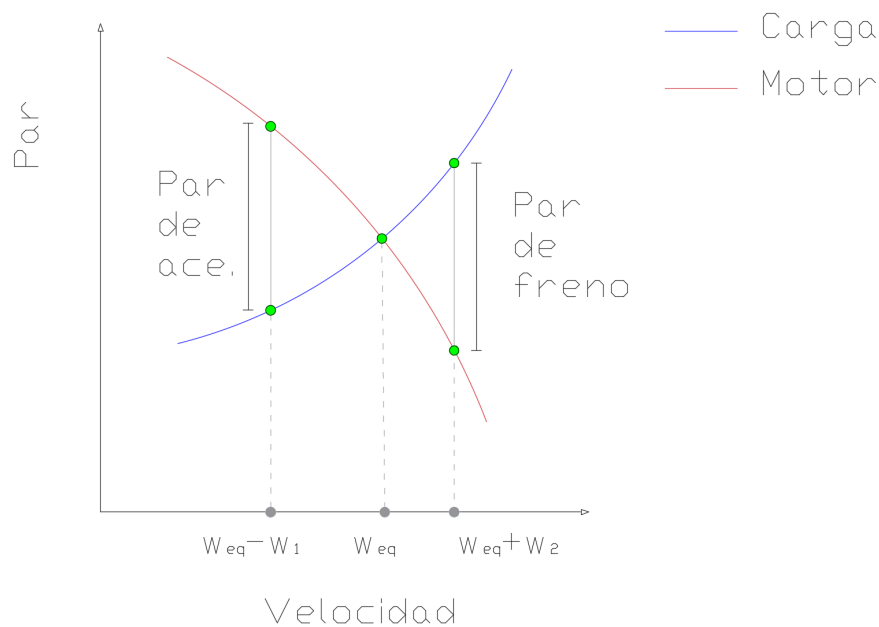


Figura 5.2: Perturbación en torno a una velocidad de equilibrio.

Otro efecto que se observó fue que al tomar una pequeña carga, la potencia tanto del estator como del rotor pasaba a ser mucho mayor. Para poder entregarle 20 W a la carga, la potencia activa por el rotor aumentaba de 70 W a 200 W. Esto se debe a las pérdidas Joule. Para aumentar la potencia entregada debía aumentar la

corriente, debido a que la tensión a la cual se encuentra sometida la máquina no varía. Como la tensión de funcionamiento de la máquina era un cuarto de la tensión nominal de la máquina, para entregarle más potencia crecía la corriente y a su vez las pérdidas empeorando la eficiencia. Por lo tanto para la misma potencia entregada, si se hubiera aumentado la tensión en vez de la corriente de la máquina, la eficiencia aumentaría en vez de disminuir, por lo tanto en este caso se utilizaba la máquina muy lejos de su condición nominal.

Durante el transcurso de estas pruebas se notó que aumentar el *setpoint* de velocidad cuando la corriente decrecía, estabilizaba el sistema. Del mismo modo, disminuir el *setpoint* con la corriente aumentando tenía el mismo efecto. Esta característica de funcionamiento ayudó al entendimiento de la causa de la oscilación y fundó la base del desarrollo de una estrategia de control para estabilizar el sistema.

Controlar el sistema es fundamental por razones de seguridad. Poder acoplar el sistema y no tener que estar constantemente pendientes de las eventuales oscilaciones que pudieran dañar los equipos, era deseable tanto para el Proyecto como para el futuro desarrollo de la práctica de laboratorio por parte de los estudiantes. Además, resultaba imposible realizar mediciones porque el sistema rara vez se encontraba estable. La explicación detallada del fenómeno físico de las oscilaciones se presenta en el capítulo 6.

Sistema de control

El sistema cuenta con 2 variables que se pueden medir para detectar las oscilaciones: la velocidad y la corriente. La variable de control con la que se cuenta es el *setpoint* del variador.

Se optó por implementar el sistema de control con una placa Arduino Leonardo por su facilidad de uso. Además, como el equipamiento debía quedar en el LME, el bajo costo y la disponibilidad en el mercado (para reposición en caso de rotura) fueron factores que influyeron en la decisión.

Para la medida de velocidad se utilizó el tacómetro marca Omron, modelo E6B2-CWZ3E, con una resolución de 100 P/R (emite 100 pulsos por cada vuelta), que se encuentra acoplado al eje de la máquina de continua.

Dado que el sistema trabaja a lo sumo a 10 Hz (300 rpm), la frecuencia de muestreo de 16 kHz de la placa es más que suficiente para muestrear el tren de pulsos de menos de 1 kHz generado por el tacómetro. Para obtener esta información basta con alimentar el tacómetro desde la salida de $V_{CC} = 5\text{ V}$ de la Arduino y conectar la salida del tacómetro a una entrada digital de la placa.



Figura 5.3: Tacómetro Omron.

Para la medida de corriente se utilizó un transformador de corriente de núcleo partido, marca Echun, modelo ECS1030-L72, con una relación de vueltas de 2000 : 1. Para poder adquirir la medida con la Arduino se usó un conector jack y utilizó el circuito mostrado en 5.4b, donde se lo nombra como CT_{SENSOR} .

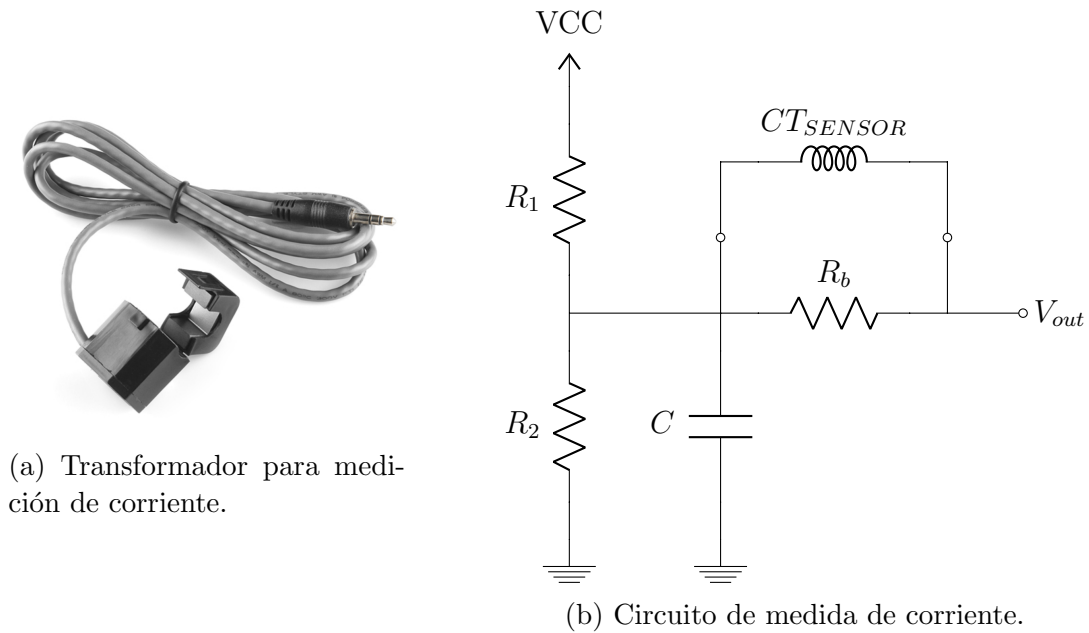


Figura 5.4: Medición de corriente - Sistema de control.

Utilizando el circuito mostrado en la figura 5.4 se puede realizar la medida de corriente alterna con la Arduino, del estator como el rotor en cualquier punto de funcionamiento. Como la entrada analógica de la Arduino tiene una impedancia muy grande, se puede considerar que la corriente del secundario del transformador solo circula través de la resistencia R_b . De esta manera se tiene:

$$V_{out} = \frac{V_{CC} \cdot R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} + I_{medida} \cdot n \cdot R_b \quad (5.4)$$

Luego, tomando como entrada V_{out} y conociendo el valor de las resistencias, es posible calcular I_{medida} .

El valor de los componentes debe ser elegido teniendo en cuenta las magnitudes de las corrientes a medir. Las resistencias R_1 y R_2 deben ser del mismo valor para polarizar el punto del medio en $V_{CC}/2^4$ y contar con el mayor rango posible. El valor de estas resistencias debe ser elevado para poder despreciar la corriente que circula por ellas. El capacitor sirve para estabilizar la tensión de este punto y su valor es recomendado por el fabricante del transformador. Como las entradas de la placa no están protegidas contra tensiones inversas, aplicar una tensión negativa sobre ésta puede dañar la placa. Entonces, se debe dimensionar R_b de forma que esto no suceda, por lo que se debe cumplir:

$$V_{in} = \frac{\sqrt{2}I_{RMS}}{n} \cdot R_b < \frac{V_{CC}}{2} \quad (5.5)$$

Considerando que la corriente nominal del variador es 27 A y $V_{CC} = 5\text{ V}$, se determinó utilizar los siguientes valores de componentes:

- $R_1 = 470\text{ k}\Omega$
- $R_2 = 470\text{ k}\Omega$
- $R_b = 100\text{ }\Omega$
- $C_1 = 10\text{ }\mu\text{F}$

Como se puede comprobar, para el valor de R_b elegido y considerando que la máxima corriente que admite el variador es de 27 A , la tensión en R_b no puede superar los $1,35\text{ V}$ en un rango de operación de $2,5\text{ V}$. De esta manera, se cumple con las condiciones teniendo además un 46% de margen de seguridad.

Una vez diseñado el circuito, se procedió a sintonizarlo para tener la mejor medida posible. El valor de la resistencia de medida R_b se determinó con el método voltamperimétrico. El valor obtenido fue de $100,3\text{ }\Omega$. Luego, se conectó la salida del circuito a la entrada de la Arduino con el transformador desconectado y se tomó el valor medido como el 0 A del circuito. Esto se debe hacer ya que R_1 y R_2 no son exactamente iguales, por lo que el punto medio no será perfectamente $2,5\text{ V}$.

El circuito se ensayó midiendo la alimentación del regulador de inducción y comparándola con la lectura del multímetro Fluke376. Se obtuvieron valores de $16,7\text{ A}$ y $17,2\text{ A}$ respectivamente. Como se puede notar, las medidas difieren tan solo en un 3% , lo que se consideró satisfactorio.

⁴ V_{CC} es la tensión continua que aplica la arduino para alimentar el circuito de medida

Una vez que se tuvieron los dos instrumentos prontos para realizar las medidas, se acopló el sistema, se conectó la carga y se midieron ambas magnitudes en simultaneo. Un ejemplo de estas medidas se presenta en la siguiente figura.

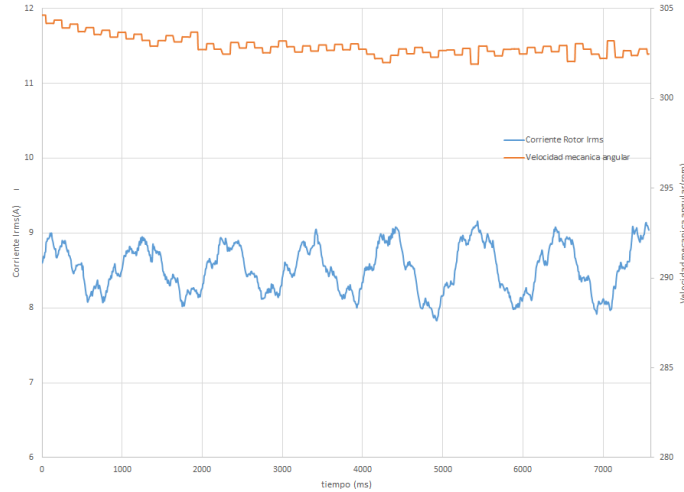


Figura 5.5: Medidas de velocidad y I_{RMS} -setpoint60 Hz.

Es claro que la variable más sensible a las oscilaciones es la corriente, por lo que se la eligió como el parámetro en base al cual el sistema de control debía actuar. Además, para eliminar el ruido de alta frecuencia de la medida de corriente, se definió que el programa debía calcular la corriente RMS y no trabajar directamente con la medida de corriente instantánea. Esto presenta 3 ventajas, primero que es más fácil de verificar la medida si el programa entrega directamente la corriente RMS como la mayoría de los equipos. Segundo, la Arduino debe graficar menos puntos, ya que escribe un punto cada un varias de medidas, aumentando el rendimiento del programa (graficar un punto enlentece el ciclo de la Arduino). Tercero, y más importante, como este cálculo implica realizar una integral, funciona como un filtro digital del ruido de alta frecuencia.

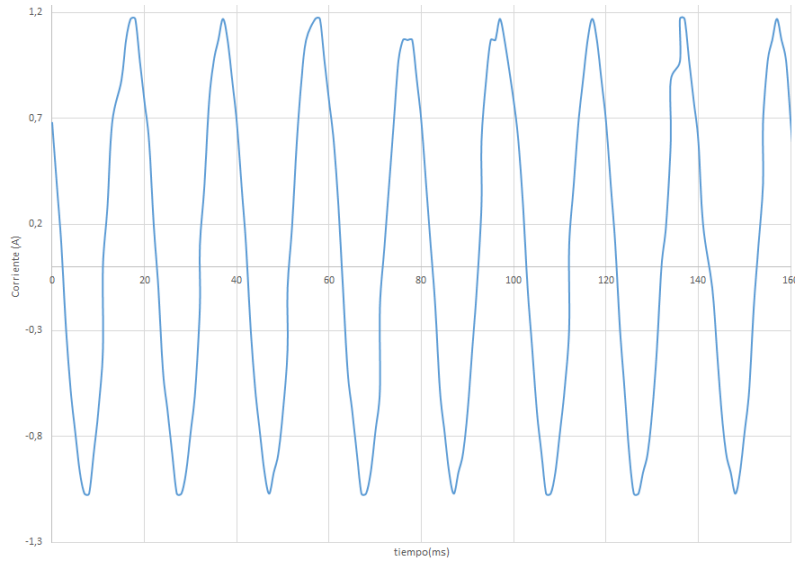


Figura 5.6: Medida de corriente del estator.

La figura 5.6 muestra una medición de corriente instantánea con el sistema estable. En esta figura se puede apreciar que con este circuito de medida es posible graficar la forma de onda, pudiéndose medir incluso la frecuencia de 50 Hz de la red.

Como fue explicado previamente, ante una variación de frecuencia en el rotor, el sistema se vuelve inestable. Esta inestabilidad puede observarse en la figura 5.7. En dicha figura se observa la corriente sinusoidal del rotor, la cual mantiene la misma frecuencia de la fuente aunque se observe un incremento y decremento de corriente. Este suceso está asociado con la oscilación que se explicará más adelante en el capítulo 6.

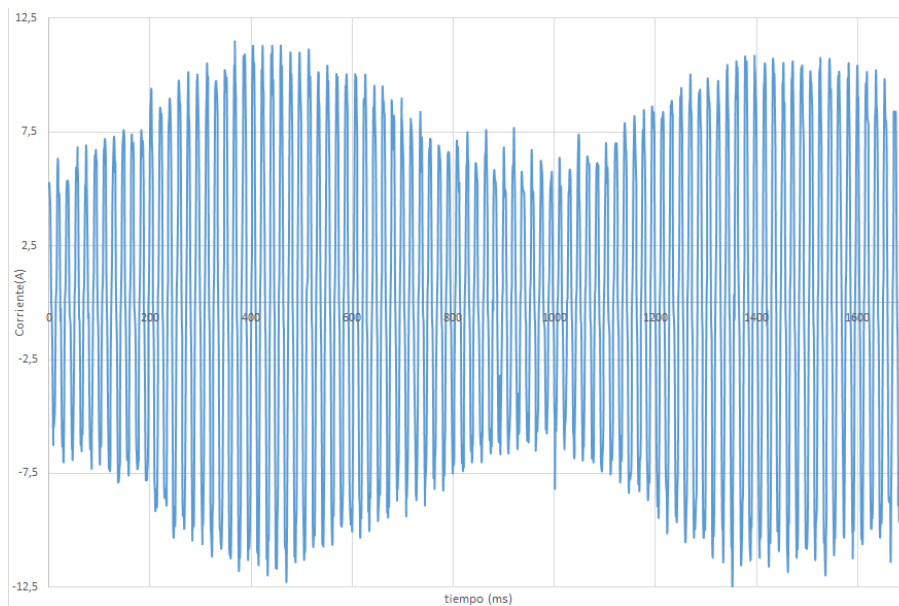


Figura 5.7: Medida de corriente con el sistema inestable.

Para el cálculo del valor I_{RMS} se detectan los cruces por cero de la corriente instantánea. A partir de estos puntos se calcula la integral discreta entre dos cruces por cero. De esta manera se logra reducir el tiempo de cálculo del valor I_{RMS} , tomando medio período de la corriente y multiplicando por 2 el valor obtenido. Dada una cantidad de muestras N entre dos cruces por cero, se calcula el valor I_{RMS} según:

$$I_{rms} = 2 \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^N I_k^2} \quad (5.6)$$

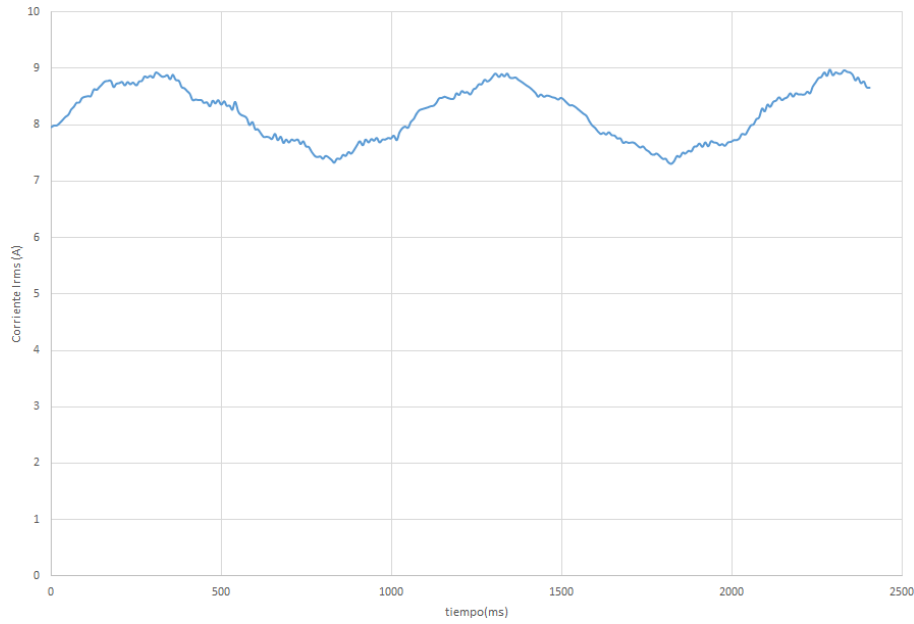


Figura 5.8: Corriente I_{RMS} .

