



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Elèctrica

**DISSENY I CONSTRUCCIÓ D'UN SISTEMA PER A
LA COMPROVACIÓ DE BOBINATS EN MÀQUINES
ELÈCTRIQUES**



Memòria i Annexos

Autor: Gerard Borrego Orpinell
Director: Ramon Bargalló Perpiñà
Convocatòria: Abril 2019



Sumari

SUMARI	2
1. GLOSSARI	4
2. INTRODUCCIÓ	5
2.1. Objectius del treball.....	5
3. MARC TEÒRIC	6
3.1. Generació de camp magnètic amb corrent continu	6
3.2. Esquema del bobinat	8
4. SIMULACIÓ MITJANÇANT FEMM	11
4.1. Recreació del motor	11
4.2. Selecció dels materials del motor	13
4.3. Simulació.....	15
5. ÚTIL DEL ROTOR	18
6. DISPOSITIU DE VERIFICACIÓ	21
6.1. Hardware	21
6.1.1. Sensors	21
6.1.2. Microcontrolador	22
6.1.3. LCD.....	23
6.1.4. Convertidor	24
6.2. Software.....	25
7. PROCÉS DE MUNTATGE	27
8. POSADA EN MARXA	32
9. ANÀLISI ECONÒMICA	36
9.1. Cost del dispositiu de verificació	36
9.2. Cost de fabricació actual.....	37
9.3. Cost de fabricació amb el dispositiu de verificació	38
9.4. Viabilitat	39
10. CONCLUSIONS	40
11. AGRAÏMENTS	41

12. ANNEXOS	42
12.1. Taula de resultats de les combinacions al bobinar	42
12.2. Codi del software del dispositiu amb Arduino IDE 1.5.7	44
12.3. Plànols del cablejat del dispositiu de verificació	53
12.4. Plànol de l'útil del rotor	54
13. BIBLIOGRAFIA	55

1. Glossari

q: Ranures/ pol i fase

Q: N° total de ranures

p: Parell de pols

m: N° de fases

N: N° d'espises del bobinat

i: Intensitat aplicada

R: Reluctància

A: Secció de pas

μ : Permeabilitat

μ_0 : Permeabilitat absoluta

μ_r : Permeabilitat relativa

Φ : Flux magnètic

B: Camp magnètic

l: Longitud de pas del flux magnètic

2. Introducció

Actualment, l'ús del motor elèctric és cada vegada més extens. En els últims anys hi ha hagut una revolució elèctrica que ha substituït molts dels antics motors de combustió en motors elèctrics de totes les varietats.

Podem trobar motors elèctrics de tota mena, motors síncrons, asíncrons, de corrent continu, n'hi ha de monofàsics, i també de trifàsics, tenim motors d'imants permanents i en tenim d'excitació rotòrica. Cada motor té el seu particular procés de fabricació i això ha fet que s'hagin anat formant empreses per tot el món especialitzades a fabricar un o uns motors en concret. El procés de fabricació d'aquests motors a mesura que passen els anys està cada cop més automatitzat i s'hi van afegint etapes que faran fer els processos de manera més ràpida i eficient.

2.1. Objectius del treball

L'objectiu d'aquest TFG és el disseny i la construcció d'un sistema per a la comprovació dels bobinats que permetrà verificar la correcta combinació dels diferents bobinats en el procés de fabricació d'un motor elèctric, concretament, del estator d'un motor síncron d'imants permanents.

En funció dels pols i de les ranures del motor síncron, el camp magnètic al voltant de les ranures tindrà uns pols nord i sud repartits de manera diferent. Aquests pols també dependran de la correcta connexió dels bobinats. A través de sensors s'ha aconseguit detectar la posició del camp magnètic per poder comprovar a través d'un microcontrolador si la configuració és l'adequada que, en cas afirmatiu, donarà el senyal per a poder seguir amb el procés de fabricació i, en cas negatiu, s'indicarà a través d'una pantalla quin ha sigut l'error en bobinar.

Aquest TFG engloba l'avaluació del camp magnètic d'un motor elèctric, l'elecció del hardware, el muntatge de tot el dispositiu de verificació, la creació del software i la programació de la pantalla de resultats.

3. Marc teòric

3.1. Generació de camp magnètic amb corrent continu

Tal com s'ha dit anteriorment, per tal de poder comprovar el correcte bobinat de l'estator, s'aplicarà un corrent continu a través de les fases.

A continuació s'explicarà el comportament magnètic al injectar corrent en una bobina enrotllada al voltant d'un nucli massís de ferro que conté un entreferro.

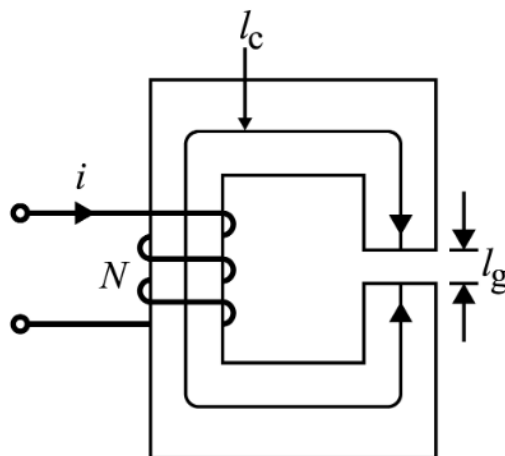


Figura 3.1. Nucli magnètic amb un entreferro d'aire (Font: allaboucircuits) [12]

En fer circular un corrent a través d'una bobina es genera una força magnetomotriu. Aquesta força electromotriu generarà un flux magnètic seguint la direcció segons la llei de la mà dreta. L'oposició al pas de flux magnètic se'n diu reluctància i aquesta dependrà de les característiques del circuit magnètic.

Observem que tenim els paràmetres de força magnetomotriu, flux magnètic i reluctància. Aquests paràmetres es poden entendre de manera anàloga a la tensió, intensitat i resistència en un circuit elèctric [1].

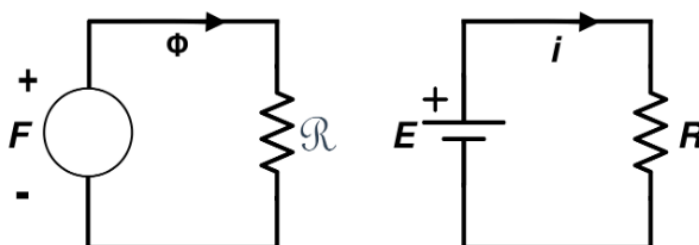


Figura 3.2. Equivalència circuit magnètic i circuit elèctric (Font: allaboucircuits) [12]

Aleshores, amb el circuit esmentat tindrem una força magnetomotriu que segons l'equació 3.1 dependrà del número d'espores del bobinat i de la intensitat aplicada.

$$F = N \cdot i \quad \text{Equació 3.1}$$

Segons l'equació 3.4 la reluctància del circuit magnètic serà la suma de la reluctància del ferro i la reluctància de l'entreferro. Com s'observa a l'equació 3.2 i 3.3, la reluctància dependrà de la longitud de pas del flux magnètic, la permeabilitat i la secció de pas. Aquesta permeabilitat pel cas del ferro serà el producte entre la permeabilitat absoluta i la permeabilitat relativa, mentre que pel cas de l'entreferro la permeabilitat serà igual a la permeabilitat absoluta.

$$R_{\text{ferro}} = \frac{l_c}{\mu \cdot A_{\text{ferro}}} = \frac{l_c}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A_{\text{ferro}}} \quad \text{Equació 3.2}$$

$$R_{\text{entreferro}} = \frac{l_g}{\mu_0 \cdot A_{\text{entreferro}}} \quad \text{Equació 3.3}$$

$$R = R_{\text{ferro}} + R_{\text{entreferro}} \quad \text{Equació 3.4}$$

El flux magnètic generat, com s'observa a l'equació 3.5, serà el quocient entre la força magnetomotriu i la reluctància. El flux magnètic també equival al producte del camp magnètic per la secció de pas.

$$\Phi = \frac{F}{R} = B \cdot A \quad \text{Equació 3.5}$$

En aquest cas, en tenir un circuit magnètic simplificat, podríem obtenir el camp magnètic de manera analítica mitjançant les equacions anteriors.

En el cas de tenir un circuit magnètic de més complexitat, com per exemple l'estator i rotor d'un motor elèctric, es podria utilitzar programes d'elements finits, per exemple el FEMM, per a obtenir els diferents camps i fluxos magnètics en el motor [3]. A l'apartat 4 *Simulació mitjançant FEMM*, s'explicarà de manera més detallada el procediment per a simular el comportament magnètic del motor a analitzar.

3.2. Esquema del bobinat

L'esquema del bobinat és la representació de les tres fases d'una xarxa trifàsica a través de les ranures de l'estator del motor.

Una xarxa trifàsica està composta per tres tensions alternes desfasades 120° cada una d'elles.

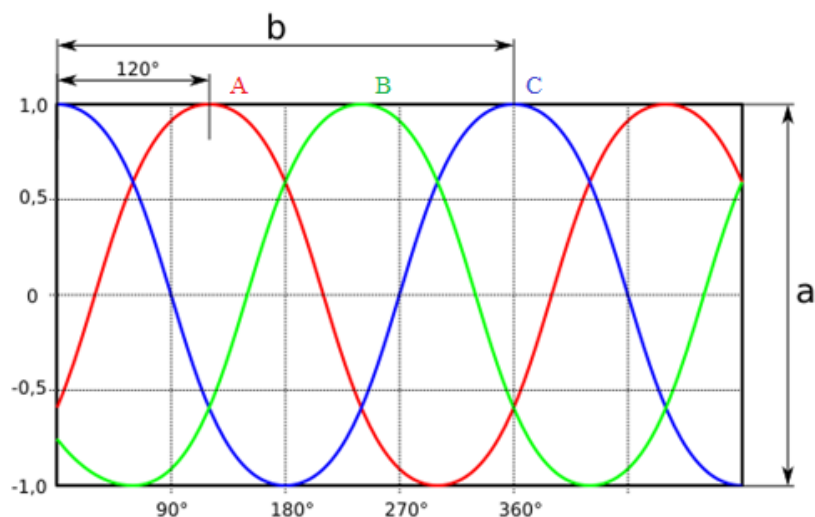


Figura 3.3. Sistema de tensions trifàsiques (Font: automatismosuets.wordpress) [5]

Aquestes tres línies de tensions trifàsiques alimentaran els bobinats A, B i C de la màquina síncrona. En el nostre cas el motor es connecta en estrella, aleshores els negatius dels bobinats de les tres fases van connectats.

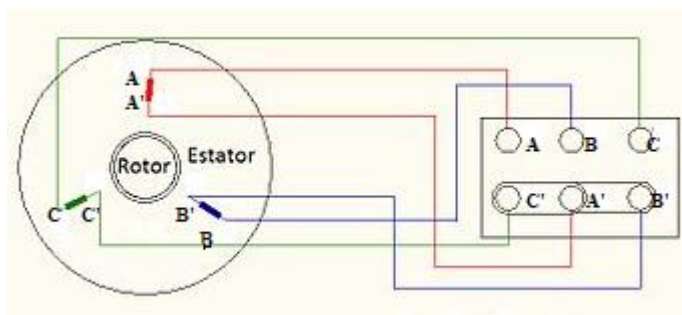


Figura 3.4. Esquema bàsic bobinat trifàsic estrella en el motor síncron (Font: wikipedia) [6]

La fàbrica on s'aplicarà el dispositiu, dissenya motors els estators dels quals tenen un conjunt de 12 ranures i 10 pols pel primer motor i 15 ranures i 10 pols pel segon motor.

En aquest projecte s'ha optat per elaborar un dispositiu que permeti analitzar els dos tipus de motors, però atès que únicament s'ha pogut subministrar el material per a l'anàlisi del motor de 12 ranures i 10 pols, es farà l'estudi del bobinat d'aquest motor en concret.

- Motor 1 (12 ranures i 10 pols)

Els paràmetres del bobinat són:

$$Yp = \frac{Q}{2 \cdot p} \quad \text{Equació 3.6}$$

Segons l'equació 4.6, $Yp = 1,2 > 1$, aleshores el bobinat és distribuït.

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} \quad \text{Equació 3.7}$$

Segons l'equació 3.7, les ranures per pol i per fase $q = 0,4 = 4/10$.

Al tenir un bobinat fraccionari, la manera d'obtenir la configuració de bobinats és la següent [3]:

Agafem el numerador del resultat de q , aquest serà el número total d'1's del procés de càlcul. El denominador menys el numerador serà el número total de 0's. El procediment per configurar les ranures en un bobinat fraccionari és el següent, repartim els quatre 1's del numerador a la primera fila d'un total de 10 columnes (denominador). Aleshores, anem col·locant a través de les files la configuració típica d'un bobinat trifàsic AC'BA'CB' entenent com A quan un bobinat entra cap a una ranura i A' quan surt d'una ranura. Els 1's i els 0's es poden repartir de la manera més adient, donant així totes les combinacions possibles.

Normalment es tria la manera que faciliti el correcte bobinat durant la fabricació del motor com és en el nostre cas. A la taula 1 es pot observar el procediment del disseny del bobinat.

Taula 1. Configuració bobinat fraccionari 12 ranures 10 pols

1	0	0	1	0	1	0	0	1	0
A	C'	B	A'	C	B'	A	C'	B	A'
C	B'	A	C'	B	A'	C	B'	A	C'
B	A'	C	B'	A	C'	B	A'	C	B'

Disposició bobinat segons taula 1: $A A' B' B C C' A' A B B' C' C$

Per tal de disminuir la secció dels fils conductors es posen les bobines en paral·lel. Així doncs, l'esquema del bobinat quedi distribuït segons la figura 3.5.

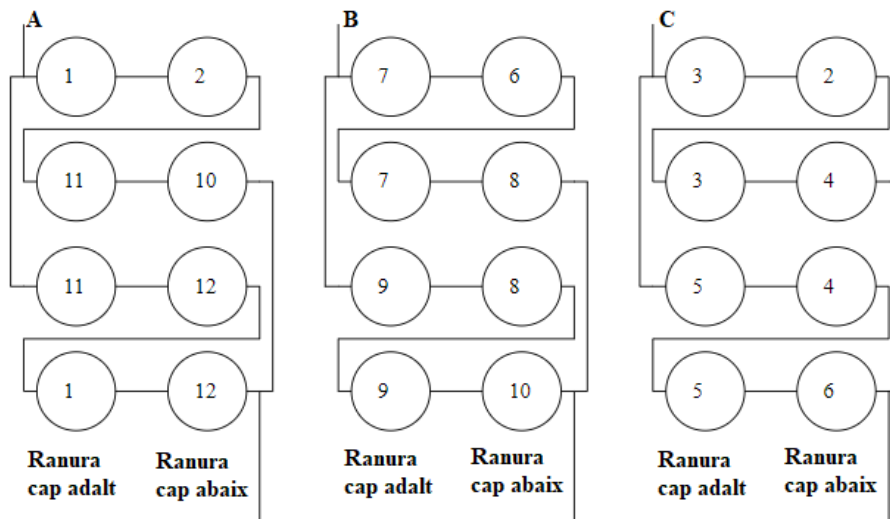


Figura 3.5. Configuració general bobinat trifàsic estrella en el motor síncron (Font:express JMAG) [7]

La figura 3.6 mostra la distribució del bobinat a través de les 12 ranures de l'estator.

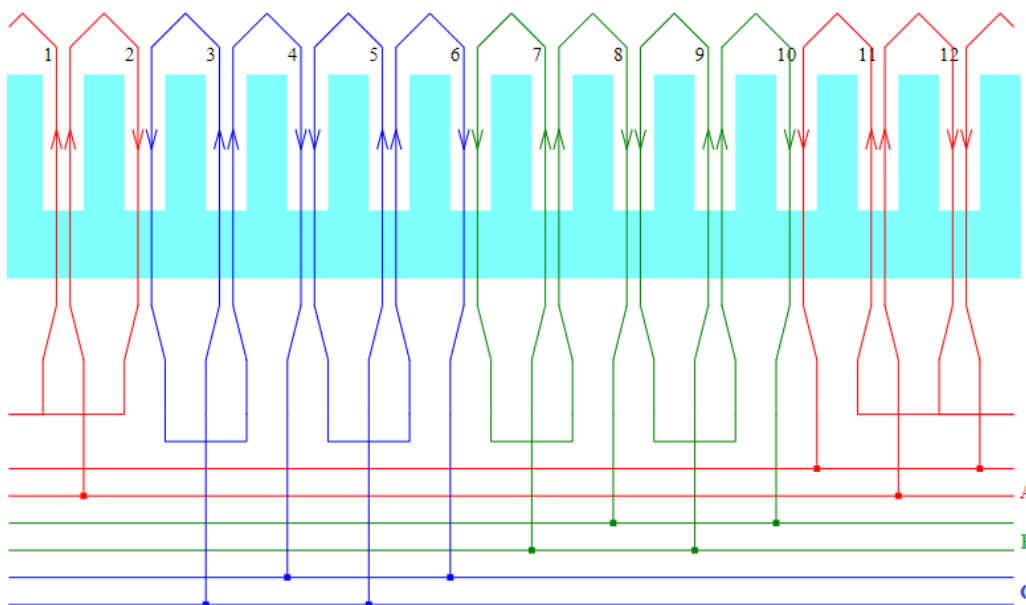


Figura 3.6. Configuració per ranures bobinat trifàsic estrella en el motor síncron (Font: express JMAG) [7]

4. Simulació mitjançant FEMM

A l'hora de calcular el camp magnètic al voltant de l'estator s'utilitzarà un software d'anàlisi per elements finits, aquest programa s'anomena FEMM, i permetrà reconstruir els paràmetres del motor, col·locar els diferents bobinats, seleccionar els materials emprats i simular per obtenir els diferents camps magnètics.

4.1. Recreació del motor

A continuació es mostrarà el procés de recreació del motor de 12 ranures i 10 pols [3]. Per reproduir l'estator en el programa dibuixarem primer una ranura d'aquest.