En la figura 5.8 se puede apreciar la forma de onda de la corriente RMS calculada. En ella se puede observar la oscilación de corriente.

La estrategia de control se basó en la siguiente observación: si se aumentaba el *setpoint* del variador con la corriente disminuyendo, o si se disminuía el *setpoint* con la corriente aumentando, el sistema se estabilizaba. Por lo tanto, el control aumenta o disminuye el *setpoint* del variador de forma discreta con un pulso a través de un relé en base a la derivada de la corriente. El *setpoint* aumenta o disminuye con una pendiente programable durante el tiempo que se mantenga encendida una de sus entradas digitales. El pulso tiene una duración fija de 150 ms y la pendiente de variación de *setpoint* de $0,67 \frac{mHz}{ms}$ de forma de incrementarlo o decrementarlo $0,1 Hz$ cada pulso. La regulación de la duración del pulso y la pendiente se hizo de forma iterativa hasta alcanzar un control que funcionara de forma satisfactoria.

El control actúa sobre la derivada de la corriente, detectando incrementos o decrementos para actuar. El control no recibe referencia de velocidad ni corriente

para mantener uno de estos valores. Fue determinado así ya que un sistema con corriente estable para realizar medidas era suficiente para el desarrollo de la práctica.

Para el cálculo de la derivada, se calcula el promedio de 10 muestras y luego se estima como la resta de dos promedios sucesivos. Esta estimación, si bien no es precisa, resultó ser altamente eficaz para evitar actuaciones del control en momentos equivocados debido a ruido en la medida.

Cuando el control detecta un incremento de más del 10 % respecto al punto anterior, emite el pulso que disminuye el *setpoint*. El comportamiento es inverso para un decremento de la corriente. Además, el control cuenta con un sistema de banderas de forma que no da dos pulsos de subida (o bajada) sucesivos. Cada vez que realiza un pulso de subida espera realizar un pulso de bajada para poder realizar otro pulso de subida. Gracias a estas banderas, luego de que el control estabiliza el sistema, el *setpoint* del variador se mantiene o a lo sumo varía 0,1 Hz.

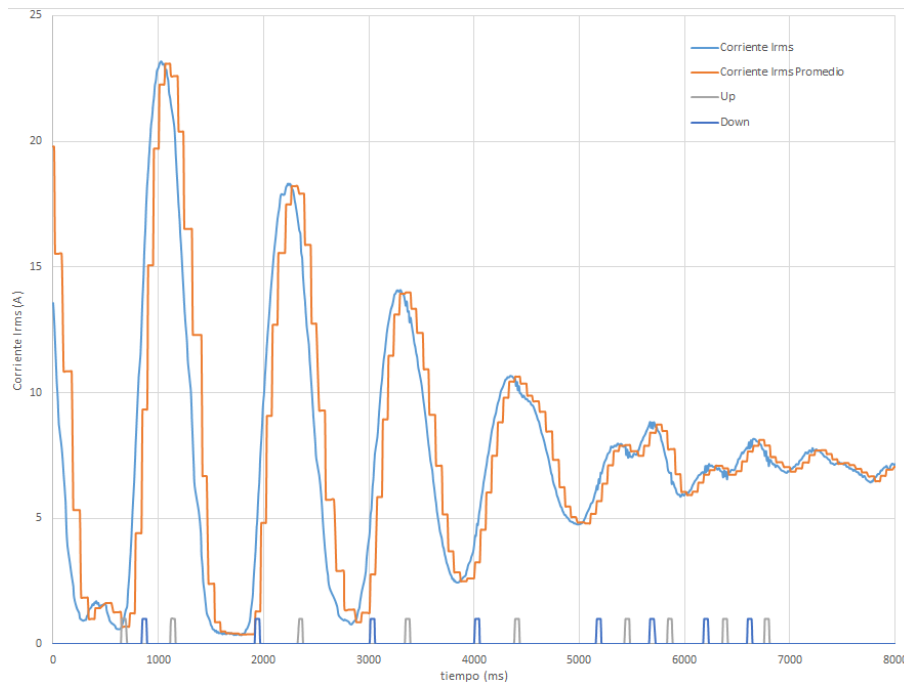


Figura 5.9: Control actuando y estabilizando el sistema -*setpoint*60 Hz.

En la figura 5.9 se observa la actuación del control para estabilizar el sistema. En la corriente I_{RMS} (curva celeste) puede apreciarse la característica de la oscilación, la amplitud de la misma es aproximadamente 23 A con una frecuencia menor a 1 Hz. Teniendo en cuenta que la corriente nominal del variador es 27 A, es claro que estos fenómenos oscilatorios ponían en riesgo la integridad del equipo. La curva naranja corresponde al cálculo de los promedios de la corriente para la estimación de derivada. Si bien el método implementado retrasa la curva “escalonada” con respecto a la real, se puede observar que dos valores sucesivos reflejan fielmente la derivada de la corriente. Por último, los pulsos azules y grises, son los pulsos de disminución o aumento de *setpoint*, respectivamente. Como fue mencionado anteriormente, no hay

dos pulsos sucesivos de aumento o disminución de *setpoint*. Sin embargo, como el primer y último pulso son de aumento, el *setpoint* del variador varió 0,1 Hz entre el comienzo de la actuación y el final. A modo general, se observa que el control logra estabilizar de manera efectiva, pasando de oscilaciones con amplitud de 23 A a 1 A.

En la tabla 3.3 se muestra la configuración del variador ATV312 que permite ser controlado remotamente vía entradas digitales. Una explicación del funcionamiento puede verse en la sección 7.2.1.

Un análisis detallado de la oscilación, sus causas y por qué el control logra estabilizarla, se presentará en la sección 6.1.

Prueba como motor

Con el control funcionando y el punto de funcionamiento definido, se realizaron las pruebas definitivas en la MIDA.

Se comenzó por las pruebas como motor. Para realizar las medidas, se acopló la máquina, se conectó el banco de resistencias, y se fueron tomando medidas variando la carga conectada. Para cada uno de los puntos, se tomaron las medidas de potencia del estator y del rotor, corriente y voltaje de la máquina de continua, se calcularon todas las pérdidas y se verificó que el balance de potencias diera correcto. Las medidas fueron satisfactorias, se presentarán en el capítulo siguiente.

Como fue mencionado anteriormente, para utilizar la máquina de continua como carga, se alimenta el campo con una corriente constante y se conecta en los bornes de la armadura una resistencia de carga R_C .

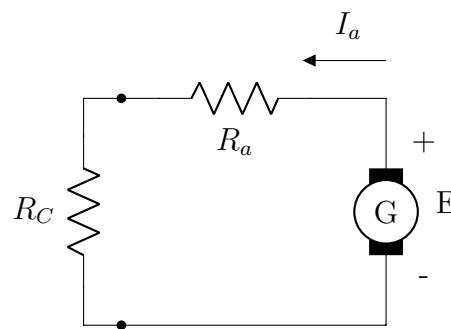


Figura 5.10: Máquina de corriente continua como carga.

Al aumentar la velocidad, aumenta la tensión contraelectromotriz según la siguiente ecuación:

$$E = k.n.i_f \quad (5.7)$$

La potencia tomada por el eje es $E.I_a$, por lo tanto:

$$P(n) = \frac{k^2 \cdot n^2 \cdot i_f^2}{R_a + R_c} \quad (5.8)$$

Prueba como generador

En la práctica se deseaba estudiar más de un punto de funcionamiento, por lo que se efectuaron pruebas como generador sub-sincrónico. La estrategia de control adoptada asumía que siempre que la corriente subía, el *setpoint* debía bajar, y viceversa.

Esto no es necesariamente verdadero para todos los puntos de funcionamiento, solo se da en caso que el campo magnético del rotor adelante al del estator. Como a priori no se conocía cómo debía reaccionar el control para poder estabilizar el sistema en este caso, el primer acople como generador se hizo con el control desconectado. Por otro lado, al igual que en el caso del motor sub-sincrónico, como los signos de las potencias por el estator y por el rotor son opuestos, era esperable que haciendo girar el motor hacia un lado el variador entregara potencia, e invirtiendo el sentido de giro recibiera potencia. Por lo tanto, el sentido de la potencia por el rotor era un punto a controlar, en caso de que el rotor recibiera potencia el sistema debía ser desacoplado, luego el sentido de giro ser invertido cambiando el sentido de la corriente de campo en el motor de continua y finalmente se debía volver a acoplar.

El acople como generador se hizo con el rotor girando, utilizando la máquina de continua como motor de arrastre.

Al realizar el acople, se verificó el correcto sentido de la potencia por el variador y al observar el sistema se encontró un fenómeno inesperado: la MIDA era completamente estable.

Para comprender por qué la máquina de continua aportando potencia por el eje estabiliza al sistema hay que entender cómo funcionan estos equipos.

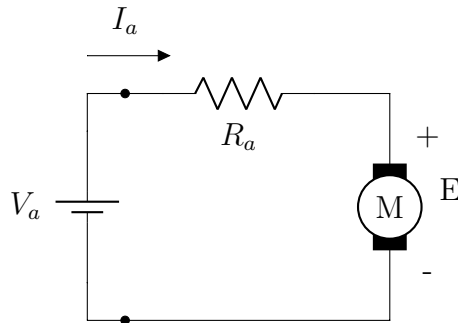


Figura 5.11: Máquina de corriente continua funcionando como motor.

Se alimenta la armadura con el voltaje V_a y el campo con una corriente constante

e independiente i_f .

Utilizando la ecuación 5.7, se tiene que la potencia entregada es:

$$P(n) = E.I_A = \frac{V_a \cdot k \cdot i_f}{R_a} \cdot n - \frac{k^2 \cdot i_f^2}{R_a} \cdot n^2 \quad (5.9)$$

Observar que de la ecuación 5.9 se puede obtener la velocidad de vacío de la MCC, siendo ésta $n_o = \frac{V_a}{k \cdot i_f}$ la velocidad a la que la máquina no entrega potencia.

Para que la máquina de continua funcione como motor, V_a debe ser mayor que E . Entonces, partiendo de un punto de equilibrio a una velocidad determinada, si la MIDA acelera, el motor de continua se acerca a n_o , por lo que entrega menos potencia asociativa⁵, frenando al sistema. Si la MIDA se frena, la máquina de continua se aleja de n_o , entregando más potencia y haciendo acelerar al sistema. Se podría decir que el comportamiento es simétrico con el de la máquina de continua funcionando como generador, cuando aumenta la velocidad con respecto a un punto de equilibrio, en un caso uno hace menos par asociativo y en otro hace más par resistivo, y vice-versa.

El hecho de que el sistema fuera notoriamente más estable con la máquina de continua como motor de arrastre que como carga, siendo que en ambos casos la máquina de continua tiende a estabilizar el sistema, planteó la pregunta de por qué en un caso era más estable que en el otro. Teniendo presente la razón por la cual estabiliza, la única opción posible es que la curva $P(n)$ en la máquina de continua como motor de arrastre tuviera una derivada $\frac{dP(n)}{dn}$ mayor. Esto significa que para una velocidad dada y la misma perturbación de velocidad, la variación de potencia que estabiliza el sistema será mayor en el caso de la MCC como motor que como generador.

Observando las ecuaciones 5.8 y 5.9, se puede ver que en el caso del generador la curva es una parábola con raíz doble en el punto $(0, 0)$, mientras que para el motor la curva es una parábola con raíces en el $(0, 0)$ y en $(n_o, 0)$.

⁵Así como la potencia resistiva es aquella que se opone al movimiento, la potencia asociativa es la que acompaña al movimiento.

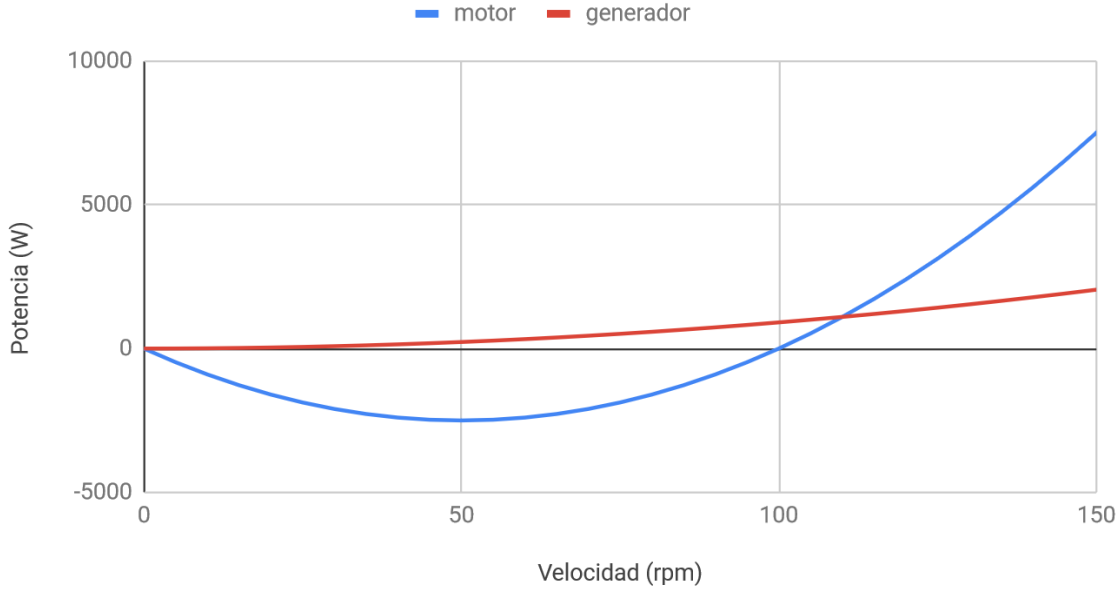


Figura 5.12: Curvas $P(n)$ cualitativas para la MCC como motor y generador. $i_f = 1$, $k = 1$, $R_a = 1$, $R_c = 10$, $V_a = 100$.

Como se puede observar en la figura, la curva como generador tiene menor pendiente para la misma potencia⁶. La ecuación 5.8 es la potencia de la MCC como generador, por lo que su derivada es $\frac{dP(n)}{dn} = 2n \cdot \frac{k^2 \cdot i_f^2}{R_a + R_c}$. Analizando el cociente entre ambas ($\frac{dP(n)/dn}{P} = \frac{2}{n}$), se puede ver que la relación derivada-potencia no puede ser cambiada modificando los parámetros accesibles (i_f , R_c) de forma de poder obtener mayor pendiente a menores potencias. Por otro lado, la curva como motor tiene una raíz en $n_o = \frac{V_a}{k \cdot i_f}$ y punto de mínima potencia se da en $\frac{n_o}{2}$. En este punto la potencia es $P(\frac{n_o}{2}) = \frac{V_a^2}{4 \cdot R_a}$. Estas dos ecuaciones muestran que la curva puede ser modificada de manera independiente, tanto la pendiente como el segundo corte por cero. Esto es así ya que ambos valores dependen de V_a , pero solo uno de ellos depende de i_f .

Para probar esta teoría se relevaron las curvas $P(n)$ para la MIDA como motor con poca carga, como motor con máxima carga y como generador. Las mediciones se hicieron para intervalos similares de velocidad, cerca de los 300 rpm, y se midió la potencia eléctrica transferida a la máquina de continua, descontando las pérdidas en la resistencia de armadura.

⁶Se considera positiva a la potencia eléctrica saliente de la MCC.

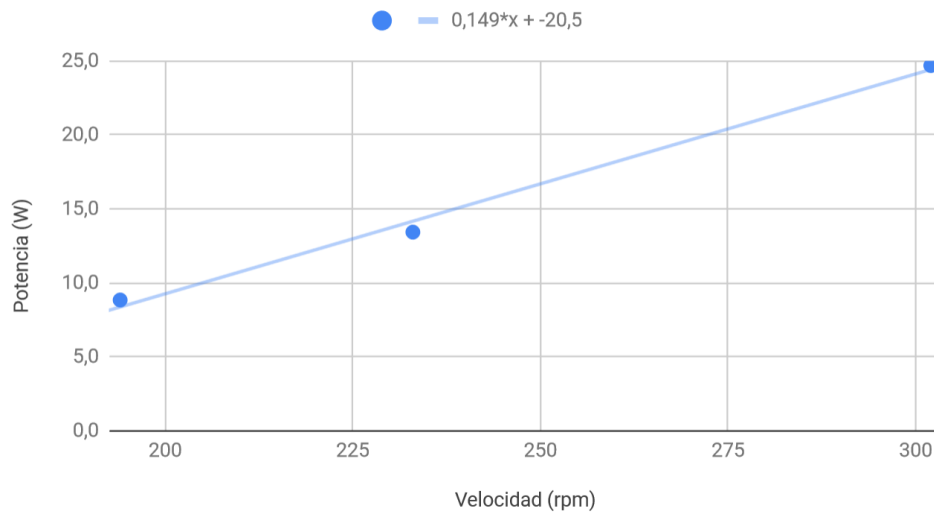


Figura 5.13: Relevamiento de curva $P(n)$ para máquina de continua funcionando como generador entregando poca potencia.

i_f (A)	V_a (V)	I_a (A)	rpm	P_{R_c} (W)	P_{R_a} (W)	P_{total} (W)
0,62	21,1	0,4	194	8,4	0,4	8,8
0,62	25,6	0,5	233	12,8	0,6	13,4
0,62	33,5	0,7	302	23,5	1,2	24,7

Tabla 5.2: Datos del relevamiento de la curva $P(n)$, MCC generador con poca carga ($R_c = 66,3\Omega$).

Esta gráfica se relevó colocando una resistencia de $66,3\Omega$ en la armadura de la máquina de continua. Los puntos se aproximan con una recta para poder obtener la pendiente, la cual es $0,15 \frac{W}{rpm}$. El término independiente no tiene sentido físico ya que en realidad la curva es una parábola.