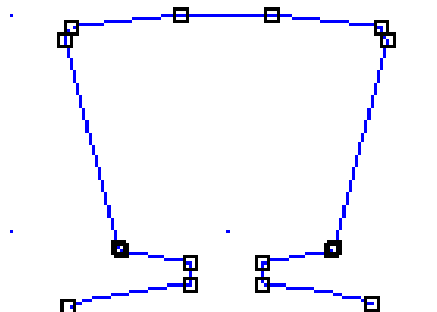


Figura 4.1. Ranura de l'estator en FEMM (Font: FEMM) [4]

Un cop reproduïda la ranura, s'haurà de fer una matriu circular per poder situar les altres 11 ranures, optimitzant així el desenvolupament del motor.

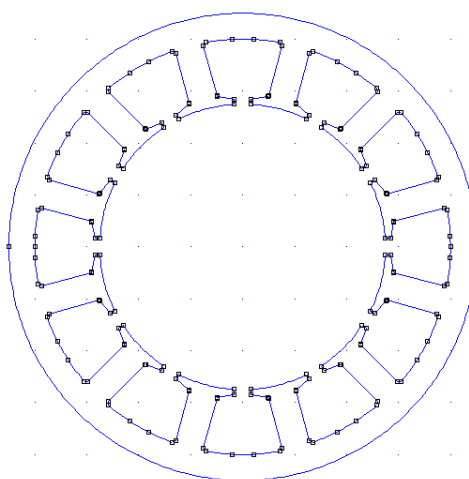


Figura 4.2. Estator del motor en FEMM (Font: FEMM) [4]

Un cop fet l'estator del motor es procedirà a reproduir el rotor, que en aquest cas es situarà un útil que es mecanitzarà de tal manera que tingui unes mesures semblants a les del rotor i unes petites esclatxes per poder situar els sensors, aquestes esclatxes seran menyspreables pel programa. Aquest útil no tindrà els espais per situar els imants permanents, d'aquesta manera es pot representar com un cercle amb el forat interior on aniria l'eix del motor.

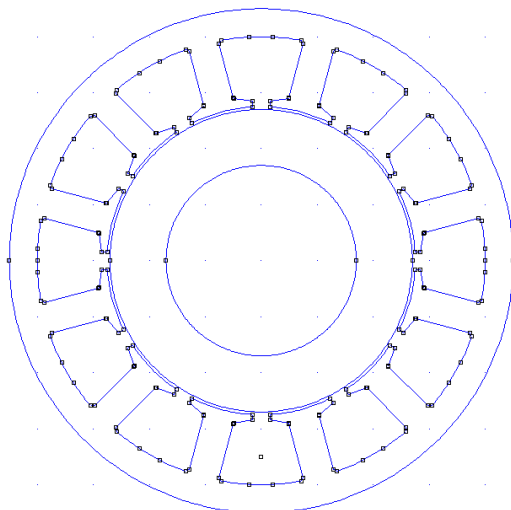


Figura 4.3. Estator i útil del rotor en FEMM (Font: FEMM) [4]

Un cop representat l'estator i l'útil del rotor, s'hauran de delimitar les regions on es situarà el bobinat. Aquestes regions dependran de la manera de bobinar l'estator, com en aquest cas s'utilitza una màquina de bobinar, aquesta ha de passar per l'interior de la ranura per poder donar la volta cap a la següent. Aquest fet comporta que l'espai del mig de la ranura quedi com un espai d'aire sense possibilitat de ser bobinat.

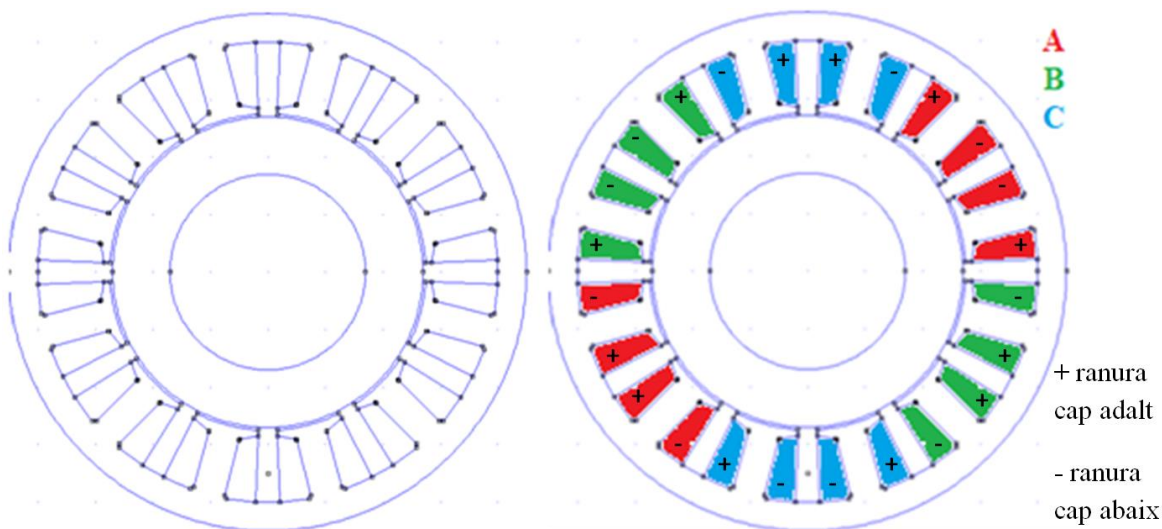


Figura 4.4. Distribució superfície del bobinat per cada fase en FEMM (Font: FEMM) [4]

4.2. Selecció dels materials del motor

Un cop delimitades les superfícies del motor s'haurà d'establir un material per cada superfície. Els materials que el compondran seran:

1. Ferro

L'estator i l'útil del rotor estaran composts d'un material ferromagnètic adient per la propagació dels fluxos magnètics. S'ha escollit el ferro **M-19**, que és de la família d'acers no orientats. Els acers elèctrics no orientats són aliatges de ferro-silici en els quals les propietats magnètiques són pràcticament les mateixes en qualsevol direcció del pla del material. El material M-19 és adient per grans motors i generadors, i per grans transformadors [8].

La característica magnètica del material queda representada segons la figura 4.5.

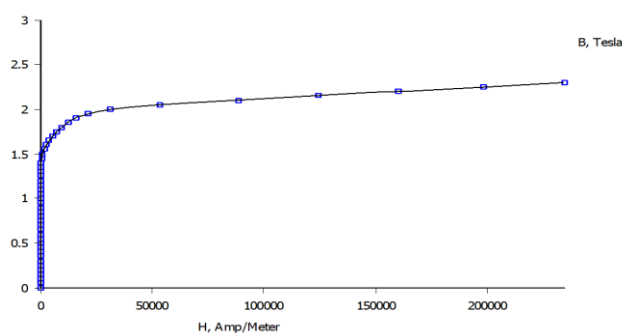


Figura 4.5. Característica magnètica extreta en FEMM (Font: FEMM) [4]

2. Coure

S'ha escollit coure d'una conductivitat de 58 MS/m i un diàmetre d'1 mm.

3. Aire

L'entreferro del motor i a la part central de les ranures estaran compostes d'aire. L'aire és representatiu per tenir una permeabilitat relativa unitària. Això vol dir que la seva permeabilitat serà igual a l'absoluta. $\mu = \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} N/A^{-2}$

Col·locant cada material a la seva àrea delimitada, el motor en FEMM queda representat segons la figura 4.6.

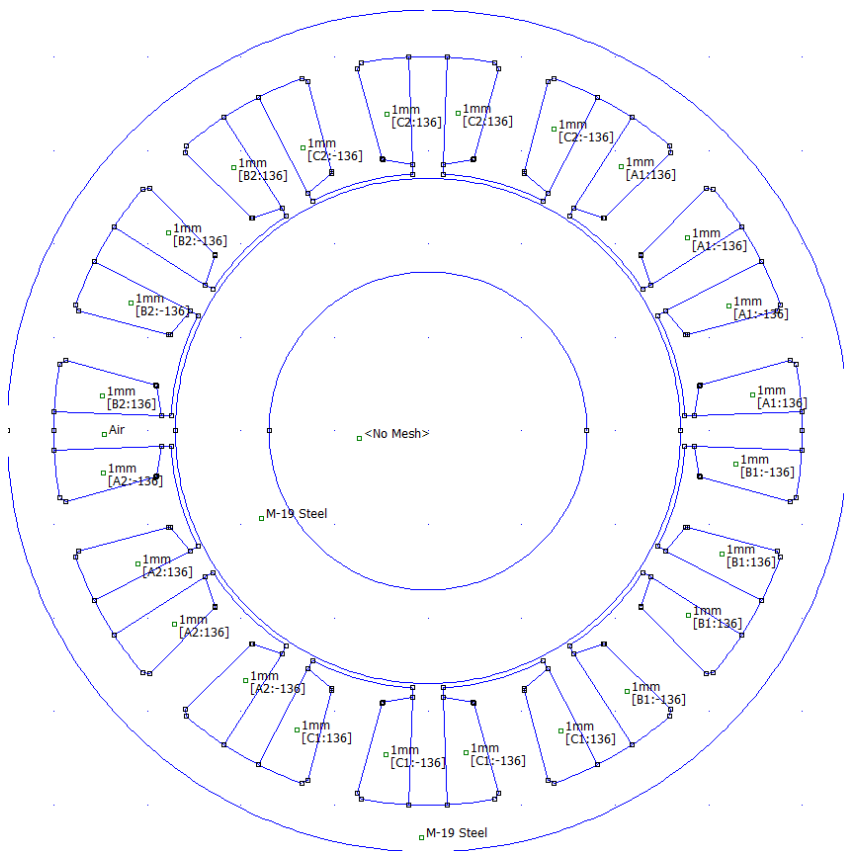


Figura 4.6. Materials en el motor en FEMM (Font: FEMM) [4]

Es pot observar que s’han dividit les bobines de cada fase en dos, això és degut al fet que d’aquesta manera es podrà simular posteriorment l’incorrecte posicionament en bobinar a les dues parts de cada fase.

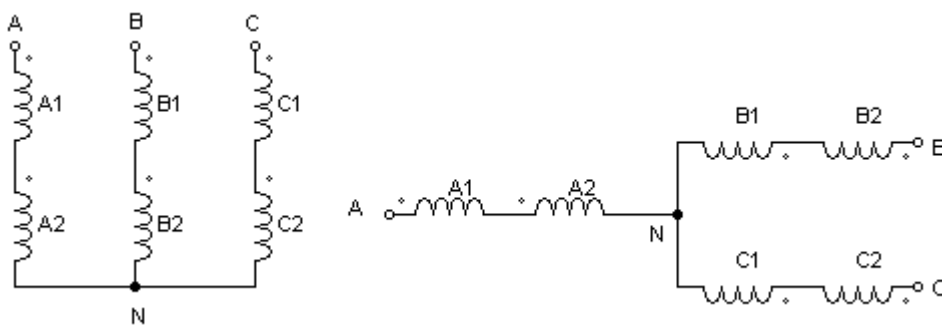


Figura 4.7. Col·locació normal bobinats i col·locació per a la verificació (Font: PSIM) [13]

4.3. Simulació

Per tal de poder simular el comportament electromagnètic del motor s'haurà de seleccionar la corresponent intensitat per cada bobinat.

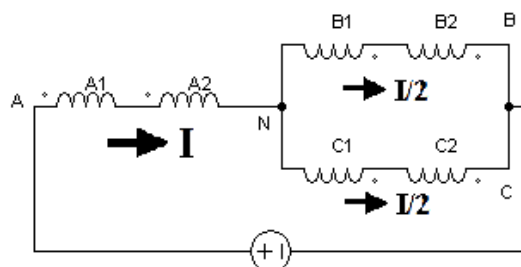


Figura 4.8. Intensitat en condicions de verificació (Font: PSIM) [13]

Com s'ha comentat anteriorment, en disposar les fases a l'hora d'injectar el corrent, la fase B i C estaran col·locades al revés de la seva col·locació normal i situades en paral·lel. Aquestes condicions faran que al FEMM es col·loquin les següents intensitats:

- Fase A (A1 i A2): Intensitat serà positiva i del mateix valor que la intensitat injectada pel convertidor. Per a la simulació la intensitat en condicions normals per la fase A serà de 3 A.
- Fase B i C (B1 , B2 i C1, C2): Intensitat serà negativa, al estar a l'inrevés de la seva col·locació normal, i la seva magnitud serà la meitat de la intensitat injectada pel convertidor al estar connectades en paral·lel. Per a la simulació les intensitats en condicions normals per les fases B i C seran de -1,5 A.

Un cop emplenats els valors d'intensitat es procedeix a simular per tal d'obtenir els diferents camps magnètics a la part exterior de l'útil del rotor.

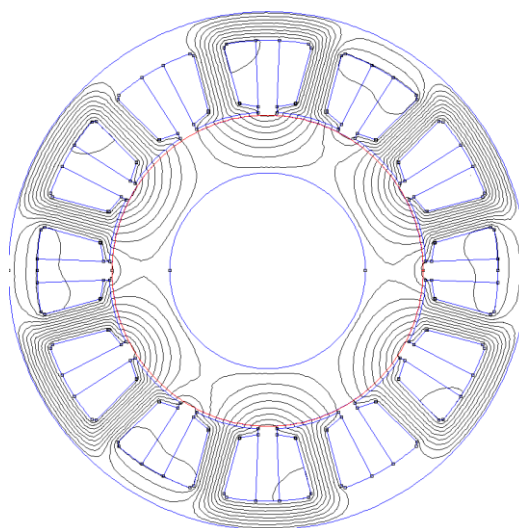


Figura 4.9. Línies de camp i franja(vermella) on s'obindrà el camp magnètic (Font: FEMM) [4]

Si representem en una gràfica el camp magnètic de la línia vermella de la Figura 4.9 començant des del punt central de la dreta i en sentit antihorari fins a arribar al mateix punt, el camp queda representat segons la figura 4.10. S'haurà de considerar aquest sentit antihorari des del punt central de la dreta a l'hora de situar els sensors en el procés de muntatge de l'aparat 8.

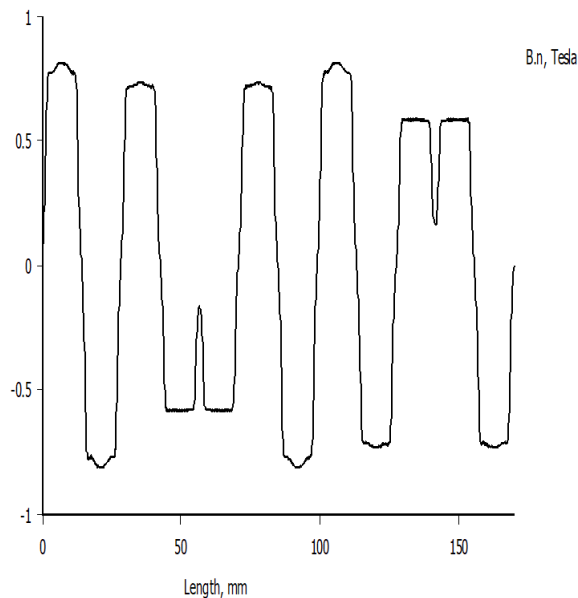


Figura 4.10. Camp magnètic per la part exterior de l'útil del rotor en condicions de verificació (Font: FEMM) [4]

La gràfica de la Figura 4.10 representa el camp magnètic en condicions de verificació quan les bobines estan correctament col·locades. Quan el camp és superior a 0 Tesla, es considera com un pol nord, si és inferior a 0 Tesla, es considera un pol sud. Es pot apreciar 12 condicions en la gràfica que serien les condicions de pol nord o sud en cada una de les 12 ranures. També es pot apreciar que en total hi ha 10 pols, que correspon a un total de 10 canvis de sentit dels pols.

A continuació podem simular el comportament magnètic en bobinar una fase, unes fases, la meitat d'una fase o diferents meitats de diferents fases i obtenir el corresponent camp magnètic per cada situació.

Com a mode d'exemple es mostraran els resultats d'invertir la meitat de la fase A (A1). Obtenim el mateix resultat a l'invertir la fase A1 en els paràmetres de la fase que senyalant que per A1 circularà una intensitat negativa. En aquest cas simularem que per A1 la intensitat està invertida, representant que s'ha bobinat a l'inrevés.

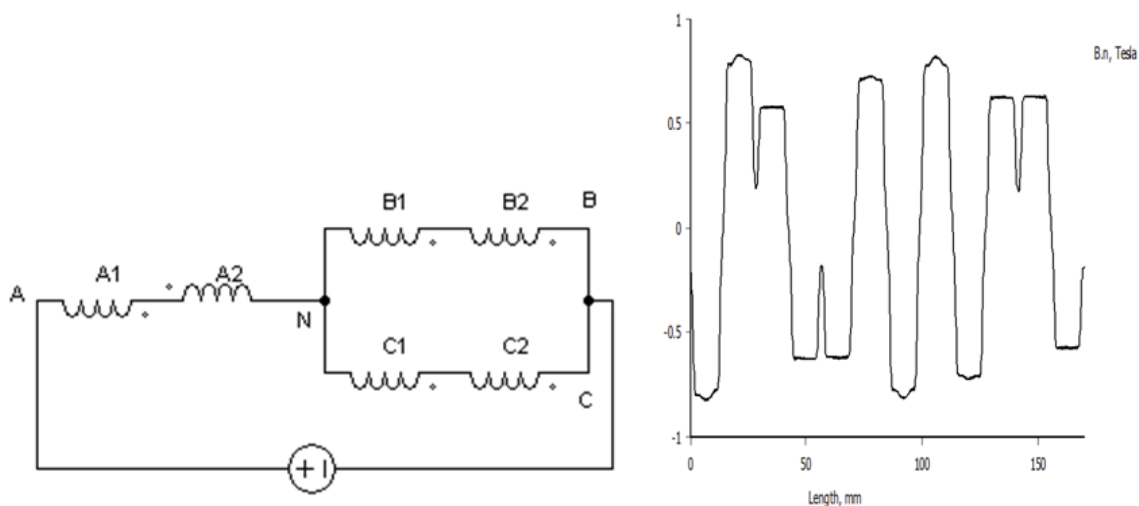


Figura 4.11. Camp magnètic bobina A1 a l'inrevés en condicions de verificació (Font: PSIM i FEMM) [13] i [4]

Es pot observar que la combinació de pols nord i sud és diferent de la combinació en condicions normals de verificació. A cada tipus d'error en bobinar s'obtindrà una diferent combinació de camps magnètics.

La taula global de resultats es mostrarà a l'Annex 12.1, on es veuran reflectits els pols nord, com a 1, i els pols sud, com a 0, per a totes les possibles combinacions errònies en bobinar.