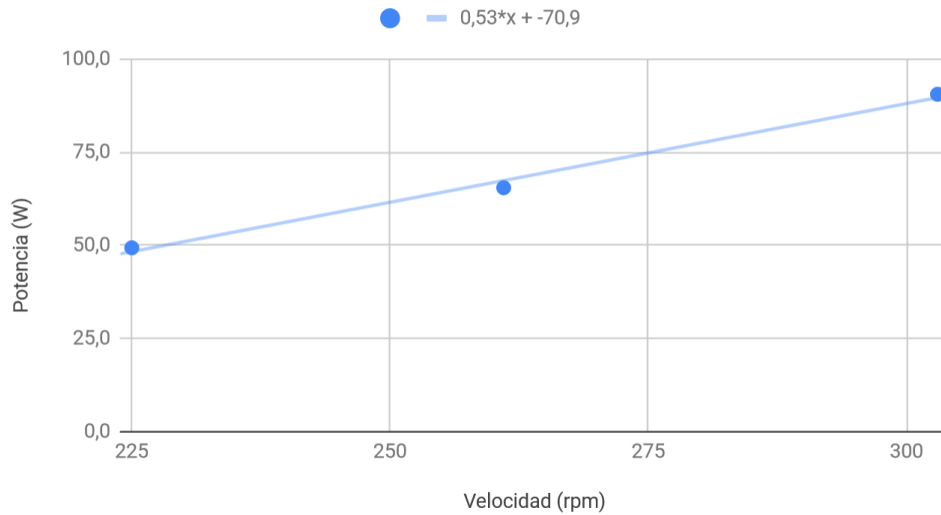


Figura 5.14: Relevamiento de curva $P(n)$ para máquina de continua funcionando como generador entregando máxima potencia.

i_f (A)	V_a (V)	I_a (A)	rpm	P_{R_c} (W)	P_{R_a} (W)	P_{total} (W)
0,8	40,2	2,0	303	80,4	10,1	90,5
0,8	29,1	1,5	225	43,7	5,7	49,3
0,8	34,2	1,7	261	58,1	7,3	65,5

Tabla 5.3: Datos del relevamiento de la curva $P(n)$, MCC generador con máxima carga ($R_c = 19,7\Omega$).

Para relevar esta curva, se conectó el banco de resistencias con 110Ω en bornes de la armadura de la MCC, se llevó a la velocidad deseada y se fue agregando carga hasta que la corriente del variador fuera $20A$, el cual se consideraba el límite seguro. Es por esto que este ensayo se considera con máxima carga. Por la forma de la curva, para tener más pendiente se debe tener necesariamente más potencia, por lo que $0,53 \frac{W}{rpm}$ es la máxima pendiente que se puede obtener con la configuración de MCC como generador alimentando una resistencia.

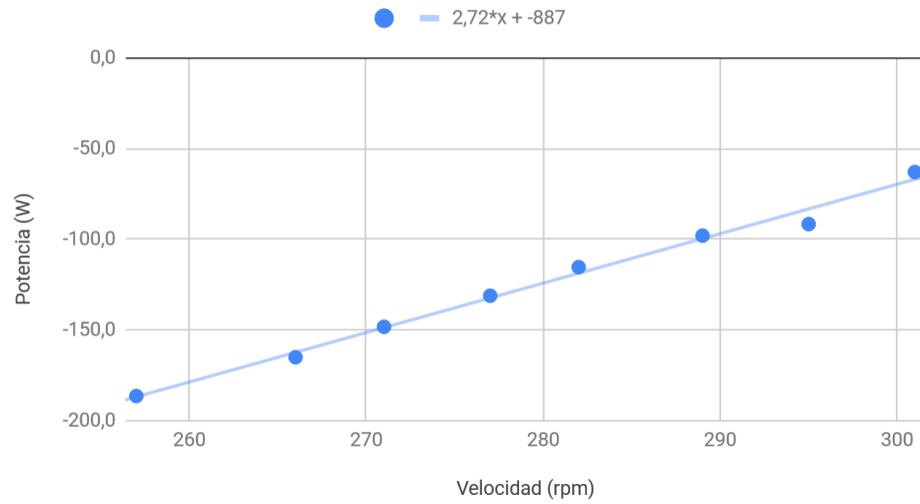


Figura 5.15: Relevamiento de curva $P(n)$ para máquina de continua funcionando como motor.

i_f (A)	V_a (V)	I_a (A)	rpm	$P_{el\acute{e}ctrica}$ (W)	P_{CC} (W)	$P_{\acute{u}til}$ (W)
1,27	55	4,2	257	-231,0	44,6	-186,4
1,27	56	3,5	266	-196,0	31,0	-165,0
1,27	57	3,0	271	-171,0	22,8	-148,2
1,27	57	2,6	277	-148,2	17,1	-131,1
1,27	58	2,2	282	-127,6	12,2	-115,4
1,27	59	1,8	289	-106,2	8,2	-98,0
1,24	69	1,4	295	-96,6	5,0	-91,6
1,23	60	1,1	301	-66,0	3,1	-62,9

Tabla 5.4: Datos del relevamiento de la curva $P(n)$, MCC motor.

Para el relevamiento de la curva con la MCC como motor se utilizó el punto de funcionamiento con el que se venía trabajando con la MIDA como generador. Como este punto ya era lo suficientemente estable, se considero como aceptable para realizar mediciones. En este caso la pendiente de la curva es $2,72 \frac{W}{rpm}$, unas 5 veces mayor que la máxima pendiente posible con la configuración anterior.

Esto demostró que la hipótesis inicial sobre la influencia de la pendiente de la curva en la estabilidad de la máquina era correcta, y planteó la posibilidad de cambiar la configuración de la máquina de continua de forma que la MIDA siguiera siendo un motor, pero estabilizada con la curva $P(n)$ de la carga.

Analizando las distintas posibilidades, se llegó a la conclusión de que la mejor opción era utilizar el mismo conexionado para que la MCC fuera un motor, pero trabajando a una velocidad por encima a n_o , por lo que funciona como generador. En este caso, E es mayor que V_a (ver figura 5.11), y por lo tanto la máquina le entrega potencia a la fuente (por lo que es un generador).

Para esta configuración, se tiene a la máquina de continua funcionando como generador con la misma curva $P(n)$ que funcionando como motor (figura 5.12, curva “motor”). Con esta curva se pueden obtener grandes pendientes a bajas potencias, siendo la curva completamente configurable. Esto presentaba un problema ya que el panel utilizado para alimentar el motor genera la corriente continua variable rectificando la salida de un *variac*⁷ con un puente de diodos y un capacitor para disminuir el *ripple*. Esto hace que la fuente sea incapaz de recibir potencia, cuando la corriente llega a cero los diodos se cortan y toda la potencia comienza a acumularse en forma de carga en el capacitor.

Para solucionar este problema, la alimentación de la armadura pasó a realizarse con el grupo MCC-MI presente en el laboratorio que distribuye la continua en los tableros. Regulando la corriente de campo de la máquina de continua, se regula la tensión en la barra DC. Esta fuente sí es capaz de absorber potencia.

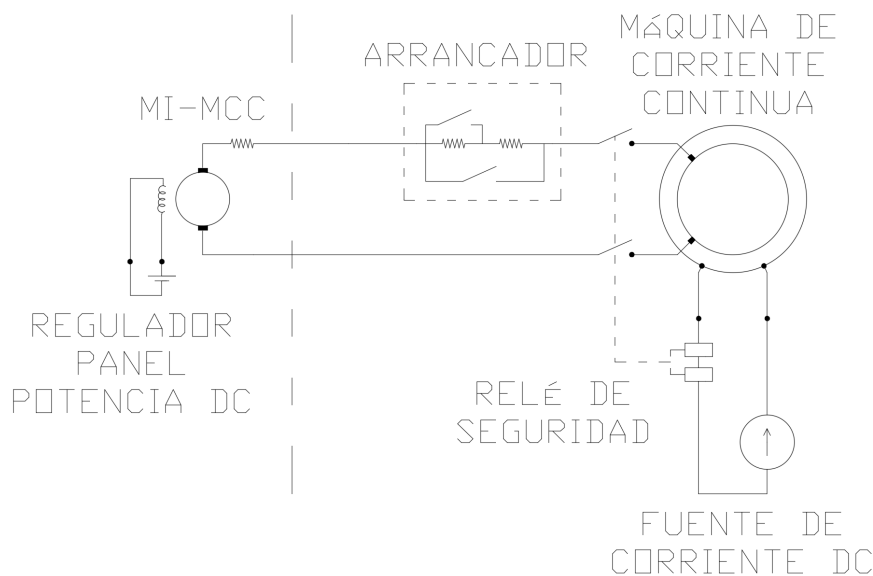


Figura 5.16: MCC para pruebas como motor o generador.

Finalizadas todas las conexiones, se realizó el acople al igual que cuando la MIDA es un generador, pero con el sentido de giro del motor de forma tal que el *setpoint* del variador sea 60 Hz. Esto se hizo así ya que si trabajando con un *setpoint* de 40 Hz el variador entregaba potencia funcionando con la MIDA como generador, entonces con la MIDA trabajando como motor el variador debía recibir potencia para el mismo *setpoint*. Como fue observado durante los primeros acoples, estos flujos de potencia se revierten al invertir el sentido de giro del motor. Una vez acoplado el sistema con la MIDA como motor, el mismo se mostró perfectamente estable.

Si bien haber logrado que el sistema funcionara estable con la MIDA como motor le quita parte del propósito al control, el mismo sigue siendo una herramienta fundamental para realizar mediciones con gráficas en tiempo real y para estudiar,

⁷El *variac* es un transformador con relación de vueltas variable

en caso de que se desee, los fenómenos oscilatorios del sistema.

Flujo de reactiva

Una vez que se consiguió tener el sistema estable para dos de los cuatro puntos de funcionamiento, se realizaron ensayos para determinar cómo se reparte el flujo de reactiva para la magnetización de la máquina en base a los parámetros eléctricos.

Primero se acopló la máquina como motor para realizar este estudio, pero la magnitud de la corriente del rotor alcanzaba fácilmente valores cercanos a la nominal del variador. Esto se debe a que al funcionar como motor la MIDA debe compensar las pérdidas de potencia mecánicas, aumentando la corriente para la misma transferencia de potencia. Por esta razón se decidió conectarla como generador para reducir la corriente, ya que la máquina de continua aporta la potencia para las pérdidas mecánicas.

Luego, se tomaron las medidas de las potencias reactivas en el rotor y estator con los analizadores de red. En esta etapa no se encontraron mayores inconvenientes, ya que el sistema era estable y se pudieron obtener medidas precisas.

Para estos ensayos lo que se varió fue el nivel de tensión del estator con el regulador de inducción, manteniendo el *setpoint* de velocidad del variador. Como la velocidad era fija, la potencia entregada por la máquina de continua también lo era. Por lo tanto, la variación de tensión generaba variaciones de corriente que debían reflejarse en la potencia reactiva por el rotor y estator sin afectar en mayor medida el flujo de potencia activa (solo aumentaban las pérdidas en el cobre por causa del aumento de la corriente). Con estas medidas de potencia reactiva, se analizó como se repartía esta potencia entre el estator y rotor según las tensiones de la máquina.

Los resultados obtenidos y su respectivo análisis se presentan en el siguiente capítulo.

Capítulo 6

Análisis de los resultados

6.1. Comportamiento oscilatorio

Como se mencionó en el capítulo 5.1, durante las primeras pruebas con la MIDA, se encontró que el sistema oscilaba al punto de verse comprometida la operación del mismo.

Para entender este fenómeno hay que tener presente la expresión de par de la máquina. Todas las máquinas eléctricas rotativas funcionan con el mismo principio, son dos campos magnéticos desfasados un ángulo δ . El par electromagnético ejercido sobre el rotor de la máquina es proporcional al seno de este ángulo. Si la máquina es un motor o generador depende de qué campo adelante al otro en el espacio, si el campo del estator adelanta al campo del rotor, la máquina es un motor, en caso contrario la máquina es un generador.

La expresión del torque es la siguiente:

$$\tau(t) = 2.M_{er}.I_r.I_e.\text{sen}[(\omega_e - \omega_r - \Omega_m.p)t + (\alpha_e - \alpha_r - \theta_o)] \quad (6.1)$$

Donde:

- M_{er} : Inductancia mutua entre estator y rotor
- I_e : Corriente rms por el estator
- I_r : Corriente rms por el rotor
- ω_e : velocidad de giro del campo magnético del estator
- ω_r : velocidad de giro del campo magnético del rotor, respecto al rotor
- Ω : Velocidad mecánica del rotor
- α_e : Posición inicial del campo del estator
- α_r : Posición inicial del campo del rotor

- θ_o : Posición inicial del rotor
- p : Número de pares de polos de la máquina

En la ecuación 6.1, se define $\delta = (\alpha_e - \alpha_r - \theta_o)$ y $\Omega = \Omega_m \cdot p$. Observando dicha ecuación se puede ver que para que el par sea constante en el tiempo, el término $(\omega_e - \omega_r - \Omega_m \cdot p)$ dentro del seno debe ser igual a 0.

Esta igualdad determina la ecuación de sincronismo:

$$\omega_e = \omega_r + \Omega_m \cdot p \quad (6.2)$$

Cuando se dice que la máquina se encuentra en régimen permanente, se refiere a que se encuentra operando en una condición tal que se cumple la ecuación 6.2. En este punto de funcionamiento, tanto la velocidad como el modulo de las corrientes tienen un valor fijo. Como se explicó en el capítulo 2, dado que $f_e = 50 \text{ Hz}$ fijado por la red, al controlar ω_r con la frecuencia impuesta por el variador se controla la velocidad mecánica de la máquina.

Teniendo presentes estos conceptos, se puede explicar el comportamiento oscilatorio de la MIDA.

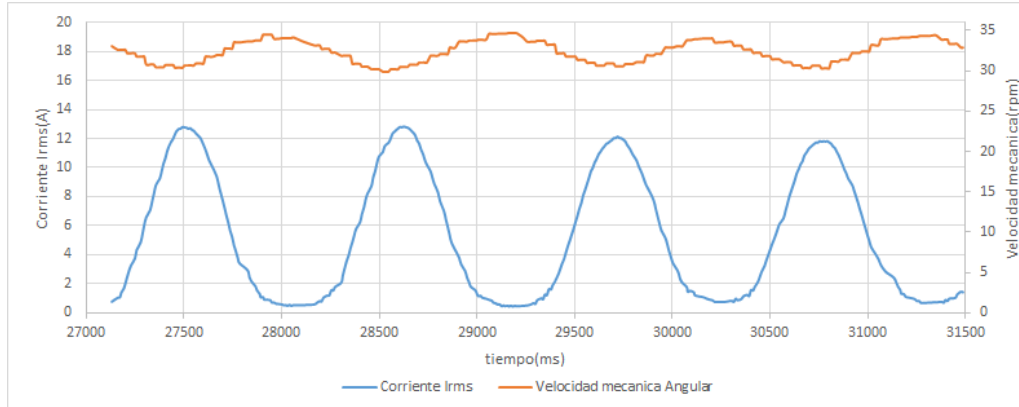


Figura 6.1: Sistema inestable.

En la figura anterior se puede ver la corriente por el rotor y la velocidad del motor oscilando. En este caso la MIDA se encuentra con poca carga. Un aspecto a destacar es que la corriente es máxima cuando la velocidad es mínima, y viceversa.

Para este punto de funcionamiento, la potencia entrante por el rotor es 623 W y saliente por el estator 576 W , por lo que es el rotor quien aporta la potencia ya que la MIDA está operando como motor. Esta condición es impuesta ya que el variador no puede consumir potencia y para lograrlo el *setpoint* de frecuencia del variador debe ser mayor a 50 Hz , tal como se comenta anteriormente. Como la secuencia de fases es la misma, ya que se verifica a la hora del acople, el sentido de giro de ambos campos debe ser el mismo. Esto significa que el sentido de giro mecánico del

rotor es opuesto al de los campos para que se cumpla la ecuación de sincronismo (ecuación 6.2). Esto es importante ya que si disminuye la velocidad mecánica, como se está restado a la velocidad de giro de campo del rotor, este comienza a acelerar con respecto al campo del estator.

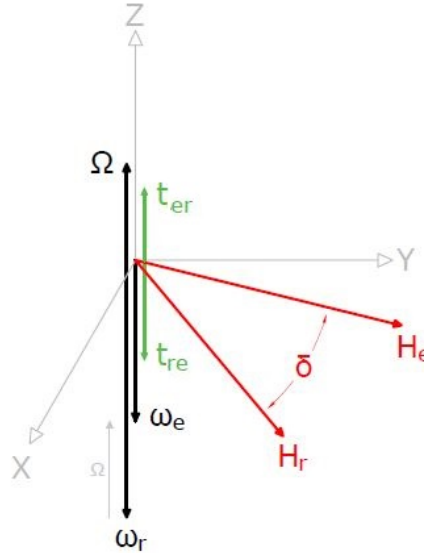


Figura 6.2: Diagrama fasorial de velocidades, campos y torques.

En la figura anterior se aprecia el diagrama fasorial del punto de funcionamiento en cuestión. En él se puede apreciar al campo del rotor adelante del campo del estator. Esto debe ser así porque el rotor es quien entrega potencia, por lo que $\vec{\omega}_r \cdot \vec{\tau}_{er} > 0$.

Cuando la red disminuye su frecuencia o el variador la aumenta, entonces se incrementa el ángulo δ . Al aumentar este ángulo, aumenta la diferencia de tensión sobre la impedancia de cortocircuito de la MIDA (ver figura 6.3), por lo que aumenta la corriente, tanto estatórica como rotórica. Con el aumento de la corriente, aumenta el par que tiende a acelerar a la MIDA (ecuación 6.1). La máquina comienza a acelerar, disminuyendo δ y la corriente hasta que llega de nuevo al δ de equilibrio. En vez de permanecer en este punto, por la propia inercia de la máquina la velocidad es mayor a la de equilibrio. Por lo tanto, el ángulo δ sigue disminuyendo y con él la corriente. Al disminuir la corriente disminuye el par, y la máquina comienza a frenarse. Al disminuir la velocidad, aumenta δ y la corriente, repitiéndose el ciclo. Este comportamiento puede apreciarse en la figura 6.1, cuando la corriente es máxima la velocidad es mínima, y cuando la corriente es mínima la velocidad es máxima.

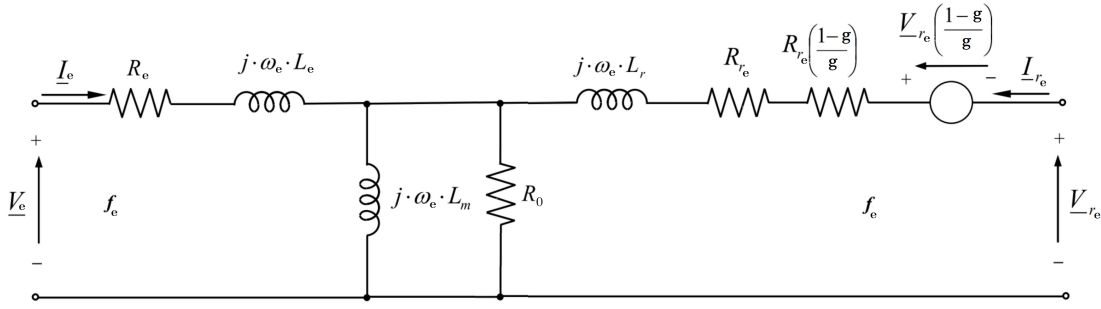


Figura 6.3: Modelo simplificado de una MIDA a mismo nivel de tensión y frecuencia.

Este efecto se vuelve más claro cuando la máquina está en vacío. En esta condición la potencia entregada es pequeña para cualquier velocidad, por lo que el par debe ser pequeño. Esto se traduce en un δ muy cercano a cero. En estos casos, cuando el campo del rotor se frena, el campo del estator llega a adelantarlo.

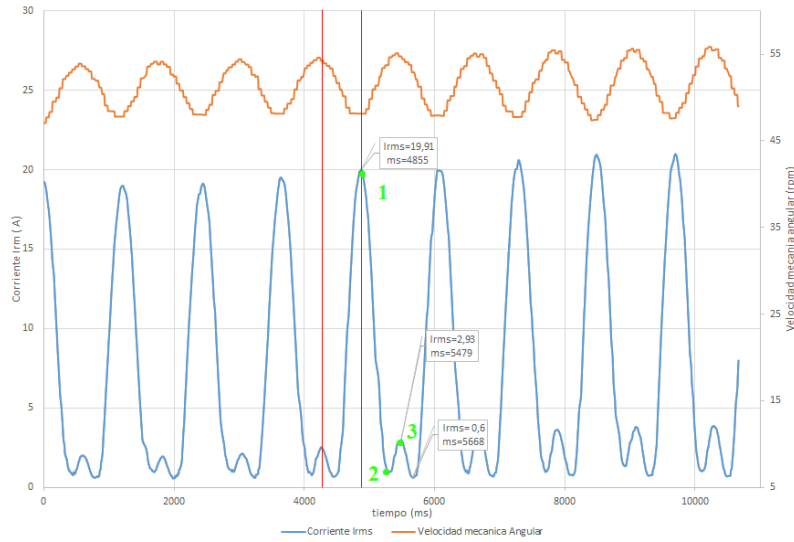


Figura 6.4: Velocidad del motor y corriente por el rotor durante oscilación - MIDA motor en vacío.

Este comportamiento puede apreciarse en la figura 6.4. Luego de que el rotor comience a acelerar nuevamente (punto 1 en la figura), el rotor acelera hasta el punto donde los campos están alineados. En este punto la corriente es mínima (punto 2), pero por la inercia el rotor sigue aumentando su velocidad, por lo que el campo del estator adelanta al del rotor. El pico de corriente en este caso es menor (punto 3) ya que el par eléctrico se invierte y se suma al par mecánico resistivo, por lo que se necesita menos par eléctrico (y por lo tanto menos corriente) para frenar la máquina.

6.2. Pruebas como motor

Las pruebas como motor sub-sincrónico se realizaron con la máquina de continua como generador alimentando una resistencia de carga. Se acopló el sistema, se seteo una referencia de 60 Hz en el variador y se realizan medidas para distintos puntos variando la corriente de campo y dejando fija la resistencia de carga.

Si bien se encontró otro conexionado de la máquina de continua que estabilizaba aun más a la MIDA, estas pruebas fueron realizadas antes de haberlo encontrado. Como se contaba con el circuito de control y el sistema lograba ser estabilizado, se consideró que las medidas eran aceptables y no fue necesario repetirlas.

Los datos se presentan a continuación:

Nro	Estator				Rotor				MCC			
	V_{f-n} prom. (V)	I prom. (A)	P_{tot} (W)	S_{tot} (VA)	U prom. (V)	I prom. (A)	P_{tot} (W)	Q_{tot} (VAr)	f_r (Hz)	V (V)	I (A)	P (W)
1	29,3	2,6	-226	-229	37,7	6,1	307	208	60,2	30,9	0,16	4,94
2	29,2	4,0	-328	-350	34,9	8,7	460	230	60,2	51,25	0,26	13,33
3	29,2	5,3	-406	-463	36,8	11,5	603	260	60,2	62,6	0,32	20,03
4	29,2	6,5	-462	-570	36,6	14,1	729	310	60,2	69,1	0,36	24,88

Tabla 6.1: Datos relevados durante prueba del sistema como motor.

Para calcular las pérdidas mecánicas, se pone a girar el motor arrastrado con la máquina de continua con la MIDA desconectada a la velocidad a la que se realizarán las pruebas. Luego, midiendo la potencia que consume la MCC y restando las pérdidas Joule se obtienen las pérdidas mecánicas.

Utilizando los datos de las resistencias de los bobinados y las corrientes se calculan las pérdidas Joule del rotor y estator. Tomando las medidas de la máquina de continua se calcula la potencia entregada a la carga. Conociendo las resistencias y las inductancias de cortocircuito, tomando el voltaje como origen de fases, y teniendo corriente con módulo y fase respecto del voltaje, se puede calcular la tensión sobre la rama magnetizante. Con esta tensión se pueden calcular las pérdidas en el hierro. Teniendo todos estos datos es posible realizar el balance de potencias.

En la tabla 6.2 se presentan los datos procesados de las mediciones realizadas, presentadas en la tabla 6.1. En la columna “ Σ ” se encuentran la suma de todas las potencias. A la suma de las potencias entrantes al estator y al rotor se le llamó “ P_{red} ”. Dado que tanto el regulador de inducción que alimenta el estator como el variador de frecuencia que alimenta el rotor están alimentados de la misma red, esta potencia refleja el verdadero consumo de la MIDA como conjunto¹.

¹Este cálculo desprecia las pérdidas internas del regulador de inducción y del variador ya que no influyen en los análisis realizados.

Nro	P_{cc_e} (W)	P_{cc_r} (W)	P_0 (W)	P_{Ra} MCC (W)	P_{carga} (W)	P_{mec} (W)	P_e (W)	P_r (W)	Σ (W)	$\frac{ \Sigma }{ P_e }$	$-\frac{P_r}{P_e}$	P_{red} (W)	η
1	6,49	32,37	7,92	0,06	4,9	50	-226	307	-20,79	9,20	1,36	81	6,1
2	15,11	65,85	7,98	0,17	13,3	50	-328	460	-20,43	6,23	1,40	132	10,1
3	26,63	115,06	8,49	0,26	20,0	50	-406	603	-23,47	5,78	1,49	197	10,2
4	40,56	172,15	9,35	0,33	24,9	50	-462	729	-30,26	6,55	1,58	267	9,3

Tabla 6.2: Cálculos de flujo de potencia - Motor sub-sincrónico.

Para estimar la validez de las mediciones y de los parámetros eléctricos de las máquinas se utilizó el cociente $\frac{|\Sigma|}{|P_e|}$, el cual está en la segunda columna naranja representado en porcentaje. Si bien este cociente no tiene un significado físico, intenta cuantificar el error total de la medida comparando el error del balance de potencias con la cantidad de potencia fluyendo por el sistema. Se eligió la potencia entrante por el estator para representar la potencia que fluye por el sistema. En base a este parámetro se consideraron aceptables las medidas ya que los errores del balance de potencias son menores que 10 % de la potencia saliente por el estator. De todas formas, se puede observar que consistentemente hay 25 W de error en el flujo saliente de la máquina. Las potencias de cortocircuito del estator, la de vacío, la de cortocircuito de la MCC, y la de la carga son demasiado pequeñas para justificar esta diferencia. La potencia por el estator es medida por un analizador de red dentro de los rangos de frecuencia y contenido armónico en los que está pensado para operar el equipo, por lo que no debe tener mayor error la medida, dado que los datos técnicos del equipo indican un error menor al 0,5 % en la medida.

Una posible causa de error es un sobredimensionado en la medida de la resistencia del rotor. Sin embargo, la potencia del rotor se multiplica por 6 entre el primer y cuarto ensayo, mientras que la potencia sobrante del balance aumenta sólo en 50 %, pasando de 20 W a 30 W. Como la potencia no escala de la misma manera, no explica todas las pérdidas. Otra posible causa de error es la medida del analizador de red en el rotor. Este analizador funciona midiendo una señal de 60 Hz con alto contenido armónico. Si bien la frecuencia nominal puede ser cambiada desde la configuración, cuando se realizaban las pruebas para determinar los puntos de operación de la práctica en base a las limitaciones de los instrumentos de medida, se observó que con una frecuencia un poco mayor a 65 Hz el analizador ya era incapaz de medir voltaje y frecuencia. De todas formas, al igual que con la magnitud de la resistencia, la potencia por el rotor aumenta dos veces y media mientras que la potencia de pérdidas sobrante solo aumenta una vez y media. Esta falta de relación hace que no toda la potencia sobrante del balance sea explicada por un error de medida de este equipo.

Otro punto a destacar es que la relación $\frac{P_r}{P_e} = g$ no se cumple fielmente. Para las cuatro pruebas, el *setpoint* del variador fue de 60 Hz, por lo que $g = 1,2$. Esto se debe a que, como se vio en el capítulo 4, la relación teórica se obtiene despreciando las pérdidas. Para el caso con menos pérdidas (primer ensayo), el total de las pérdidas es de 102 W, la potencia del estator es 226 W y la del rotor 307 W. En estas condiciones, es claro que las pérdidas no son despreciables. A medida que las pérdidas aumentan, la relación teórica se aparta cada vez más de la realidad.

Por último, un punto a destacar es la ineficiencia del sistema. El valor P_{red} se calcula como $P_r - P_e$ y es la potencia que en definitiva termina consumiendo el sistema (esta potencia no tiene en cuenta las pérdidas del variador ni del regulador de inducción), ya que la red debe aportar la potencia que entra por el rotor pero recibe la potencia que sale por el estator. Calculando el rendimiento como $\eta = \frac{P_{carga}}{P_{red}}$, se obtiene un valor del orden del 10 %. Hay dos razones que justifican la ineficiencia del sistema: el bajo voltaje y la baja potencia a la carga. Al tener bajo voltaje, la misma potencia debe ser entregada con mayor corriente, lo cual implica una gran cantidad de pérdidas Joule. Por otro lado, la potencia de pérdidas mecánicas es constante a una velocidad dada, por lo que al extraer potencia por el eje del orden de la potencia de pérdidas (entre 10 % y 50 % para estos casos) la eficiencia cae aunque no hubiera pérdidas eléctricas. Si se extrajera más potencia a la misma velocidad, impacto de las pérdidas mecánicas en el rendimiento disminuiría.

6.3. Pruebas como generador

Las pruebas de la MIDA como generador fueron similares a las pruebas como motor, pero en este caso se conecta la máquina de continua como motor alimentando su armadura con el grupo MCC-MI. Para estas pruebas se utilizaron tres velocidades diferentes, una igual a las pruebas anteriores, otra donde se alcanzó una mayor eficiencia, y la última donde se intentaba alcanzar una mayor potencia generada. El método para medir las pérdidas mecánicas es igual al de las pruebas anteriores.

velocidad rotor (rpm)	V_a (V)	I_a (A)	P_{totMCC} (W)	P_{RaMCC} (W)	P_{mec} (W)
306	43	1,2	51,6	3,6	48,0
478	99	1,1	108,9	3,1	105,8
827	172	1,5	258	5,7	252,3

Tabla 6.3: Medición de pérdidas mecánicas.

En esta instancia se realizaron pruebas en seis puntos de funcionamiento. En las primeras tres se procedió igual que en las pruebas anteriores, acoplando el sistema en 300 rpm se varió la corriente de campo y se tomaron las medidas pertinentes. Las siguientes dos medidas se tomaron buscando un punto de alta eficiencia. Observando las tres primeras medidas, se puede ver que las pérdidas más importantes son las Joule en los bobinados. Por lo tanto, se buscó aumentar la velocidad y entregar una potencia similar con la máquina de continua. De esta manera, se reduce el par, por lo que se reduce la corriente. Si bien el aumento de la velocidad implica mayores pérdidas mecánicas, la disminución de pérdidas Joule lo compensa. Además, se aumentó la tensión de armadura y la corriente de campo, de forma de entregar una potencia similar con una menor corriente de armadura.

En el sexto ensayo se intentó alcanzar la máxima generación. Para hacerlo, se aumentó aún más la velocidad de la máquina y se llevó al máximo la tensión de armadura, siendo ésta limitada por la tensión de campo aplicable a la máquina de continua del grupo MI-MCC.

Nro	Estator				Rotor					g	MCC			
	V_{f-n} prom. (V)	I prom. (A)	P_{tot} (W)	S_{tot} (VA)	U prom. (V)	I prom. (A)	P_{tot} (W)	Q_{tot} (VAr)	f_r (Hz)		V (V)	I_a (A)	I_f (A)	P (W)
1	44	1,5	-13	-15	29,0	2,1	10	100	40,01	0,80	43	-1,2	0,81	-51,60
2	45	4,0	-448	-525	30,2	8,4	420	83	40,02	0,80	44	-3,7	0,70	-162,80
3	44,7	5,7	-617	-770	29,5	12,3	625	102	40,07	0,80	43	-5,1	0,63	-219,30
4	44,7	2,4	-266	-300	30,4	4,7	232	S/D	39	0,78	67	-1,9	1,36	-127,30
5	44,6	2,6	-300	-318	26,4	5,0	220	S/D	34,3	0,69	99	-2,2	1,40	-217,80
6	37	5,1	-490	-575	16,9	11,0	301	S/D	22,4	0,45	173	-3,4	1,40	-588,20

Tabla 6.4: Datos relevados durante prueba del sistema como generador sub-sincrónico.

Nro	P_{cc_e} (W)	P_{cc_r} (W)	P_0 (W)	P_{Ra} MCC (W)	P_{aMCC} (W)	P_{mec} (W)	P_{est} (W)	P_{rot} (W)	Σ (W)	$\frac{ \Sigma }{ P_e }$	$-\frac{P_r}{P_e}$	P_{red} (W)	η
1	2,0	4,0	20,4	3,6	-51,6	48	-13	10	-29,38	225,99	0,77	-3	6,3
2	15,1	60,9	20,9	34,6	-162,8	48	-448	420	-44,66	9,97	0,94	-28	21,8
3	31,2	131,6	21,2	65,8	-219,3	48	-617	625	-70,51	11,43	1,01	8	-5,2
4	5,4	19,5	20,6	9,1	-127,3	48	-266	232	-9,30	3,50	0,87	-34	28,8
5	6,7	22,0	19,9	12,2	-217,8	106	-300	220	-28,91	9,64	0,73	-80	38,9
6	25,3	105,9	14,0	29,2	-588,2	252	-490	301	-27,55	5,62	0,61	-189	33,8

Tabla 6.5: Cálculos de flujo de potencia - Generador sub-sincrónico.

En el ensayo 4 se bajó levemente la velocidad y se cambió la tensión de armadura de la máquina de continua. En este ensayo la máquina de continua entrega 70,2 W por el eje, un valor similar al ensayo 2 donde entrega 80,2 W. Con los cambios realizados ya se puede observar un aumento de la eficiencia del 21,8 % al 28,8 %. En el quinto ensayo, se aumenta considerablemente la velocidad, aumentando a su vez la tensión de armadura de la máquina. En este caso, recibiendo 99,6 W por el eje el sistema alcanzó una eficiencia de 38,9 %.

En el sexto ensayo se puede ver como la potencia generada es de 189 W, más del doble de lo obtenido en puntos de funcionamiento anteriores. De todas formas, ya que la potencia de pérdidas mecánicas aumenta casi cuadráticamente con la velocidad, el aumento de estas pérdidas reducen la eficiencia del sistema, siendo esta 33,8 %. Con respecto a la relación de las pérdidas mecánicas con la velocidad, ésta aumenta a 2,76 veces su valor inicial mientras que las pérdidas mecánicas son 5,25 veces mayores. La razón por la cual la relación no es exactamente cuadrática ($2,76^2 \approx 7,6$) es que no todas las pérdidas de rozamiento son por rozamiento viscoso. La parte de las pérdidas que son por rozamiento entre partes metálicas crece linealmente con la velocidad, mientras que el rozamiento con el aire por la ventilación crece cuadráticamente. Entonces, las pérdidas mecánicas totales, que son una combinación de las

dos, no llegan a tener una relación cuadrática con la velocidad.

En el tercer ensayo se intentó aumentar la potencia entregada por la máquina de continua sin tomar las precauciones de los siguientes ensayos. En este caso, debido a la ineficiencia del sistema y del punto de funcionamiento, tanto la MIDA como la MCC están funcionando como motor, ambas alimentando las pérdidas. La forma en que se calcula la eficiencia del sistema supone que el mismo genera energía. Como en este caso la MIDA consume energía, el rendimiento es negativo.

En general, para estos casos el balance de potencias también fue satisfactorio. El primer punto es el que presenta el mayor error relativo con un valor muy grande, más del 200 %, pero esto se debe a que la potencia del sistema en general era pequeña. Sin embargo, si se observa el valor de la sumatoria se aprecia que se mantiene el error el orden de los 25 W que se tenía en los ensayos pasados.