5. Útil del rotor

Segons s'ha comentat anteriorment, s'injectarà un corrent continu als bobinats de l'estator prenent com a positiu l'inici del bobinat A i com a negatiu l'inici dels bobinats B i C, que es connectaran. Aquest corrent generarà una inducció magnètica que alhora crearà un camp magnètic.

Per poder generar la inducció magnètica es requerirà un medi ferromagnètic per a poder propagar-se. Aquest medi en condicions normals d'un motor es coneix com el rotor, però en aquest cas es farà un útil amb la forma d'aquest per poder acomodar els sensors al seu voltant i l'estator. Aquest útil tindrà el mateix diàmetre que l'estator, una base per poder-s'hi sostenir i unes escletxes per on es col·locaran els sensors. Mitjançant el programari de SolidWorks s'ha recreat l'útil del rotor del plànol a 3D per a poder visualitzar el funcionament del dispositiu.

Els plànols del mecanitzat de l'útil del rotor estan inclosos en l'Annex 12.4.

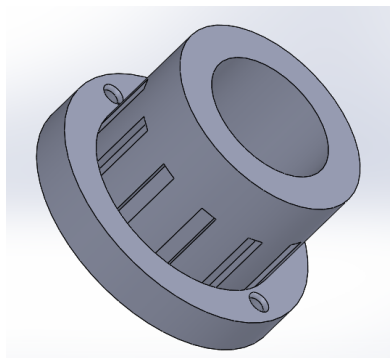


Figura 5.1. Vista superior útil rotor (Font: SolidWorks) [14]

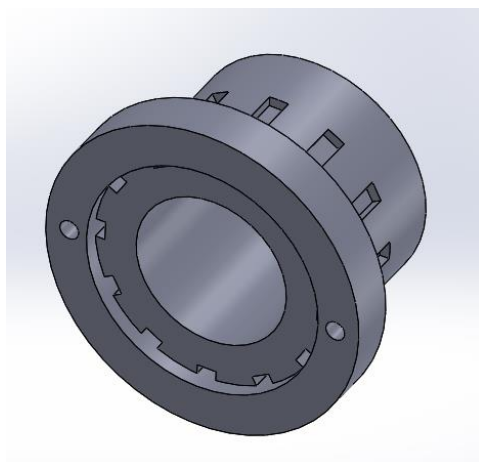


Figura 5.2. Vista inferior útil rotor (Font: SolidWorks) [14]

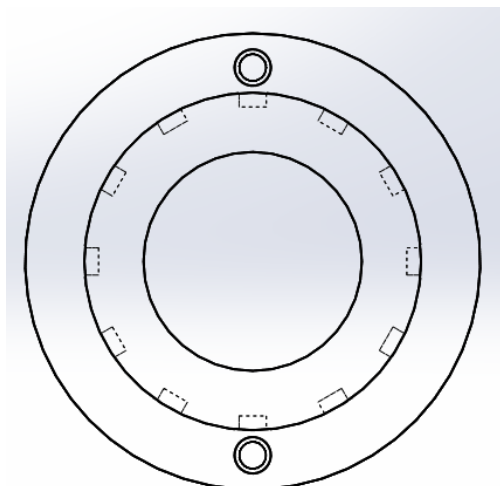


Figura 5.3. Vista en planta útil rotor (Font: SolidWorks)[14]

L'útil del rotor estarà collat en una taula de la fàbrica, aleshores l'estator bobinat que es vulgui assajar es col·locarà al voltant d'aquest de tal manera que les ranures on aniran col·locats els sensors coincideixin amb les ranures de l'estator tal com es pot observar a la figura 5.4 i 5.5.

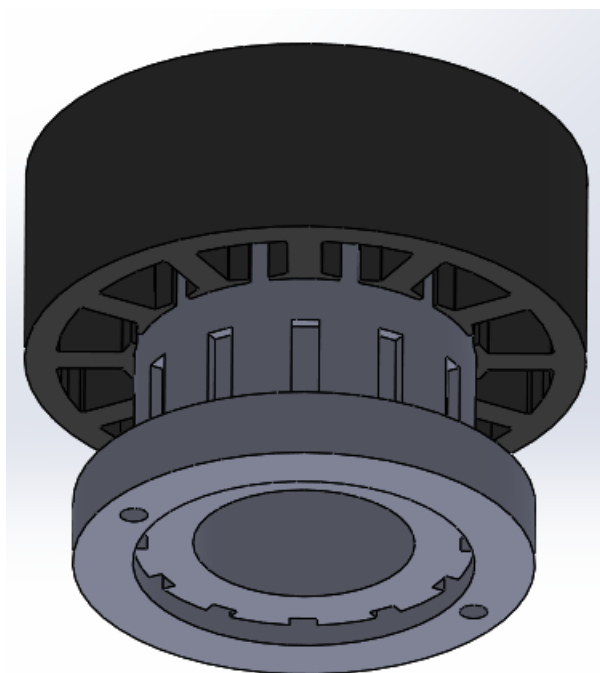


Figura 5.4. Col·locació de l'estator a l'útil del rotor (Font: SolidWorks)[14]

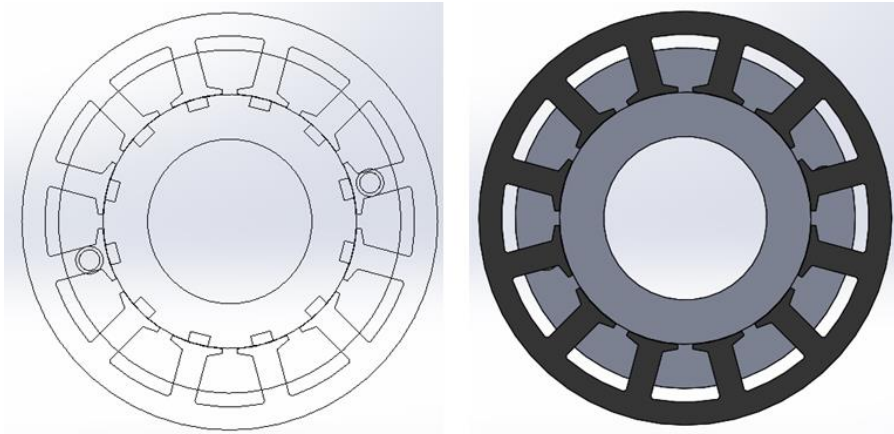


Figura 5.5. Vista en planta de la col·locació de l'estator a l'útil del rotor (Font: SolidWorks)[14]

Un cop l'estator estigui ben centrat a l'útil del rotor es procedirà a injectar el corrent als bobinats per obtenir la lectura del camp magnètic mitjançant els sensors.

6. Dispositiu de verificació

Es dissenyarà i crearà un dispositiu en el qual estiguin continguts tots els components que permetin analitzar els camps magnètics de l'estator i donar els resultats corresponents.

En aquest apartat es descriurà el conjunt d'aquest dispositiu, tant la part de hardware com la del software.

6.1. Hardware

6.1.1. Sensors

En representar el camp magnètic al voltant de la part exterior de l'útil del rotor, obtenim un camp magnètic oscil·lant on es veu clarament que hi ha un conjunt de pols nord i sud.

Necessitarem un sensor capaç de donar una senyal elèctrica d'unes característiques quan detecti un pol nord i una senyal d'unes altres característiques en detectar un pol sud. Ha de ser un sensor de petita escala per poder tenir cabuda a les ranures de l'útil.

Finalment s'ha decidit utilitzar sensors d'efecte Hall per la seva facilitat de funcionament.

En un sensor Hall hi flueix una corrent pel sensor, si s'aproxima un camp magnètic que flueix en direcció vertical al sensor, llavors el sensor crea un voltatge sortint proporcional al producte de la força del camp magnètic.

Després d'una recerca de diferents sensors del mercat s'ha escollit el sensor Hall A3144, ja que la sortida d'aquest és fàcilment llegible per una entrada digital d'un microcontrolador.

L'esquema intern i el pinatge del sensor Hall es veu representat en la figura 6.1.

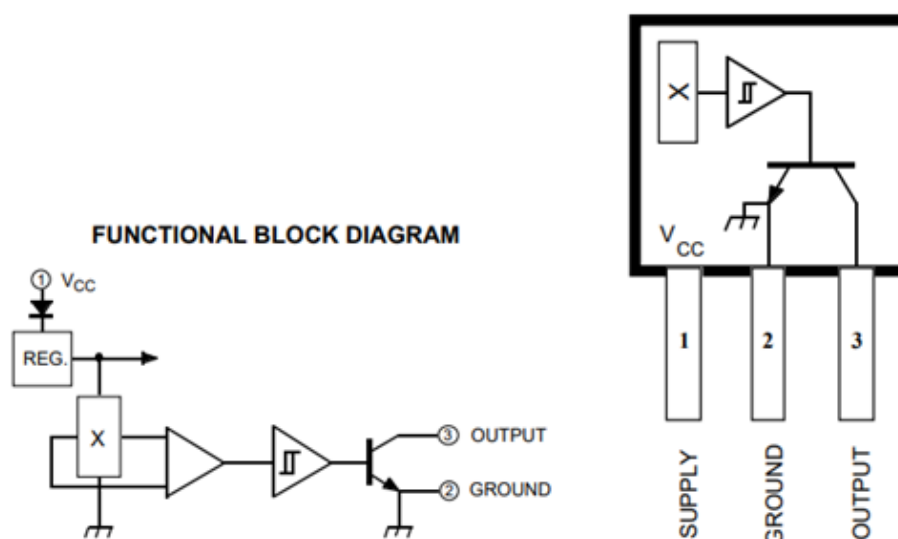


Figura 6.1. Esquema electrònic sensor Hall A3144 (Font: Allegro) [15]

El sensor estarà alimentat mitjançant 5V, aleshores ja aquest detecti un pol nord la sortida "Output" serà de 5V mentre que quan detecti un pol sud la sortida "Output" serà de 0V. Per limitar la sortida a 5V s'haurà de col·locar una resistència de 10kΩ entre l'alimentació i la sortida "Output" [15].

El conjunt de 12 sortides dels sensor Hall seran capturades per un microprocessador que aquest interpretarà el conjunt de lectures per donar la sortida o resultat corresponent.

6.1.2. Microcontrolador

Pel fet que el dispositiu de verificació de bobinats requerirà un sistema que permeti registrar el conjunt de senyals per a poder donar una resposta concreta i visualitzar-la a través d'una pantalla, s'ha decidit emprar un microcontrolador.

S'ha escollit un microcontrolador Arduinoa causa de la seva senzillesa, facilitat per a la programació i el seu gran nombre de sortides i entrades digitals.

El model triat és l'ARDUINO MEGA 2560 ja que conté un total de 53 sortides/entrades digitals.

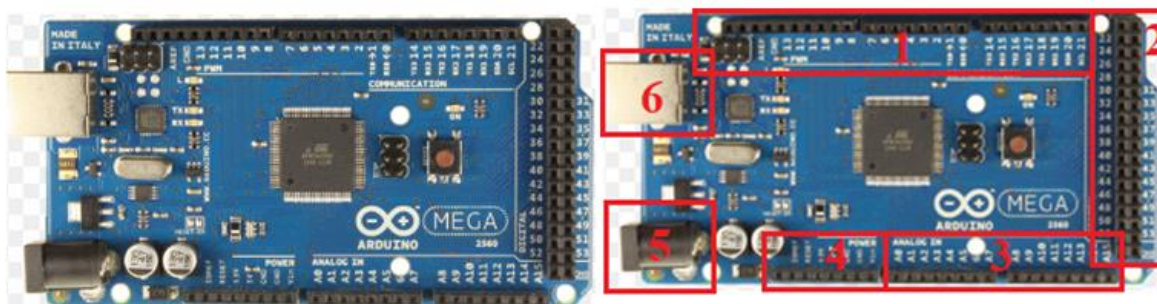


Figura 6.2. Fotografia Arduino Mega 2560i distribució pins (Font: Allegro) [16]

L'Arduino consta de diversos pins de diferents funcionalitats. A la figura 6.2 es pot observar els diferents pins del microcontrolador i la funció de cada bloc és la següent [16]:

1. Pins digitals: Fila de 21 pins digitals, els quals es poden configurar com a sortides de 5V, o com a entrades digitals que detectaran quan hi ha 5V i quan no.
2. Pins digitals: Ampliació de la versió MEGA de 32 pins digitals.
3. Pins analògics: Hi ha un total de 15 pins analògics. Aquests pins convertiran el voltatge de 0 a 5 V a un número entre el 0 i el 1023 ja que l'ADC de l'Arduino és de 10 bits. També es pot configurar com a entrada i com a sortida.
4. Pins de potència: Sortides de 5 V, 3,3 V, i negatius.
5. Jack d'alimentació: Connector d'alimentació el qual accepta un rang entre 5 i 12 V.
6. Port USB: Port a partir del qual es programa el microcontrolador. També es pot alimentar l'Arduino a partir del port USB, el qual l'alimenta amb una tensió de 5 V.

6.1.3. LCD

L'operari ha de ser capaç de llegir el resultat de la verificació dels bobinats per saber si es podrà portar l'estator al següent punt del muntatge, o si s'haurà de rebobinar per corregir l'error visualitzat pel dispositiu de verificació.

Per tal de mostrar els resultats, s'ha decidit utilitzar una pantalla tipus LCD. Una pantalla LCD consisteix en una agrupació de petits segments, anomenats píxels, que poden ser manipulats per representar informació. El factor essencial de les pantalles LCD és la mida, ja que degut a la col·locació de dues plaques fines entre les quals hi ha un compost anomenat cristall líquid. Això evita la presència de cap tub de raigs catòdics, presents a la tecnologia de les anteriors pantalles [10].

Per programar la pantalla des de l'Arduino s'utilitzarà un mòdul d'I²C. L'I²C és un bus de comunicacions sèrie, que permet una velocitat de transmissió de la comunicació des de 100 kbit/s fins a 3,4 Mbit/s [11]. L'utilització d'aquest mòdul permetrà una programació més pràctica de la pantalla i una reducció pel que fa al cablejat, ja que el mòdul estarà incorporat a la pantalla LCD.

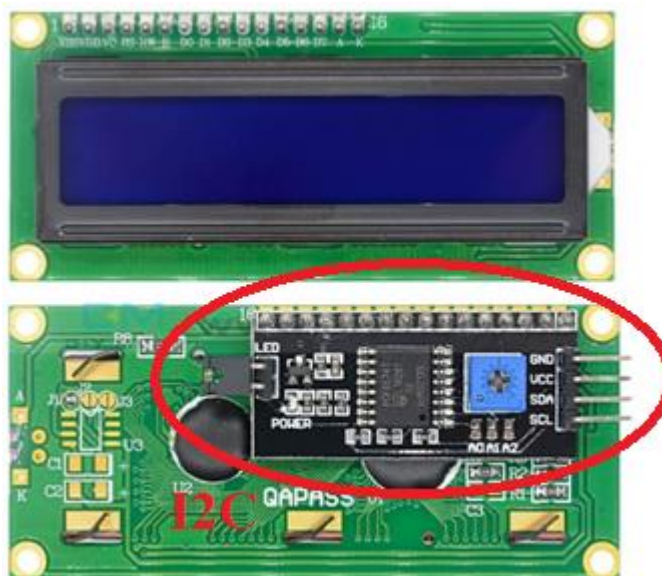


Figura 6.3. LCD amb mòdul I²C integrat (Font: Diymore)

6.1.4. Convertidor

Necessitarem un convertidor que injecti una quantitat de corrent continua al bobinat de l'estator per tal que els sensors puguin detectar el conjunt de pols generats per la força electromotriu induïda per aquest corrent.

Segons el datasheet del sensor Hall A3144, aquest detecta un pol quan el camp d'aquest és superior a 200 Gauss, que equival a 20 mT [15].

Després d'una recerca de convertidors pel mercat, s'ha escollit un convertidor de 12 VDC i un corrent de sortida màxima de 3A (suficient pel límit de detecció de camp del sensor). A més, aquest convertidor incorpora un contacte normalment obert i un normalment tancat, els quals es poden commutar mitjançant el curtcircuit de les sortides PUSH i GND.



Figura 6.4. Convertidor de 12 VDC emprat en el dispositiu de verificació (Font: Amazon)

A la figura 6.4 es poden observar els diferents terminals del convertidor emprat. La funció d'aquests és:

- **CONTROL- i CONTROL+:** Terminals extres per controlar altres convertidors.
- **GND i +12V:** Terminals de 12VDC
- **PUSH:** Terminal que al ser curtcircuitat amb GND, commuta els contacte +NO, connectant-lo amb -COM i deixant obert el contacte +NC.
- **-COM:** Contacte comú
- **+NC:** Contacte normalment tancat
- **+NO:** Contacte normalment obert

6.2. Software

La programació de l'Arduino Mega 2560 s'ha desenvolupat mitjançant el software IDE 1.5.7. El llenguatge de programació d'Arduino està basat en el llenguatge C++. La programació mitjançant Arduino ha estat pensada per a ser una eina informàtica per al desenvolupament de programari de manera còmoda i ràpida[16].

El codi del dispositiu de verificació conté 388 línies de codis, les quals explicaré a continuació de manera resumida. A l'Annex 12.2 s'afegirà el codi del programa de manera íntegra.

El codi conté dues parts essencials, el **voidsetup()**, i el **voidloop()**.

El **voidsetup()** són les línies de codi que s'executen a l'inici del programa mentre que el **voidloop()** conté el seguit de línies que s'executen després del **voidsetup()** de manera cíclica i indefinidament.

Al **voidsetup()** es declaren les entrades digitals provinents dels senyals de sortida dels sensors pel motor de 12 ranures i pel motor de 15 ranures.

Es declara el pin de sortida digital que serà el senyal de 5V que s'executarà quan la combinació dels senyals dels sensors sigui correcta. També es declara el pin d'entrada digital que quan detecti 5 V accedirà al programa del motor de 12 ranures i quan detecti 0 V accedirà al programa del motor de 15 ranures.

```
for (int thisPin = 0; thisPin < 12; thisPin++) {
  pinMode(22+thisPin*2, INPUT);}

```

Figura 6.5. Declaració entrades digitals motor de 12 ranures.

Al **voidsetup ()** també establirem una velocitat de 9600 bits per segon per a la transmissió de dades en sèrie per comunicar-se amb l'equip. Finalment s'establiran les funcions que encendran els leds de la pantalla LCD i la inicialitzaran.