En los casos restantes, los valores se encuentran dentro de los valores esperados. Además, se observa un comportamiento similar al balance de las pruebas como motor, el error aumenta con la corriente aunque no proporcionalmente, lo que sugiere un sobredimensionado en alguna de las resistencias del sistema, siendo la resistencia del rotor la que más influye en el balance por tener mayor flujo de corriente.

Dado que tanto en estos ensayos como en los ensayos de la MIDA como motor el balance de potencias siempre presenta un error del orden de 25 W , con cierta independencia de los demás parámetros, es probable que esa diferencia se deba a un *offset* en alguna de las medidas. El punto más probable es en el analizador de red del rotor ya que, como fue mencionado anteriormente, la frecuencia de las variables a medir y el contenido armónico de la corriente y el voltaje están por fuera de los rangos para los cuales el equipo fue diseñado.

La mayor diferencia con los ensayos como motor es la relación $\frac{P_r}{P_e} = g$. Para estos ensayos, las relaciones de potencias son similares a la aproximación antes mencionada. Esto es esperable ya que se trabajó con menores corrientes por el estator y rotor, lo que aumentó la eficiencia del sistema. El aumento de eficiencia significa que la relación entre las pérdidas y la potencia transmitida también disminuyó, haciendo que la aproximación de despreciar las pérdidas mediante la cual se llega a la expresión de relación de potencias sea más cercana a la realidad. Los puntos de funcionamiento 1 y 4 no son buenos referentes del funcionamiento de la práctica, los balances de potencia son inaceptables. El punto donde la relación de potencias mejor se aproxima al deslizamiento es el punto 5, en el cual la eficiencia es la mayor y los valores son $\frac{P_r}{P_e} = 0,73$ y $g = 0,69$.

6.4. Flujo de reactiva

Como fue mencionado anteriormente, resultó de interés estudiar cómo se reparte la potencia reactiva que magnetiza la máquina entre las dos alimentaciones independientes.

Para realizar este ensayo se puso a funcionar el sistema como generador, manteniendo fijo el *setpoint* del variador, las alimentaciones de la máquina de continua, y la tensión del rotor.

Los valores que se mantuvieron fijos durante el ensayo son los siguientes:

V_a (V)	I_a (A)	i_f (A)	Velocidad (rpm)	f_r (Hz)
60,8	3,2	1,4	276,6	40,8

Una vez acoplado el sistema, se varió la tensión de alimentación del estator con el regulador para observar los puntos deseados. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

Nro	U_e prom. (V)	P_e total (W)	Q_e total (VAr)	I_e (A)	U_r prom. (V)	P_r total (W)	Q_r total (VAr)	I_r (A)	$P_e + P_r$ (W)	$Q_e + Q_r$ (VAr)	$\frac{P_r}{P_e}$
1	44,4	-465	11	6,0	28,8	556	546	15,6	91	557	1,2
2	50,8	-530	111	6,2	28,8	608	458	15,3	78	569	1,2
3	67,4	-542	222	5,0	29,3	543	201	11,4	1	423	1,1
4	75,1	-619	427	5,8	29,3	690	121	13,8	71	548	1,0
5	82,9	-631	544	5,8	29,7	635	20	12,4	4	564	1,1
6	95,9	-644	896	6,6	29,9	710	-165	14,1	66	731	1,0

Tabla 6.6: Ensayo de flujo de reactiva - MIDA generador sub-sincrónico.

Observando los valores de las potencias reactivas, se puede ver que para tensiones de estator bajas, la mayor parte la reactiva es aportada por el rotor y un poco por el estator. A medida que la tensión del estator aumenta, la reactiva pasa a distribuirse más equitativamente. Al seguir aumentando, cada vez más reactiva empieza a ser aportada por el estator y menos por el rotor, hasta que a partir de determinada tensión el estator entrega reactiva no solo a la máquina sino también al rotor.

Para entender este fenómeno se utilizará un modelo eléctrico simplificado de la máquina. Si se dejan dentro del modelo solo las reactancias, que son los componentes que tienen un efecto predominante en el funcionamiento de la misma, se obtiene el modelo de la figura 6.5.

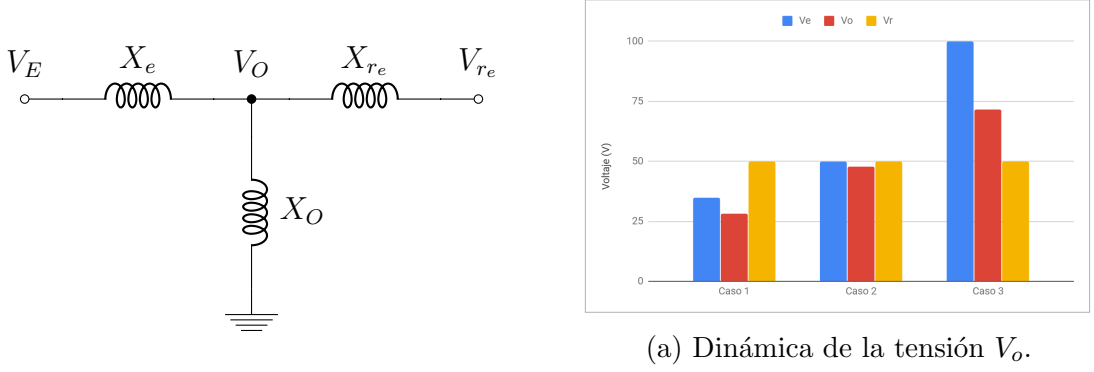


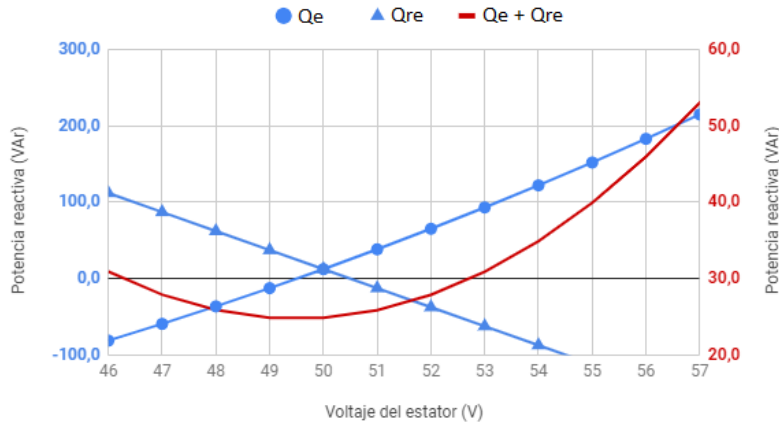
Figura 6.5: Modelo simplificado de MIDA - Reactancias en T.

Dejando la tensión de rotor fija, al variar la tensión de estator la tensión del punto medio (V_o) se comporta según la dinámica presentada en la figura 6.5a².

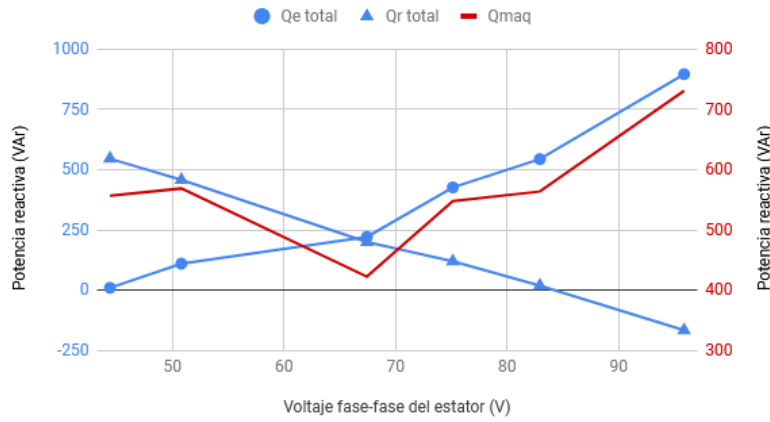
En el caso 1, tanto la tensión de estator como la de rotor son mayores que la del punto medio por la que ambos entregan potencia reactiva. De todas formas, como V_{re} es mayor que V_e la alimentación del rotor entrega la mayor parte de la potencia. En el caso 2, las tensiones de rotor y estator son iguales, y la del punto medio un poco inferior a las dos para permitir el flujo de potencia. En este caso las dos alimentaciones entregan la misma potencia. En el tercer y último caso, la tensión de estator es tan alta que la tensión V_o es mayor que V_{re} , por lo que el flujo de potencia debe ser de V_o a V_{re} . Por lo tanto, la fuente del estator entrega toda la potencia para magnetizar la máquina y más, la cual sale por el rotor.

Para observar este comportamiento en base a las mediciones de la tabla 6.6, se graficó la potencia entregada por el estator, la entregada por el rotor y la suma de ambas, en función de la tensión del estator. Además, colocando en el modelo $X_e = 1 \Omega$, $X_{re} = 1 \Omega$, $X_o = 10 \Omega$, $V_{re} = 50 V$ y asumiendo $P = 0 W$ (implica que todas las tensiones están en fase, supuesto para simplificar las cuentas), se obtuvieron las gráficas de la figura 6.6.

²Los parámetros elegidos para este modelo son tales que muestren claramente los efectos que se desean observar y no necesariamente tienen relación con los parámetros medidos.



(a) Flujo de reactiva teórico.



(b) Flujo de reactiva ensayado.

Figura 6.6: Comparación entre flujos de reactiva teóricos y ensayados.

Antes de comenzar a analizar las figuras es importante aclarar que la comparación es cualitativa y no cuantitativa. El modelo utilizado es muy simplificado y sus valores fueron modificados de forma que quedaran expuestas las características de comportamiento que se deseaban observar.

La primera gran diferencia es que al suponer potencia activa nula en el modelo, la corriente disminuye y por lo tanto también la potencia reactiva en las ramas de cortocircuito. Esto hace que la reactiva sea mucho más alta en los ensayos que en el modelo. Otra gran diferencia que se puede apreciar es el rango de voltajes en los que se da este comportamiento: en el ensayo hay una diferencia de 40 V aproximadamente entre que la reactiva del estator es 0 VAr y la del rotor es 0 VAr, mientras que en el modelo la diferencia es tan solo de 1 V. La razón principal es que al tener más transmisión de potencia reactiva, se generan mayores caídas de tensión. Este fenómeno se ve reflejado en la ecuación de transferencia de potencia reactiva a través de una inductancia.

$$Q = \frac{U_1}{X} \cdot (U_1 - U_2 \cdot \cos(\delta))$$

La segunda razón es que al tener mayor potencia hay mayor corriente, lo que genera una caída de tensión más grande en las resistencias. Esta caída de tensión no fue tomada en cuenta en el modelo.

Más allá de las diferencias entre las gráficas de la figura 6.6, es evidente que ambas curvas poseen un comportamiento muy similar. A medida que la tensión del estator aumenta, potencia entregada por éste también lo hace. Con el aumento de la tensión de estator, comienza a disminuir la reactiva entregada por el rotor hasta el punto en que ambas son iguales. Cuando las potencias se igualan se tiene el punto de mínima reactiva. En el modelo, el punto se alcanza cuando las tensiones se igualan ya que éstas están en fase ($P = \frac{U_1 \cdot U_2}{X} \cdot \sin(\delta) = 0 \iff \delta = 0$ cuando $U_1, U_2, \frac{1}{x} \neq 0$), mientras que en los ensayos el punto de mínima reactiva no se alcanza exactamente cuando las tensiones se igualan (lo cual correspondería a $U_e = \frac{U_r}{n} = \frac{29,8}{0,49} = 60,1 \text{ V}$) ya que en este caso como hay transmisión de potencia activa las tensiones no están en fase. En el ensayo, este punto se da aproximadamente en $U_e = 67,4 \text{ V}$. Por último, a medida que la tensión de estator sigue aumentando, llega el punto en que es tan alta que hace que el estator entregue la reactiva de la máquina y también entregue reactiva por el rotor.

De esta forma, los tres casos analizados en la figura 6.5a se aprecian claramente en el comportamiento observado del sistema. En las primeras dos medidas a $44,4 \text{ V}$ y $50,8 \text{ V}$, el sistema se encuentra en el caso uno. En el tercer punto a $67,4 \text{ V}$ el sistema se encuentra muy cercano al caso 2. En el cuarto y quinto punto el sistema se encuentra en un análogo al caso 1, pero en este caso la tensión del estator es mayor a la del rotor y ambos entregan reactiva. El quinto punto está cercano a la transición, cuando la potencia reactiva por el rotor pasa a ser cero, y en el sexto se vuelve negativa.

Para terminar el análisis, hay un aspecto que se desea destacar de la tabla 6.6. Los generadores implementados con MIDAs pueden controlar la reactiva entregada o consumida a la red variando la tensión del rotor y el ángulo entre las tensiones. El sistema implementado no tiene estas prestaciones, sólo puede variar el módulo de la tensión del estator y no se puede controlar el ángulo entre las tensiones. De todas formas, era esperable ver un mayor control sobre la reactiva consumida al variar la tensión del estator. Al calcular el valor $Q_e + Q_r$ se tiene la potencia reactiva total entrante al sistema. Para los puntos 3 y 6 de la tabla, se observa un comportamiento más cercano a lo esperado, el punto 3 tiene la mínima reactiva consumida mientras que al imponer una tensión mayor, la reactiva consumida aumenta. Sin embargo, el resto de los puntos parece mantenerse dentro de un rango cercano a los 550 VAr , sin mostrar demasiada variación.

Capítulo 7

Diseño de la práctica

7.1. Apartado de seguridad

7.1.1. Layout sugerido

Dado que el grupo MIDA-MCC no puede ser desplazado, el layout de los equipos necesarios para la práctica debe ser dispuesto en torno al grupo. El layout sugerido está pensado para resultar práctico a la hora de tomar las medidas y maniobrar del sistema, siempre manteniendo los elementos de riesgo como partes rotantes o bornes expuestos lejos del espacio por donde se desplazan quienes desarrollan la práctica.

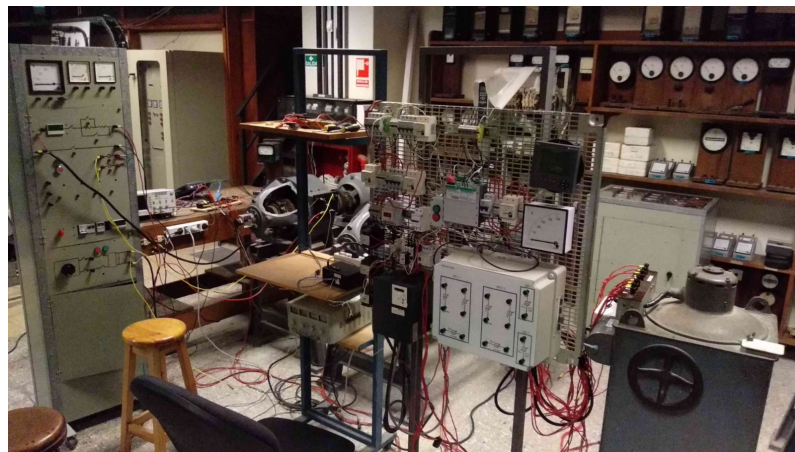


Figura 7.1: Panel de potencia DC, panel de medida y potencia AC, regulador de inducción.

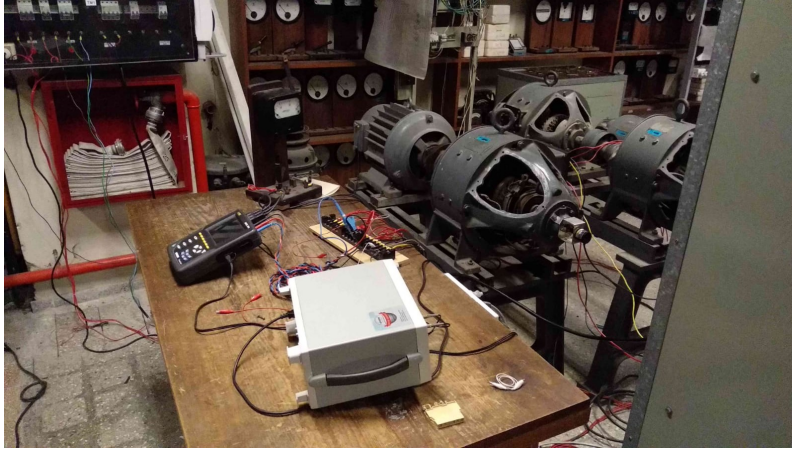


Figura 7.2: Mesa para apoyar instrumentos de medida.

Con este despliegue se tiene acceso a la mesa donde se pueden apoyar elementos de medida de forma cómoda y ordenada. Como en esta mesa deben estar los bornes donde se realizan las medidas de tensión y necesariamente tienen que estar energizados, es fundamental que la mesa esté despejada para evitar cortocircuitos o contactos por parte de los practicantes. Además, quien realiza el acople tiene perfecta visión del osciloscopio y del amperímetro de seguridad, pudiendo desacoplar rápidamente el sistema en caso de ser necesario. Por último, todas las medidas de voltaje, corriente, potencia, así como las modificaciones de los parámetros que sean necesarias (corriente de campo, voltaje de armadura, voltaje del estator, *setpoint* del variador) pueden realizarse desde una zona segura.

Bornera de medidas

A la hora del acople, deben medirse con el osciloscopio la tensión en el estator inducida desde el rotor y la tensión del regulador de inducción. Con el analizador de red AEMC se deben verificar las secuencias de fases entre estos bornes para garantizar que sean iguales. El mismo analizador debe luego conectarse en bornes del rotor para realizar las medidas de potencia.

Para tener accesibles estos bornes se suministra una bornera para mediciones. En la misma deben conectarse los tres bornes del estator, los tres bornes del rotor, los tres bornes del regulador, y todas las tierras y neutros del sistema. Para evitar fugas y conexiones repentinas a distinto potencial, todas las tierras y neutros deben estar unidas.

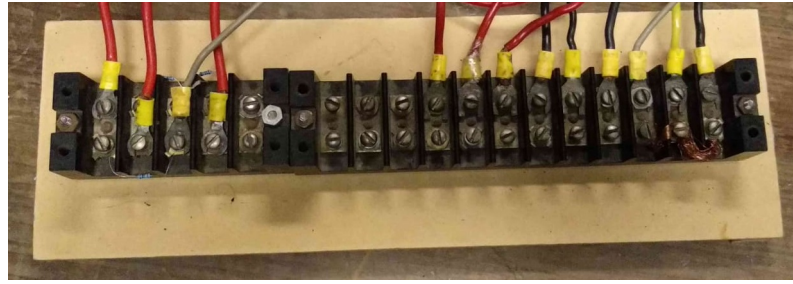


Figura 7.3: Bornera para conexión de puntos de medida de tensión.

Esta bornera permite que todos los bornes energizados a los que se necesita acceder estén contenidos, reduciendo al posibilidad de contactos directos con bornes energizados o cortocircuitos accidentales entre los bornes. También permite realizar las medidas pertinentes sin necesidad de realizar conexiones en los bornes energizados del motor con éste girando. No obstante, se debe tener el máximo cuidado al realizar estas medidas.

7.1.2. Elementos de protección personal (EPP)

Los EPP sugeridos para la práctica son guantes de tela y goma, y lentes de seguridad. Los guantes de tela y goma son guantes que ofrecen protección mecánica sin comprometer la movilidad de las manos, por lo que resultan cómodos. Además, si bien no son homologados como equipos de protección contra descargas eléctricas, la recubierta de goma ofrece una aislación extra a quienes los usan. Los lentes de seguridad son equipos fundamentales para la protección de los ojos contra proyección de partículas o elementos sólidos. Estos equipos son importantes, especialmente cuando hay piezas rotantes. Se debe tener en cuenta que no todos los lentes de seguridad son aptos para usar sobre los lentes para ver. Para estos casos, existen lentes espacialmente diseñados de forma de poder usar ambos lentes a la vez.



Figura 7.4: EPP sugeridos - Guantes de tela y goma, y lentes de seguridad.

7.2. Diagramas de conexiones

7.2.1. Bosquejo del sistema

En la figura a continuación se presenta el diagrama de conexiones del sistema.

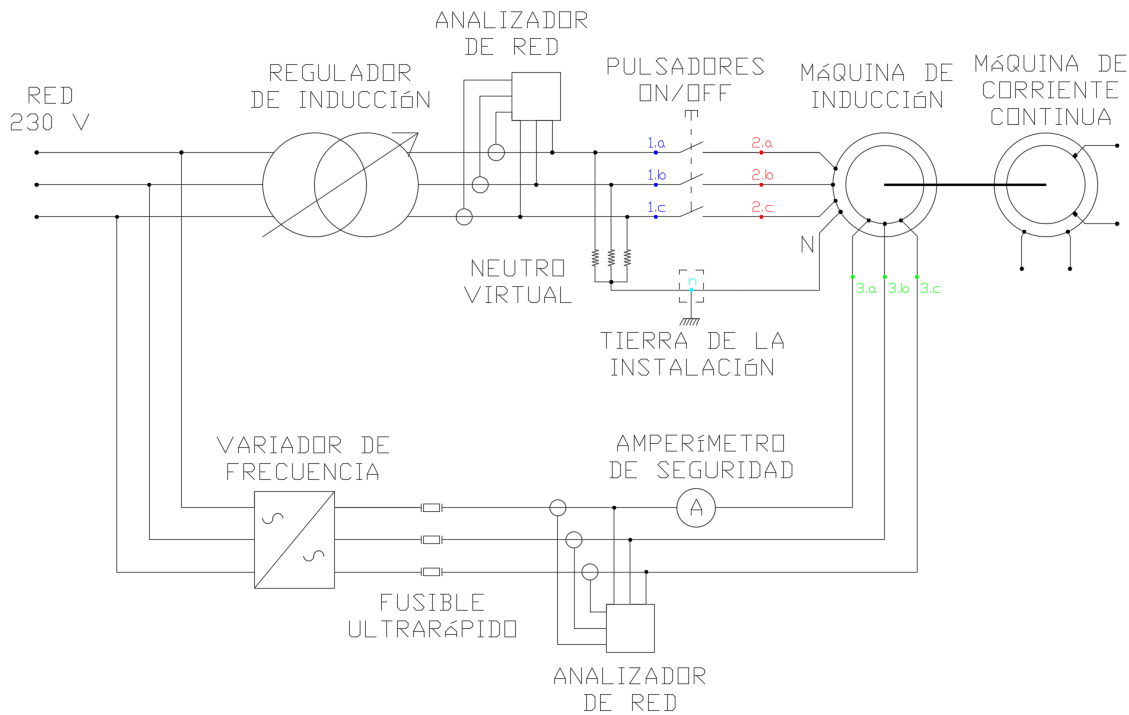


Figura 7.5: Diagrama de conexiones.

En este diagrama se encuentran representados los componentes fundamentales para la realización de la práctica.

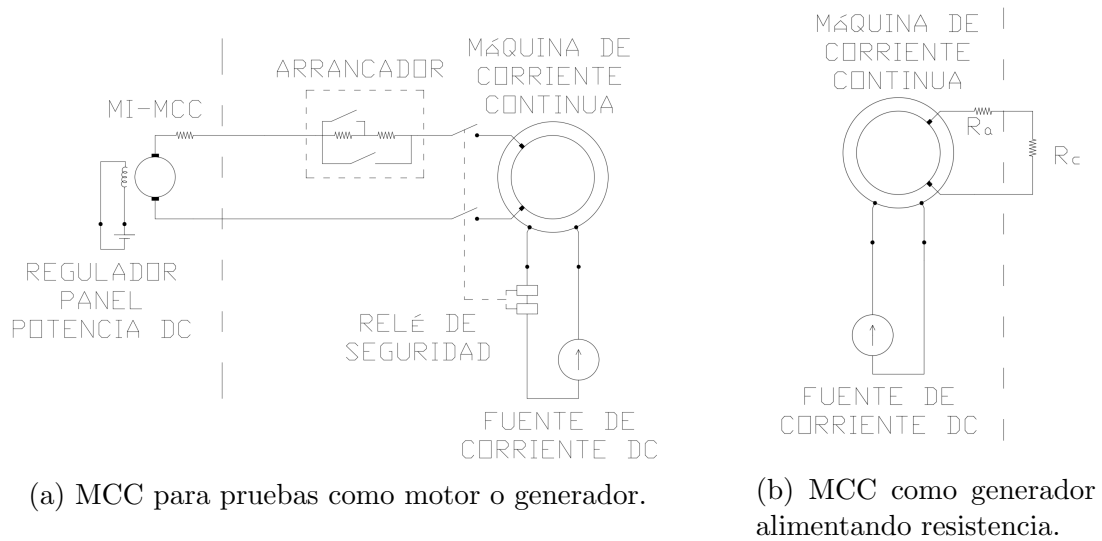


Figura 7.6: Posibles conexiones para la máquina de continua.

La máquina de continua tiene dos posibles configuraciones. Para realizar las pruebas como motor o como generador, la conexión es según el esquema 7.6a. Esta configuración le permite funcionar entregando o recibiendo potencia, con gran derivada en la curva $P(n)$ a bajas potencias.

Para realizar las pruebas de oscilaciones, se debe conectar según del diagrama 7.6b. Con esta configuración, rápidamente se puede aumentar o disminuir la carga, siendo la pendiente lo suficientemente pequeña para observar las oscilaciones pero estabilizando en mayor o menor medida al sistema.

Además de los componentes principales de potencia (regulador de inducción, variador de frecuencia, grupo MI-MCC) se necesitan diversos componentes de medida y protección para realizar la práctica.

Los componentes de protección son un amperímetro analógico en una de las fases del rotor y fusibles ultra rápidos a la salida del variador. Ambos componentes tienen como función proteger al variador. Los fusibles son ultra rápidos, ya que estos son los necesarios para protección de componentes a base de silicio, de corriente nominal 20 A. El amperímetro analógico sirve para tener un monitoreo constante de la corriente por el rotor y poder realizar la desconexión del sistema en caso de que se vuelva inestable. Este componente es de especial importancia si durante la práctica se desea estudiar el comportamiento oscilatorio y es crítico a la hora de realizar el acople del sistema. Dado que el voltaje que impone el variador está lejos de ser una sinusoidal, a veces sucede que se estima mal la fase de la fundamental y al realizar el acople resulta en una corriente muy elevada. Para eso, quien realiza el acople debe estar atento a la corriente, si la misma se dispara debe desacoplar inmediatamente el sistema.

Los componentes de medida serán presentados en la sección siguiente.

Es importante generar un neutro virtual a la salida del regulador de inducción al realizar el cableado. Para realizar el acople, debe medirse la tensión fase-neutro del estator y del regulador. El regulador no cuenta con neutro, por eso hay que generarlo. Como el estator se conecta en estrella, el neutro se encuentra accesible.

Conexión del sistema de control y medida

En la figura a continuación se presenta el diagrama de conexiones, tanto para el sistema de control y medida como para el variador de frecuencia.

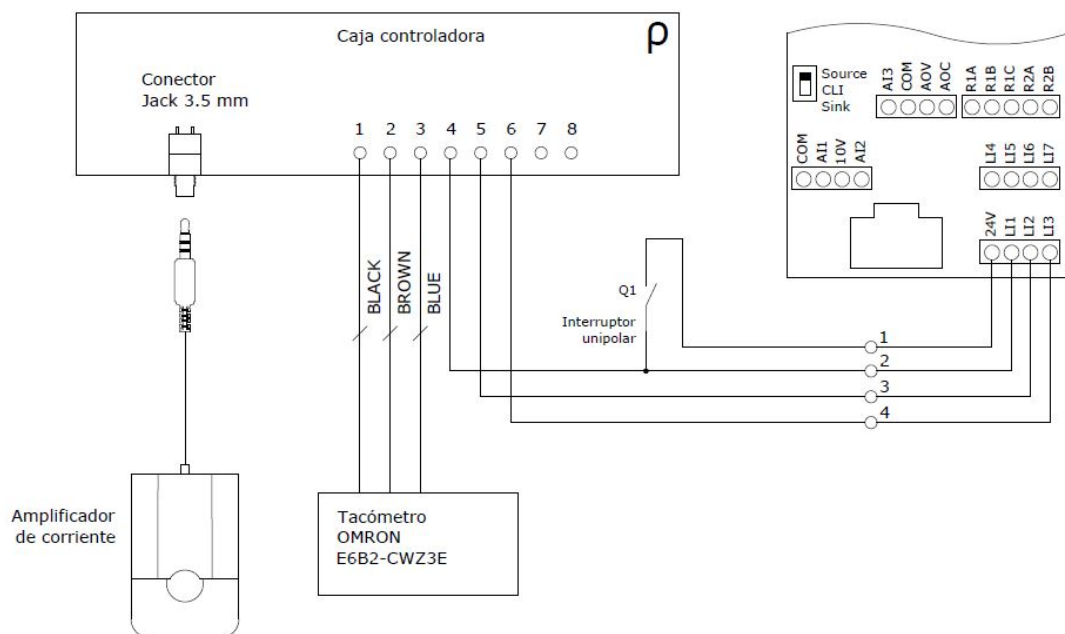


Figura 7.7: Pin Out - Caja de control.

Para los equipos de medida la conexión es sencilla. En el caso del transformador de corriente, el propio componente cuenta con un conector Jack de 3.5 mm, el clásico utilizado como conector de audio. Para el tacómetro, se necesita conectar uno de los canales en el pin 1, la alimentación en el pin 2 y el común en el pin 3.

El cableado hacia el variador consta de una señal “común” de 24 V pasando por una serie de contactos y retornando a las entradas del variador. La entrada *LI1* corresponde a un permiso de marcha hacia el variador. Esta entrada requiere un flanco de subida para permitir la marcha, lo cual se realiza con el interruptor Q1. La entrada *LI2* corresponde al aumento y *LI3* a la disminución del *setpoint* de frecuencia. La caja controladora cuenta con dos relés a efectos de generar estos pulsos con la propia tensión de control del variador. Se debe notar que la señal de 24 V hacia la caja se toma aguas abajo del interruptor. El objetivo de este conexionado

es evitar un arranque brusco al momento de permitir la marcha al variador.

7.3. Instrumentos

Los instrumentos necesarios para la realización de la práctica son los siguientes:

- Analizador CMvk2 - Analizador para estator.
- Analizador AEMC - Analizador para el rotor.
- Multímetros Fluke45 y Fluke376.
- Osciloscopio Gwistek GDS-2062.
- Tacómetro laser Testo 465.
- Encoder Omron E6B2-CWZ3 - Tacómetro generador de pulsos.
- Transformador de corriente Echun ECS1030-L72.

Es importante aclarar que si en algún momento se cambia el encoder Omron o el transformador de corriente Echun, deberá ser modificado el sistema de control acorde a las nuevas especificaciones de los equipos. El programa está diseñado para operar con un tacómetro x100 y un transformador 1:2000, por lo que de cambiarse alguno de estos parámetros se deberá modificar el código. Además, es posible que el programa no funcione con un tacómetro con mayor resolución. Por otro lado, la placa de medición de corriente también debe ser alterada en caso de cambio del transformador, ya que el diseño de la resistencia de medida depende de su relación de transformación.

7.4. Procedimientos para el manejo del sistema

7.4.1. Acoplamiento

En la práctica pueden realizarse tres acoplamientos distintos:

- Con motor detenido para estudio de la oscilación.
- Con motor girando para prueba como motor.
- Con motor girando para prueba como generador.

A continuación se describen cada uno de ellos paso a paso, partiendo siempre de todo el sistema desenergizado. Los acoples para sistema como motor y generador son iguales, pero invirtiendo el sentido de giro del rotor, por lo cual se describirá un

procedimiento solo y se explicará cómo realizar el otro.

Todos los puntos de medida serán referidos según la denominación de los mismos en la figura 7.5.

■ Acople con motor detenido para estudio de oscilaciones:

1. Cablear el sistema y verificar que el conexionado esté correcto.
2. Energizar el panel de potencia AC y equipos de medida.
3. Verificar que el contactor de acople esté abierto.
4. Verificar que las pinzas de corriente del analizador AEMC estén conectadas en las fases correctas, con el sentido de la flecha de la pinza apuntando hacia los bornes del rotor.
5. Verificar que esté conectado el neutro virtual a la salida del regulador de inducción en la bornera de medidas, y que el neutro virtual esté cortocircuitado con el neutro del estator y la tierra de la instalación.
6. Verificar con el analizador AEMC que las secuencias de fases de las tensiones del regulador de inducción (puntos de medida [1.a, 1.b, 1.c]) y la inducida en el estator a través del rotor (puntos de medida [2.a, 2.b, 2.c]) sean iguales.
7. Conectar uno de los canales del osciloscopio midiendo fase-neutro del regulador de inducción (puntos de medida [1.a, n]), y el otro canal midiendo fase neutro del estator (puntos de medida [2.a, n]).
8. Energizar el regulador de inducción y variador de frecuencia.
9. Verificar con el multímetro que la tensión entre fases del estator sea aproximadamente 60 V.
10. Verificar que la tensión entre fases a la salida del regulador de inducción esté entre 70 V y 80 V.
11. Setear las escalas del osciloscopio según el instructivo al final de esta sección.
12. En el momento que corresponda (según instructivo) acoplar el sistema, prestando atención al amperímetro de seguridad. Si el acoplamiento genera un pico de más de 15 A, desconectar inmediatamente y volver a intentar.
13. Una vez acoplado el sistema, aumentar 0,5 Hz el *setpoint* del variador para que el motor empiece a girar de forma continua y salga del punto no lineal del rozamiento.
14. Verificar que la potencia por el rotor sea entrante al motor.

Para los puntos 6 y 8, es fundamental que las fases de cada uno de los bornes a medir estén conectados de manera correcta, garantizando que el punto 1.a se acople con el 2.a, el 1.b con el 2.b, y el 1.c con el 2.c. Para esto, se tiene tener especial cuidado a la hora de conectar la bornera de medidas, prestando atención a que el

borne E1 de la bornera corresponda efectivamente con el borne E1 del motor, y así para el resto de los bornes.

- Acople con máquina girando, MIDA generador:
 1. Conectar el sistema y verificar que el conexionado esté correcto.
 2. Verificar que la fuente de continua que alimenta el campo de la máquina de continua pase por los relé de seguridad de pérdida de campo del panel de potencia DC.
 3. Verificar que la alimentación DC que viene del tablero pase por el circuito de arranque y seguridad contra pérdida de campo del panel de potencia DC.
 4. Energizar el panel de potencia AC, el panel de potencia DC y equipos de medida.
 5. Verificar que el contactor de acople esté abierto.
 6. Verificar que la tensión de campo del grupo MI-MCC sea 0.
 7. Verificar que las pinzas de corriente del analizador AEMC estén conectadas en las fases correctas, con el sentido de la flecha de la pinza apuntando hacia los bornes del rotor.
 8. Verificar que esté conectado el neutro virtual a la salida del regulador de inducción en la bornera de medidas, y que el neutro virtual esté cortocircuitado con el neutro del estator y la tierra de la instalación.
 9. Verificar con el analizador AEMC que las secuencias de fases de las tensiones del regulador de inducción (puntos de medida [1.a, 1.b, 1.c]) y la inducida en el estator a través del rotor (puntos de medida [2.a, 2.b, 2.c]) sean iguales.
 10. Conectar uno de los canales del osciloscopio midiendo fase-neutro del regulador de inducción (puntos de medida [1.a, n]), y el otro canal midiendo fase neutro del estator (puntos de medida [2.a, n]).
 11. Energizar el regulador de inducción y variador de frecuencia.
 12. Verificar con el multímetro que la tensión entre fases del estator sea aproximadamente 60 V.
 13. Verificar que la tensión entre fases a la salida del regulador de inducción esté entre 70 V y 80 V.
 14. Setear las escalas del osciloscopio según el instructivo al final de esta sección.
 15. Colocar la fuente de continua que alimenta el campo de la máquina de continua como fuente de corriente, en el valor de corriente correspondiente.
 16. Aumentar la tensión con el regulador del tablero de potencia DC que alimenta el campo del generador de continua, hasta que la tensión de armadura sea 60 V_{DC} .