Al **voidloop ()** es comença registrant el conjunt de lectures provinents dels sensors. Aquestes lectures s'ordenaran en forma de vector, el qual recorrerà circularment al voltant de l'estator els pols nord com a 1 i els pols sud com a 0.

```
int Lectures12R[12];
for (int thisPin = 0; thisPin < 12; thisPin++) {
  Lectures12R[thisPin]=digitalRead(22+2*thisPin);}

```

Figura 6.6. Registre de la lectura dels sensors del motor de 12 ranures.

Seguidament es farà la lectura de l'entrada digital comentada anteriorment per saber si volem verificar el motor de 12 ranures o el de 15 ranures. Si aquesta entrada llegeix 5 V s'executaran les línies de codi pertinents al motor de 12 ranures i si llegeix 0 V al de 15 ranures.

A continuació explicarem les línies de codi pertinents a la verificació del motor de 12 ranures.

Primer de tot es procedeix a efectuar la funció **Eval1**(vector del registre de la lectura dels sensors). Aquesta funció pretén codificar totes les possibles combinacions de les lectures dels sensors amb un número concret. Per realitzar-ho es fa un sumatori del producte del valor de l'índex **i** del vector per 2 elevat a la posició de l'índex **i**, per a totes les **i** del vector.

Seguidament es procedeix a activar el senyal de sortida de 5 V que indica el correcte bobinat en funció de la sortida digital de la funció **PASA**(vector del registre de la lectura dels sensors). Aquesta funció recorre els diferents valors del vector de lectures dels sensors i comprova que aquests valors coincideixen amb els valors obtinguts mitjançant FEMM per a la bona disposició del bobinat de les ranures.

Tot seguit es procedeix a definir el veredictes en forma de text a través de la funció **Veredictes1**(vector del registre de la lectura dels sensors). Aquesta funció determina a partir de cada combinació de sensors el corresponent error al bobinar, el conjunt de combinacions s'han obtingut mitjançant el programari FEMM. Per exemple, per a la combinació 011001010110 mostra "bobina A1 invertida".

Els resultats de les funcions esmentades anteriorment es mostren per pantalla a través de la funció **LCD12**(resultat Veredictes1, lectures dels sensors, resultat Eval1). En aquesta funció s'actualitza la informació de les 4 files de leds de la pantalla LCD a través de les funcions de la llibreria importada d'I²C. La primera fila de la pantalla correspondrà a la informació del motor d'assaig, en aquest cas "Motor: 10P 12R". A la segona fila es mostrarà la combinació dels pols captats pels sensors, per exemple "Pols: SNNSSNSNSNNS". A la tercera fila es mostrarà l'estat del bobinat, per exemple "Estat: Correcte". A l'última fila es mostrarà el número d'identificació de la combinació de la sortida dels sensors, per exemple "Num. Id: 1600".

Per tal que la informació mostrada per pantalla es mostri de manera continuada i només s'actualitzi quan hi hagi una modificació en l'estat dels sensors, es crearà un bucle mitjançant una funció while. A partir de dues variables booleans, no es sortirà del bucle esmentat sempre que aquestes variables siguin certes. Aquestes variables seran falses quan hi hagi un canvi en la combinació de sensors o quan la lectura de l'entrada digital canviï d'estat, indicant que s'ha canviat el tipus de motor a assajar. Un cop dintre del bucle es tornen a recórrer les funcions descrites anteriorment de manera cíclica.

7. Procés de muntatge

En aquest apartat es mostrarà, com a mode de resum, el procés de construcció del dispositiu. A l'Annex 12.3 es mostrarà el plànol del cablejat de manera íntegra.

El dispositiu de verificació de bobinats estarà format per una caixa en la qual hi haurà tots els components que s'han esmentat als apartats anteriors, components auxiliars i de seguretat. A la caixa hi haurà el microcontrolador Arduino, el convertidor de 12 V, un convertidor de 5 V per l'alimentació dels sensors i del microcontrolador, dos relés, la pantalla LCD, connectors per les senyals dels sensors, per uns leds d'iluminació auxiliars que es col·locaran per saber quines bobines s'han de rebobinar (futura versió del dispositiu), i per la sortida d'alimentació dels bobinats, el fusible d'entrada i els interruptors d'encesa i apagada del dispositiu i el de canvi de motor a assajar (12 o 15 ranures).

A l'Annex 12.3 es mostrarà el plànol del cablejat.

Per facilitar el muntatge, s'ha reutilitzat una caixa d'un antic controlador de parell de *MECANICA MODERNA SA*. El fet que aquesta caixa disposi d'interruptors, selectors, connectors, portafusibles, i un forat per col·locar la pantalla LCD, ha fet que la seva utilització sigui oportuna.



Figura 7.1. Controlador de parell de MECANICA MODERNA SA

S'ha procedit a realitzar un buidatge general de la caixa per a la posterior col·locació dels components comentats. Seguidament s'han fet els forats necessaris per poder fixar els components.



Figura 7.2. Buidatge del controlador de parell

Tot seguit, s'ha col·locat la placa Arduino, el convertidor de 12 V i el de 5 V, que s'ha reutilitzat d'un carregador de mòbil convencional. Seguidament s'ha col·locat el convertidor dintre del recinte fent que el cablejat provinent de la xarxa de 230 VAC quedi el més apartat i el més a la dreta possible. Primerament s'ha cablejat la part de 230 VAC, aprofitant l'adaptador de fusibles de la caixa s'ha fet passar el conductor de línia per aquest. També aprofitant l'interruptor frontal de la caixa s'ha fet passar el conductor neutre per aquest, així es tindrà un sistema d'interrupció manual del dispositiu.

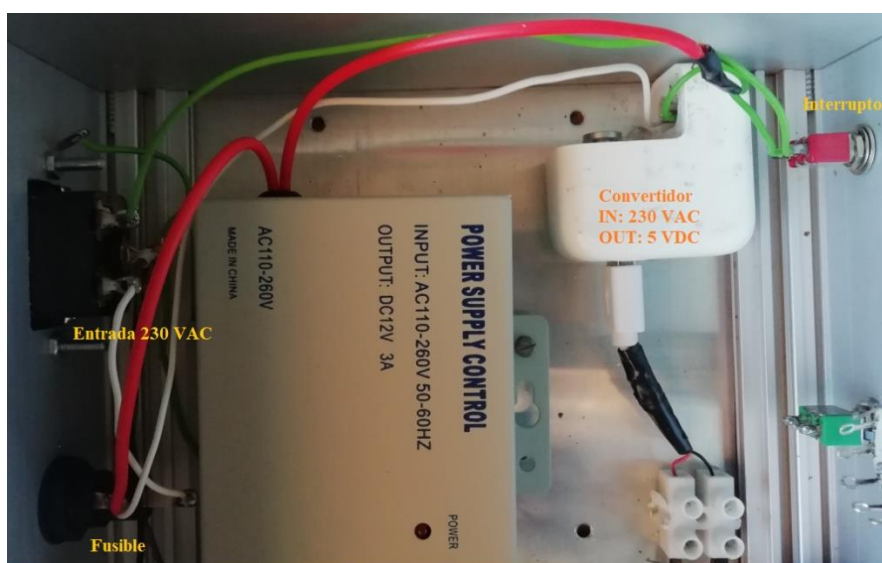


Figura 7.3. Col·locació components i cablejat d'alta

Aprofitant el forat de dos connectors del controlador de parell, s'han col·locat dues mànegues de cables de 15 senyals cadascuna, pels senyals provinents dels sensors i l'alimentació dels leds. Amb un connector tipus DB9 amb regleta de connexió, s'han col·locat les diversos senyals i posteriorment s'ha cablejat fins a la placa Arduino. Aquesta placa d'Arduino se li afegirà un mòdul adaptador de senyals

per facilitar el procés de cablejat. Aquest mòdul es pot posar i treure de manera ràpida, això permetrà que la placa d'Arduino sigui independent del conjunt del cablejat.

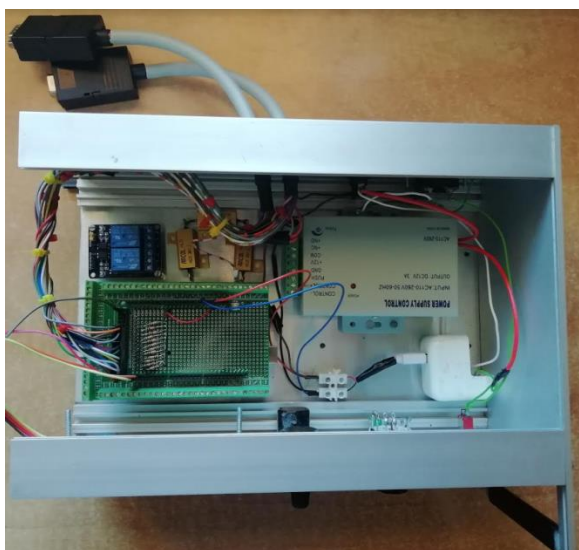


Figura 7.4. Col·locació components i cablejat sensors

S'ha cablejat la mànega de cables la terminació de la qual seran el conjunt de sensors procedents pel motor de 12 ranures. La terminació de la mànega és a un connector DB9 per poder tenir l'útil del rotor i el dispositiu de verificació independents d'un a l'altre.