17. Esperar hasta que termine la secuencia de arranque.
18. Variar la tensión de campo de la máquina de continua hasta que la velocidad del rotor sea aproximadamente 300 rpm.
19. Fijar el *setpoint* de frecuencia del variador en 40 Hz y comparar la frecuencia de ambas señales observadas en el osciloscopio según instructivo a continuación. Si las frecuencias no son iguales, desacoplar la máquina, quitar la alimentación de armadura de la máquina de continua, apagar la fuente de corriente del campo, invertir el sentido de la corriente de campo y energizar nuevamente. Luego, repetir desde el paso 16.
20. En el momento que corresponda (según instructivo) acoplar el sistema, prestando atención al amperímetro de seguridad. Si el acoplamiento genera un pico de más de 15 A , desconectar inmediatamente y volver a intentar.
21. Una vez acoplado el sistema, aumentar el *setpoint* del variador de forma que la máquina de continua consuma al menos 1 A .
22. Verificar que la potencia por el rotor de la MIDA sea entrante al motor.

Para realizar el acoplamiento con la MIDA como motor, en el punto 19 setear la frecuencia del variador en 60 Hz en vez de 40 Hz .

Seteo de escalas del osciloscopio y verificación de frecuencias

Para el correcto seteo de las escalas del osciloscopio, se debe poner la escala de acorde al valor que tenga la sonda. En la práctica, por las magnitudes de voltaje que se manejarán, la sonda debe colocarse en $\times 10$. Por lo cual se deberá presionar el botón de los canales y configurar las escalas a sonda $\times 10$.

Para realizar el acople, la fase de las fundamentales debe coincidir. Ya que la señal impuesta por el variador no es sinusoidal, apreciar la fase de la fundamental no es intuitivo. Para lograr verla, se debe aumentar la cantidad de voltios por división del canal que mide la tensión del variador y bajar el "0" de la gráfica. Al hacerlo, se observarán unos picos de tensión muy elevados y se podrá ver la fase de la fundamental de la señal.

A continuación se muestran dos figuras con una comparativa entre el momento correcto e incorrecto para acoplar.

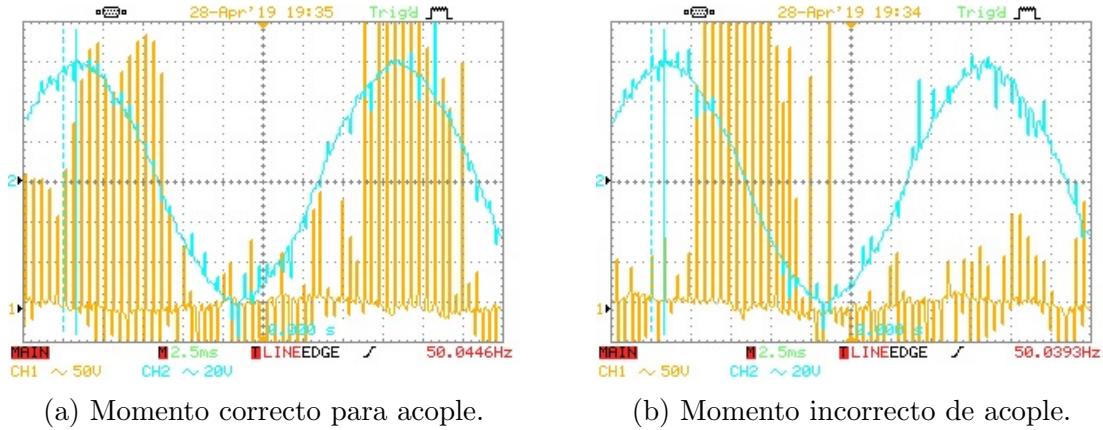


Figura 7.8: Verificación de fases para acople.

Observar en la figura 7.8a que los picos de la tensión inducida en el estator a través del rotor llegan a tener más de 350 V.

En el caso de acople como motor/generador, se debe setear previamente el osciloscopio para verificar la frecuencia de las señales. Como el acople se hace con el rotor girando, la frecuencia de la tensión inducida en el estator será la frecuencia impuesta por el variador, sumando o restando la frecuencia de giro del rotor dependiendo del sentido del giro. Como la frecuencia del regulador siempre será de 50 Hz, se debe verificar que la frecuencia de la tensión inducida también lo sea.

Para poder visualizar esto, se deberá llevar la escala a $\frac{5V}{div}$ del canal que mide la tensión del estator para poder observar una sinusoidal presente en la señal inducida en el estator que tiene la frecuencia de la fundamental (figura 7.9, curva roja). Si la frecuencia de esta onda coincide con la de la red, se podrá colocar las escalas del osciloscopio para ver la forma de onda descrita en la figura 7.8 y proceder a acoplar. De lo contrario, se debe invertir el sentido de giro de la máquina y volver a repetir este paso.

A continuación se presentan dos figuras donde se muestran estos casos, la primera con frecuencia correcta y la segunda incorrecta, donde se deberá corregir antes de acoplar.

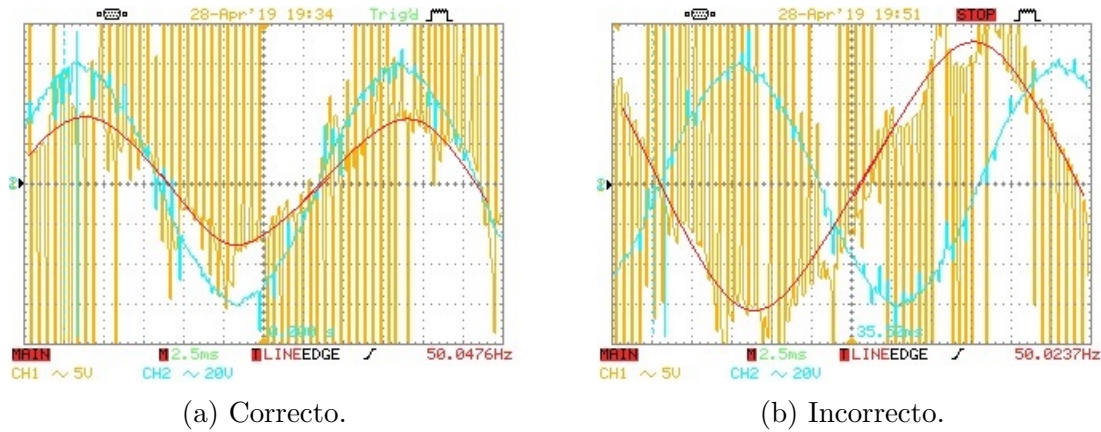


Figura 7.9: Verificación de frecuencias para acople.

En las figuras 7.9b y 7.9a se aprecia resaltada con rojo la sinusoidal presente en la tensión inducida en el estator. En la figura 7.9a, la frecuencia de la curva roja es igual a la de la curva turquesa, la cual mide la tensión fase neutro del regulador de inducción. En la figura 7.9b, la frecuencia de la curva roja es menor. Observar en esta gráfica que el período de la curva roja es aproximadamente 35 ms , lo cual corresponde a una frecuencia de 29 Hz . Esto se debe a que el motor giraba a 5 Hz y la frecuencia del variador era 40 Hz , por lo que $40 - 2.5 = 30^1$.

7.4.2. Pruebas como motor

Para realizar las pruebas como motor, dado que se conecta la máquina de continua de forma que estabilice al sistema, no hace falta que el control esté operativo. Además, no se presentan inconvenientes para subir o bajar la velocidad del sistema. La precaución que sí se debe tener es que la potencia por el variador sea saliente hacia el motor. Como se explicó en el capítulo 5.1, para garantizar que esta condición se cumpla la velocidad de la MIDA debe estar por encima de n_o . Dentro del instructivo de acople ya está contemplado que la MIDA quede operando a una velocidad por encima de este valor. Si se desea aumentar la velocidad, como la pendiente de la curva $P(n)$ es grande, muy rápidamente se llegará a los valores nominales de la máquina. Para evitar esto, se debe ir alterando la alimentación de la máquina de continua de forma que el valor de n_o aumente. Para realizarlo hay que aumentar el *setpoint* del variador hasta alcanzar unos 15 A y luego se debe aumentar V_a o disminuir i_f , controlando que la máquina de continua siempre reciba potencia. Cuando la potencia sea cercana a cero, se vuelve a aumentar la velocidad. Para disminuir la velocidad se repite el proceso inverso.

7.4.3. Pruebas como generador

Al igual que con las pruebas como motor, no se necesita el control para realizar las pruebas como generador. El sistema es igualmente estable, por lo que tampoco se

¹Hay que tener en cuenta la cantidad de pares de polos de la máquina

corre riesgo de inestabilizar el sistema al subir o bajar la velocidad. El cuidado que se debe tener para subir o bajar la velocidad es el mismo, al aumentar la velocidad, lo cual implica disminuir el *setpoint* ya que para este caso se trabaja con $f_r < 50 \text{ Hz}$, se debe cuidar de no alcanzar n_0 . A medida que se aumenta la velocidad, la potencia por la máquina de continua disminuye y cuando está cerca de cero, se debe aumentar V_a para volver a tener margen de variación. De la misma manera que en el caso anterior, si se desea bajar la velocidad se debe repetir el proceso inverso.

7.4.4. Estudio del comportamiento oscilatorio

Para el estudio del comportamiento oscilatorio se buscará tener el sistema en una condición controladamente inestable. Se trabajará con el sistema oscilando como se puede ver en la figura 6.4, por lo que se debe prestar especial atención al valor de pico de la corriente I_{RMS} para que no se dispare y supere los valores nominales de los equipos.

En este caso, se utilizará por momentos el sistema de control diseñado para estabilizar el sistema. El mismo puede ser utilizado para llevar el sistema a una condición estable o para disminuir levemente la oscilación. La caja de control implementada cuenta con un interruptor que permite activar y desactivar fácilmente el control.

Para lograr ver el comportamiento oscilatorio del sistema, se deberá realizar un acople con el motor detenido, según lo explicado en 7.4.1, con el sistema de control activado. Si el control presenta un comportamiento no deseado al energizar el variador, se debe comenzar con el control desconectado hasta que esté el motor girando. Una vez realizado el acople, se debe aumentar la frecuencia de salida del variador utilizando los botones de la caja. Se debe trabajar en la condición de $f_r > 50 \text{ Hz}$, debido a que el variador no es capaz de recibir potencia desde el motor, en caso contrario se daña el equipo.

Una vez alcanzada una frecuencia de aproximadamente 60 Hz a la salida del variador, se procede a desactivar el control para permitir las oscilaciones del sistema. Para llevar el sistema a un comportamiento oscilatorio, basta con aumentar o disminuir levemente la frecuencia de salida del variador. En este punto se vuelve a resaltar la importancia de monitorear la corriente del rotor para proteger los equipos.

Utilizando la función de *Serial Plotter* del Arduino, se podrá visualizar en tiempo real la corriente por el rotor y la velocidad de giro del motor.

7.5. Puntos de funcionamiento a analizar en la práctica

Los puntos de funcionamiento a analizar en la práctica son 2, con posibilidad de analizar a la máquina en vacío para estudiar el comportamiento oscilatorio.

Uno de los puntos a estudiar es a la MIDA funcionando como motor sub sincrónico. Esto significa que la velocidad mecánica del rotor es menor a $\frac{f_s}{p}$, siendo f_s la frecuencia de giro de campo del estator y p la cantidad de pares de polos de la máquina. Para este motor, con una red de 50 Hz y 2 pares de polos, motor sub sincrónico implica una velocidad menor a 1500 rpm . La velocidad a la que se realizarán los ensayos es 300 rpm , seteando el variador de frecuencia en 60 Hz . En este punto solo se realizará un estudio de balance de potencias para corroborar que los resultados de los ensayos al motor sean satisfactorios ya que es en la prueba como generador, por tener a la máquina de continua aportando la potencia de las pérdidas, que se puede apreciar mejor las propiedades de la teoría que desprecia las pérdidas.

El segundo punto de funcionamiento a estudiar en la práctica es a la MIDA como generador sub sincrónico, es decir, generando energía a una velocidad menor a 1500 rpm . La velocidad a la que se realizarán los ensayos también es 300 rpm (girando en sentido contrario que el caso anterior), con el *setpoint* del variador en 40 Hz . En este punto es donde se realizarán la mayor cantidad de observaciones. Lo primero y más importante, es corroborar que la velocidad es controlable con el *setpoint* del variador. Si bien esta propiedad puede apreciarse también funcionando como motor, es la propiedad de poder generar energía controlando su velocidad la que hace que la MIDA sea una tecnología viable para la generación eólica, y por lo tanto hace que valga la pena ser estudiada.

Por otro lado, como la máquina de continua es quien aporta las pérdidas, se puede trabajar en puntos de menor potencia y por lo tanto menor corriente. Al tener menor corriente, las pérdidas disminuyen y se puede apreciar mejor la relación teórica $-\frac{P_r}{P_e} = g$.

Capítulo 8

Conclusiones y pendientes

8.1. Conclusiones

En el presente Proyecto se estudió el funcionamiento de una máquina de inducción doblemente alimentada. Dado que no se trata de un motor convencional y la necesidad de contar con el modelo completo de la máquina con el mayor grado de detalle posible, se desarrolló un procedimiento para obtener cada uno de los parámetros del equipo, en especial las reactancias de cortocircuito independientes entre ellas. De esta manera, se realizó el modelo T completo de la máquina. Una vez que se tuvo el sistema modelado y se realizaron los cálculos para la verificación del modelo, se concluyó que los ensayos desarrollados para la obtención de estos parámetros son válidos ya que los resultados se encuentran dentro de los rangos aceptables.

Se estudió de manera práctica el funcionamiento y configuración de los variadores de frecuencia involucrados. Para ello se debió aprender a configurar un variador de frecuencia. Si bien a priori parece algo sencillo, la cantidad de parámetros y prestaciones de los convertidores lo hacen algo desafiante. En particular, se analizó como modificar la curva $V(f)$ de salida del equipo. En este proceso se realizaron una serie de pruebas iterativas para determinar los parámetros que permiten ubicar dicha curva en los puntos buscados. Al realizar el cambio de variador, se identificó que los distintos convertidores cuentan con las mismas funcionalidades en cuanto al manejo de esta curva. Por lo tanto, si bien cada variador (o fabricante) tiene su propio sistema de configuración, estos permiten modificar estas curvas al punto requerido por el usuario resultando compatibles unos con otros.

Se debió analizar el sistema desde el punto de vista de la seguridad del circuito para garantizar el funcionamiento del mismo y colocar los dispositivos de protección correspondientes. Este estudio concluyó con la instalación de fusibles ultra-rápidos a la salida del variador debido a que era posible el flujo de potencia hacia el variador viniendo del estator. Esta implementación de protecciones es poco común pero fundamental para esta aplicación, resaltando la importancia del diseño de las protecciones acorde a cada instalación.

Durante la práctica se encontró un comportamiento oscilatorio que no había sido

previsto en el análisis teórico. Las oscilaciones podían hacer que se excedieran los ratings de la máquina, por lo que resulta importante a la hora de implementar un sistema la precaución ante posibles eventos no contemplados por la teoría. En la realidad hay muchas más variables involucradas que en los modelos matemáticos simplificados, por lo que la teoría no puede contemplar todos los escenarios posibles.

Se realizó un análisis del comportamiento oscilatorio del sistema MIDA-MCC donde se pudo identificar la naturaleza de las oscilaciones. A partir de ello, se desarrolló un sistema de control a efectos de mantener el sistema estable. Sin este sistema no hubiera sido posible realizar las mediciones necesarias para el Proyecto de manera precisa ni segura. Por lo tanto se resalta la importancia del entendimiento de los fenómenos oscilatorios para el control de los mismos.

Se trabajó principalmente con un sistema MIDA-MCC de ejes acoplados, utilizando la máquina de continua como carga y como motor de arrastre, según el punto de funcionamiento estudiado. Dadas las oscilaciones encontradas en el sistema y observando el efecto que la conexión de la MCC tenía sobre el mismo, se estudió que factor era el responsable de la diferencia en estabilidad entre conexiones. Al llegar a que era la pendiente de la curva $P(n)$ de la MCC, se desarrolló un conexionado capaz de brindar las prestaciones requeridas por el sistema asegurando la estabilidad del mismo. Para llegar a este resultado, se realizaron varias iteraciones teórico-prácticas, por lo que se concluye que las pruebas prácticas sobre un sistema nuevo, así como el análisis de los resultados, son esenciales para la optimización del funcionamiento del mismo.

Finalmente, como era el objetivo práctico del Proyecto, se diseñó una práctica de laboratorio para el curso *Taller de Maquinas Eléctricas* de la Facultad de Ingeniería, UdelAR. La misma permite al estudiante analizar distintos puntos de funcionamiento de la MIDA y de fijar conceptos de máquinas eléctricas mediante observaciones prácticas. Además, el sistema de control desarrollado permite el estudio de las oscilaciones, lo cual ayuda al estudiante a entender que el régimen estacionario de un sistema no es siempre una cualidad garantizada y que se debe actuar de forma activa para tener sistemas estables. Por estas razones, la práctica desarrollada ayudará al estudiante en el crecimiento profesional, tanto en conceptos específicos como lo son las MIDA como en conceptos generales como lo es la importancia y complejidad de la estabilidad de los sistemas.

8.2. Pendientes

Modelo matemático y simulación

Uno de los pendientes que le queda a este Proyecto es el modelado matemático del comportamiento dinámico junto con simulaciones para poder demostrar que las oscilaciones son causadas efectivamente por la teoría planteada. A continuación se presentan los avances realizados sobre estos puntos:

Del modelo del sistema, se obtienen las siguientes 3 ecuaciones:

$$\begin{aligned} 1) I_s^s &= \frac{V_s^s - V^*}{R_s^s + j\omega_s L_s^s} \\ 2) I_r^s &= \frac{\frac{V_r^s}{s} - V^*}{\frac{R_r^s}{s} + j\omega_s L_s^s} \\ 3) (I_s^s + I_r^s) &= (R_o^s || j\omega_s L_o^s) \end{aligned}$$

Donde R_s^s y $\frac{R_r^s}{s}$ son las resistencias de los bobinados visto desde el estator, L_s^s y L_r^s son las inductancias de fugas de los bobinados visto desde el estator, y $R_o^s || j\omega_s L_o^s$ es la impedancia de vacío de la máquina, vista desde el estator.

De la máquina continua acoplada al eje de la MIDA como generador, se obtiene:

$$\begin{aligned} 4) E &= kn_m I_f \\ 5) I_{sh} &= \frac{E - V_{sh}}{R_{sh}} \\ 6) P_{Mcc} &= I_{sh} E = \frac{E^2 - EV_{sh}}{R_{sh}} \\ 6) P_{Mcc} &= \frac{(kI_f)^2}{R_{sh}} [n_m^2 - \frac{Vn_m}{kI_f}] \end{aligned}$$

La ecuación 4) hace referencia al voltaje inducido en la armadura dada la velocidad mecánica de rotación n_m y la corriente de armadura I_f . La ecuación 5) es la ecuación por la armadura dado la diferencia de tensión entre lo inducido y en los bornes de la máquina, dividido la resistencia de armadura R_{sh} . Luego simplemente se expresa la ecuación de la potencia entregada por la máquina de continua.

Ahora se expresa el par que realiza la MIDA. Para el análisis matemático se tendrá en cuenta la variación de corriente por lo que no se utilizará la ecuación 6.1 presentada en el capítulo 8. Se sabe que el trabajo que realiza un torque no nulo en un ciclo es:

$$W = 2M_{er} \cdot I_s^s \cdot I_r^e \cdot \text{sen}[(\omega_e - \omega_r - \Omega_m \cdot p)t + (\alpha_e - \alpha_r - \theta_o)]$$

Donde $\Omega_m = n_m/60$. Con el trabajo expresado se puede expresar el par como:

$$7)\tau(t) = \frac{\partial W}{\partial \gamma}|_{I_s=cte; I_r=cte} + \frac{\partial W}{\partial I_e}|_{\gamma=cte; I_r=cte} + \frac{\partial W}{\partial I_r}|_{I_s=cte; \gamma=cte}$$

Finalmente, considerando la segunda cardinal en el eje y que el par realizado de la maquina continua se expresa como $\tau_{Mcc} = \frac{P_{Mcc}}{n_m}$:

$$8)J\dot{\Omega}_m = \tau_{Mcc} - \tau_{MIDA} - \beta\Omega_m$$

Esta ecuación considera los pares de las dos máquinas y las pedidas por fricción representada por β . Además, si se contemplan todas las ecuaciones anteriores se puede llegar a una expresión que solo dependa de los voltajes de entrada por el rotor y estator y también las frecuencias en ambos lados. Con estas 4 entradas se podrá determinar la velocidad de la máquina y con esta variación se determinará la variación de corriente que se genera en la inestabilidad.

Una vez obtenida esta ecuación, hay distintas herramientas que permiten la simulación del sistema, como por ejemplo el *SimuLink*.

Diferentes modos de funcionamiento

Realizar las pruebas como generador hiper-sincrónico tiene dos problemas: la velocidad a la que se debe realizar la prueba está por encima de la nominal del motor, y este modo de funcionamiento exige que la potencia sea entrante al variador. Como el sentido de la potencia es saliente de la máquina tanto por el estator como por el rotor mientras que la MIDA genera energía eléctrica, no hay forma de cambiar el flujo de potencia por el rotor para que el variador entregue potencia. Para salvar este problema, el variador debería tener la opción de conectar una resistencia de frenado, lo cual no es el caso para el ATV312. Como la mayoría de los variadores rectifican la red con un puente de diodos, la dirección de la potencia por este puente es unidireccional. Por lo tanto, todo ingreso de potencia resulta en el corte del puente de diodos y un aumento de la tensión en el bus de continua. Los variadores que tienen la posibilidad de conectar una resistencia de frenado cuentan con dos bornes conectados al bus de continua a través de un transistor de potencia, el cual conecta o desconecta la resistencia en base a la tensión del bus de continua del variador. De esta manera, la potencia entrante es disipada en la resistencia, mientras el variador mantiene el control de la frecuencia de salida y la tensión del bus de continua.

Las pruebas como motor hiper-sincrónico tampoco se realizaron para no superar la velocidad nominal de la máquina.

De estos problemas, el superar la velocidad nominal es el menor de ellos. Por lo tanto, de conseguirse un variador con resistencia de frenado, es probable que se pueda ensayar a la MIDA en sus 4 puntos de funcionamiento.

Aumento de la tensión de operación

Para asegurar la integridad de los equipos, se comenzó trabajando con tensiones menores a la nominal de los equipos. Esto no fue corregido durante la práctica, y al analizar los resultados se encontró que la eficiencia del sistema es muy mala. Teniendo el sistema con el nivel de estabilidad que se cuenta en la práctica, aumentar la tensión de operación ayudaría a aumentar la eficiencia del sistema y a observar mejor las características teóricas que desprecian las pérdidas.

Bibliografía

- [1] KUSIC, GEORGE; RANAYHOSSAINI, BEN; REKIEL, CHRIS y WARNER JOSEPH E. “Laboratory Experiments on a Doubly Fed Induction Generator (DFIG) for Wind Turbine Application”, *ASEE North Central Sectional Conference*, 2010.
- [2] SONG, YIPENG y BLAABJERG, FREDE, “Overview of DFIG-based Wind Power System Resonances Under Weak Networks”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32, 2017.
- [3] Material Teórico del curso *Maquinas Eléctricas*, Facultad de Ingeniería UdelaR, Montevideo, Uruguay, 2018. Disponible en: <https://eva.fing.edu.uy/course/view.php?id=515>
- [4] Material Teórico del curso de posgrado *Generación Eólica*, Facultad de Ingeniería UdelaR, Montevideo, Uruguay, 2018.
- [5] SANDOVAL TORRES, CINDA LUZ, Tesis Profesional “Variador de velocidad para motor trifásico de CA”, Universidad de las Américas, Puebla, México, 2005. Disponible en http://catarina.udlap.mx/u_dla/tales/documentos/lep/sandoval_t_cl/.
- [6] Automatismo Industrial, *Par motor, Par resistente*. Disponible en <https://automatismoindustrial.com/motores/1-3-3-motores-asincronos/par-motor-par-resistente/>

Apéndice A

Código del programa

Código principal

```
int botonUp = 5; //Pin de entrada boton AUMENTAR velocidad
int botonDown = 6; //Pin de entrada boton REDUCIR velocidad
int outUp = 7; //Pin salida rele AUMENTAR velocidad
int outDown = 8; //Pin salida rele REDUCIR velocidad
int analogPin = 1; //Pin analogico de señal del trafo de corriente
int botonControl = 4; //Pin que decide si hay control o no
//Constantes generales para RMS
unsigned long ti = 0;
unsigned long t1 = 0;
unsigned long t2 = 0;
unsigned long t3 = 0;
int CTratio = 2000;
float Rb = 100.3; //Burden resistor: Resistencia entre patas del sensor.
float Id;
float Irb;
float I;
float Ilast;
float Irms;
float Is;
float Iprom;
float Ipromlast;
float Ipromlast2;
float n;
int F = 0;
float S = 0;
float S1 = 0;
int n1 = 0;

//Constantes para el calculo de la VELOCIDAD
const byte pinEncoder = 2;
unsigned int cuentaRPM = 0;
```

```
float rpm = 0;
float Np = 0;
float dift = 0;
unsigned long trpm1 = 0;
unsigned long trpm2 = 0;
unsigned long dt = 0;
float acum = 0;
float Iacum = 0;
int up = 0;
int down = 0;

#define TIEMPO 50

//Constantes generales para botones
unsigned long tiBotones = 0;
int bandera = 0;
int botonesLast = 0;

void setup()
Serial.begin(9600);
pinMode (botonControl, INPUT);
pinMode (botonUp, INPUT);
pinMode (botonDown, INPUT);
pinMode (outUp, OUTPUT);
pinMode (outDown, OUTPUT);
digitalWrite(outUp, HIGH); // Reles activos por nivel bajo
digitalWrite(outDown, HIGH); // Reles activos por nivel bajo
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3), controlEncoder, RISING);

void loop() {
Id = analogRead(analogPin) - 512;
Irb = (Id * 5 / 1024) / Rb;
I = Irb * CTratio;
t2 = millis();
calcIrms();
control();
botones(t2, tiBotones, botonesLast );
Ilast = I;
dt = t2 - trpm1;
if ( TIEMPO ≤ dt) {
Np = float(cuentaRPM) / float(100);
cuentaRPM = 0;
dift = float(60000) / float(dt);
rpm = Np * dift;
```

```
trpm1 = t2;  
acum = acum * 0.95 + rpm * 0.05;  
}  
}
```

Código de las diferentes funciones

```

float sqrt2 = sqrt(2);
float sqrt2x2 = sqrt2 * 2;

float calcIrms() { // >><<
Id = analogRead(analogPin) - 505; //Leer entrada analógica centrada en 505
Irb = (Id * 5 / 1024); //Escalar la entrada a 5 V = 1024 según la resolución del
ADC
I = Irb * CTratio / Rb; //Calcular la corriente por el cable, según la corriente por
RB y la relacion de vueltas
n++;
S = S + I * I;
if ((I * Ilast != 0) && (n > 10) ) {
Irms = sqrt(S / n);
S = 0;
n = 0;
n1++;
Is = Is + Iacum;
Iacum = Iacum * 0.8 + 0.2 * Irms;
Serial.print(Iacum);
Serial.print();
Serial.print(Iprom);
Serial.print();
Serial.print(up);
Serial.print();
Serial.print(down);
Serial.print();
Serial.print(acum);
Serial.print();
Serial.println(t2);
}

Ilast = I;
return;
}

void control(){
if (n1 == 6) {
Iprom = Is / n1;
n1 = 0;
Is = 0;
S1++;
if ((digitalRead(botonControl) == HIGH)) { //Si presiono boton Control habilito
el control
if ((t2-ti>150) && (Iprom>1.1*Ipromlast2) && (bandera == 0)) {// apenas se
baja la velocidad lo que pasa es que hay un pico donde

```



```

// baja la corriente por lo actua el outUp sin que queramos
ti = millis(); // es por esto que decido esperar un tiempo para evitar el espurio
bandera = 1;
down=1;
}
if ((t2-ti>150) && (Iprom < 1.1*Ipromlast2) && (bandera == 1)) {
ti = millis();
bandera = 0;
up=1;
}
}
Ipromlast2=Ipromlast;
Ipromlast = Iprom;
}

return;
}

```

```

void controlEncoder()
{
  cuentaRPM ++;
}

```

// La idea del esta funcion es que si yo presiono un pulsador genere un pulso de 150ms y si lo mantengo pulsado generare n pulsos continuos de 100ms

```

void botones( unsigned long tboton, unsigned long tiboton, int botonLast) { //
if (((digitalRead(botonUp) == HIGH) && (digitalRead(botonDown) == HIGH))||
(tboton > (50 + tiboton)) ) { // si los dos botones estan pulsados o el pulso supero
los 100ms apago los rele y salgo
digitalWrite(outDown, HIGH );
digitalWrite(outUp, HIGH);
tiBotones =tboton;
botonesLast = 0;
up=0;
down=0;
return;
}
else if (((digitalRead(botonDown) == HIGH) ||(down==1)) && (digitalRead(botonUp)
== LOW) && (botonLast == 0) ) { //Si presiono solo el botonUp
digitalWrite(outDown, LOW); //Relés activos por nivel bajo
tiBotones = tboton;
botonesLast = 1;
}
}

```

```
return;
}
else if (((digitalRead(botonUp) == HIGH )||(up==1)) && (digitalRead(botonDown)
== LOW) && (botonLast == 0) ) { //Si presiono solo el botonDown
digitalWrite(outUp, LOW); //Relés activos por nivel bajo
tiBotones = tboton;
botonesLast = 1;

return;
}
}
```

Apéndice B

Datos de los componentes del equipo de control

Datos de la Arduino

- Microcontroller: ATmega32u4
- Operating Voltage: 5V
- Input Voltage (Recommended): 7-12V
- Input Voltage (limits): 6-20V
- Digital I/O Pins: 20
- PWM Channels: 7
- Analog Input Channels: 12
- DC Current per I/O Pin: 40 mA
- DC Current for 3.3V Pin: 50 mA
- Flash Memory: 32 KB (ATmega32u4) of which 4 KB used by bootloader
- SRAM: 2.5 KB (ATmega32u4)
- EEPROM: 1 KB (ATmega32u4)
- Clock Speed: 16 MHz
- Length: 68.6 mm
- Width: 53.3 mm
- Weight: 20 g

Datos del modulo de dos reles

- Voltaje de operación de 5 Vcc.

- Corriente de activación de 15 a 20 mA.
- 2 canales independientes, protegidos con opto acopladores.
- Voltaje máximo de carga en los relés de 250Vac x 10A o 30Vdc x 10A.
- Modo de funcionamiento enclave.
- Los 2 relés cuentan, cada uno con salidas NC y NA.
- Distancia de alcance de 15 a 30 metros.
- Indicación led para el estado de cada relé.
- Puede ser controlado directamente por circuitos lógicos.
- Terminales de entrada de señal lógica y alimentación con headers macho

Índice de tablas

3.1.	Pruebas configuración curva $V(f)$ VLT3000.	31
3.2.	Relevamiento de curva $V(f)$, configuraciones 1, 2, 6, 10.	32
3.3.	Configuración del variador ATV312.	33
3.4.	Ensayo relación de vueltas MI.	34
3.5.	Ensayo de relación de vueltas con voltaje distorsionado.	35
3.6.	Ensayos $\frac{V_r}{f_r}(\omega_r)$	36
3.7.	Relevamiento curva de magnetización.	38
4.1.	Ensayos resistencia del bobinado del estator.	45
4.2.	Resistencia bobinados del rotor.	45
4.3.	Ensayos de rotor y estator abierto.	47
4.4.	Ensayo de rotor bloqueado.	48
5.1.	Pruebas de configuración de máxima estabilidad.	54
5.2.	Datos del relevamiento de la curva $P(n)$, MCC generador con poca carga ($R_c = 66, 3\Omega$).	67
5.3.	Datos del relevamiento de la curva $P(n)$, MCC generador con máxima carga ($R_c = 19, 7\Omega$).	68
5.4.	Datos del relevamiento de la curva $P(n)$, MCC motor.	69
6.1.	Datos relevados durante prueba del sistema como motor.	77
6.2.	Cálculos de flujo de potencia - Motor sub-sincrónico.	78
6.3.	Medición de pérdidas mecánicas.	79
6.4.	Datos relevados durante prueba del sistema como generador sub- sincrónico.	80
6.5.	Cálculos de flujo de potencia - Generador sub-sincrónico.	80
6.6.	Ensayo de flujo de reactiva - MIDA generador sub-sincrónico.	82

Índice de figuras

2.1.	$C_p = f(\beta; \lambda)$ (fuente [4]).	14
2.2.	Modelo y curva característica de la máquina de inducción.	15
2.3.	Punto de funcionamiento MI (fuente [6]).	16
2.4.	Modelo de una máquina doblemente alimentada (fuente [4]).	17
2.5.	Modelado de componentes al mismo nivel de tensión (fuente [4]).	18
2.6.	Modelo simplificado de una MIDA a mismo nivel de tensión y frecuencia.	19
2.7.	Sentido de las potencias utilizado en el modelo.	20
3.1.	Diagrama de conexiones.	21
3.2.	Posibles conexiones para la máquina de continua.	23
3.3.	Variadores utilizados.	25
3.4.	Panel de potencia y control.	26
3.5.	Panel de potencia de corriente continua.	27
3.6.	Placa dañada del variador Danfoss.	29
3.7.	Fusibles ultra-rápidos para protección de VSD.	30
3.8.	Configuración control escalar Danfoss serie VLT3000.	31
3.9.	Curvas obtenidas variando parámetros 105, 109, 111.	32
3.10.	Tipos de curvas obtenidas del variador ATV312.	33
3.11.	Relación $U_{er} - f_{er}$	37
3.12.	Curva de magnetización.	38
3.13.	Variaciones de fase y módulo para sincronización.	42
4.1.	Modelo de la MIDA.	43
4.2.	Medición de resistencia en rotor.	46
4.3.	Circuito de ensayo a rotor abierto.	46
4.4.	Circuito de ensayo a estator abierto.	47
4.5.	Circuito de ensayo de rotor bloqueado.	48
4.6.	Simplificación en ensayo a rotor bloqueado.	48
5.1.	Sentido de las potencias utilizado en el modelo.	52
5.2.	Perturbación en torno a una velocidad de equilibrio.	55
5.3.	Tacómetro Omron.	57
5.4.	Medición de corriente - Sistema de control.	57
5.5.	Medidas de velocidad y $I_{RMS} - setpoint 60 Hz$	59
5.6.	Medida de corriente del estator.	60
5.7.	Medida de corriente con el sistema inestable.	60
5.8.	Corriente I_{RMS}	61

5.9. Control actuando y estabilizando el sistema - <i>setpoint</i> 60 Hz.	62
5.10. Máquina de corriente continua como carga.	63
5.11. Máquina de corriente continua funcionando como motor.	64
5.12. Curvas $P(n)$ cualitativas para la MCC como motor y generador. $i_f = 1, k = 1, R_a = 1, R_c = 10, V_a = 100$	66
5.13. Relevamiento de curva $P(n)$ para máquina de continua funcionando como generador entregando poca potencia.	67
5.14. Relevamiento de curva $P(n)$ para máquina de continua funcionando como generador entregando máxima potencia.	68
5.15. Relevamiento de curva $P(n)$ para máquina de continua funcionando como motor.	69
5.16. MCC para pruebas como motor o generador.	70
6.1. Sistema inestable.	74
6.2. Diagrama fasorial de velocidades, campos y torques.	75
6.3. Modelo simplificado de una MIDA a mismo nivel de tensión y frecuencia.	76
6.4. Velocidad del motor y corriente por el rotor durante oscilación - MIDA motor en vacío.	76
6.5. Modelo simplificado de MIDA - Reactancias en T.	83
6.6. Comparación entre flujos de reactiva teóricos y ensayados.	84
7.1. Panel de potencia DC, panel de medida y potencia AC, regulador de inducción.	87
7.2. Mesa para apoyar instrumentos de medida.	88
7.3. Bornera para conexión de puntos de medida de tensión.	89
7.4. EPP sugeridos - Guantes de tela y goma, y lentes de seguridad.	89
7.5. Diagrama de conexiones.	90
7.6. Posibles conexiones para la máquina de continua.	91
7.7. Pin Out - Caja de control.	92
7.8. Verificación de fases para acople.	97
7.9. Verificación de frecuencias para acople.	98