Figura 7.5. Mànega del cablejat dels sensors.

Tal com s'ha explicat anteriorment es requerirà la connexió d'una resistència de $10k\Omega$ entre l'alimentació de 5V del sensor i la sortida "Output" del sensor. Per col·locar-les s'utilitzarà el mòdul adaptador esmentat. Els terminals de les resistències es soldaran des de la corresponent sortida digital fins a la sortida de 5V del mòdul.

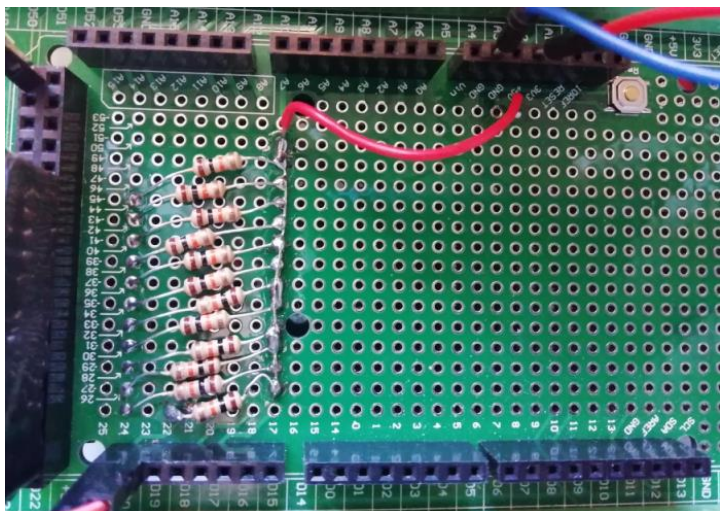


Figura 7.6. Resistències de 10kΩ dels 12 sensors.

Aprofitant el forat de l'indicador de parell del controlador, s'ha inserit la pantalla LCD amb el mòdul d'I²C.



Figura 7.7. Inserció pantalla LCD.

Inicialment s'havia decidit utilitzar l'interruptor del mig de la caixa per canviar el programa del motor de 12 ranures al de 15 ranures. Ja que finalment s'assajarà únicament el motor de 12 ranures es reutilitzarà l'interruptor per activar i desactivar la injecció de corrent als bobinats. Per realitzar-ho es connectaran les senyals de GND i PUSH del convertidor als terminals de l'interruptor.



Figura 7.8. Canvi del programa de l'estator de 12 ranures al de 15 ranures.

Aprofitant un connector de 4 sortides de l'antiga caixa, s'ha aprofitat per fer el cablejat dels tres terminals que s'hauran de connectar als bobinats de les tres fases. A l'interior del dispositiu s'uniran les terminacions de les fases B i C, d'aquesta manera no ho haurà de fer l'operari de forma manual.

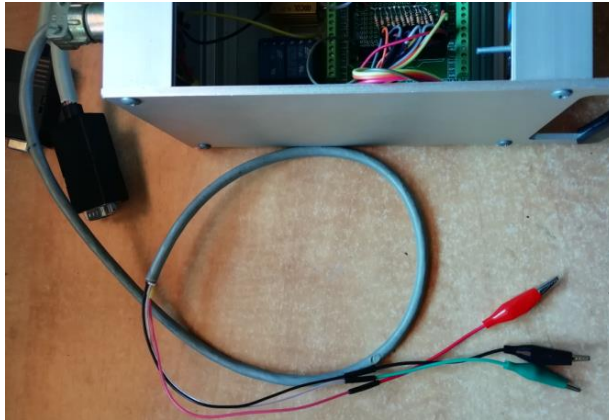


Figura 7.9. Cables de la injecció de corrent al bobinat.

Finalment es col·locaran els sensors a les esclatxes de l'útil del rotor per a poder procedir a realitzar una prova amb el prototip de motor de 12 ranures i 10 pols.



Figura 7.10. Col·locació dels sensors a l'útil del rotor.

8. Posada en marxa

Aquest apartat contindrà la descripció dels fets ocorreguts durant la posada en marxa del dispositiu, un cop acabat de ser construït.

Primerament es provarà el dispositiu de manera aïllada, comprovant el seu funcionament amb un imant que permetrà veure si s'actualitza la informació dels sensors per pantalla. Un cop comprovat, es farà l'assaig amb l'útil del rotor i el prototip d'estator.

Per fer la prova s'aplicaran camps magnètics positius i negatius al conjunt de sensors per veure que la informació es visualitza correctament per pantalla.

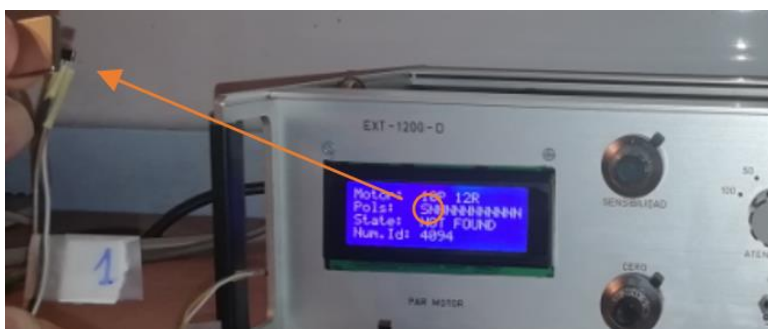


Figura 8.1. Validació dels sensors Hall (sensor 1).

Vist que el resultat de la prova és satisfactori, es provarà que el convertidor funcioni correctament. Es col·locaran tres resistències en sèrie de $3,3 \Omega \pm 5\%$ (error absolut de $\pm 0,66\Omega$) per limitar el corrent d'injecció als bobinats, la resistència dels quals és d' 1Ω quan el bobinat de la fase A està en sèrie amb el bobinat de la fase B i C en paral·lel. En aquest cas, el corrent hauria de ser:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{12}{3 \cdot 3,3 \pm 0,66} = 1,21 A \pm 6,66 \%$$



Figura 8.2. Validació del convertidor.

Un cop validats els sensors i el convertidor es procedirà a realitzar la prova amb un prototip d'estator ja bobinat. Es comprovarà que els bobinats estiguin correctes i es realitzaran diferents proves de canviar el bobinat de les fases expressament per veure que el dispositiu és capaç de detectar els errors i mostrar-los per pantalla.

S'incidirà l'estator a l'útil del rotor de tal manera que els sensors quedin ben ajustats a les ranures corresponents de la simulació en FEMM. Es marcarà amb una línia la posició del primer sensor i la posició de la primera ranura per facilitar el posicionament.

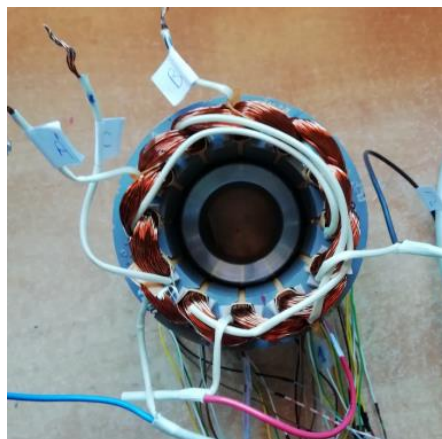


Figura 8.3. Col·locació de l'estator a l'útil del rotor

La primera prova serà la d'injectar corrent únicament en les fases A, B o C. Es comprovarà el resultat amb simulacions en FEMM, observant que els pols generats coincideixin amb la lectura dels sensors. S'ha decidit disminuir la resistència limitadora a $3,3 \Omega$ per generar un camp magnètic superior.

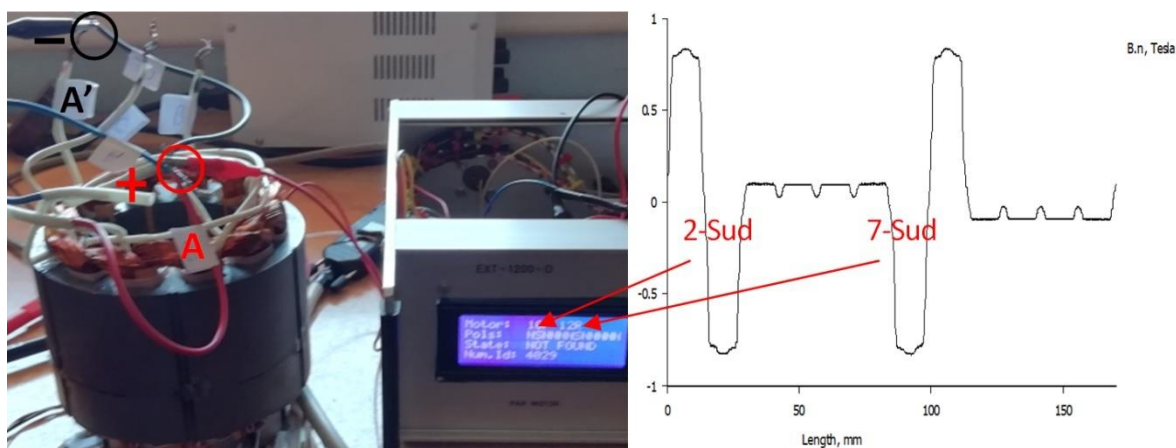


Figura 8.4. Validació del dispositiu amb la detecció del pols generats per la fase A [4]

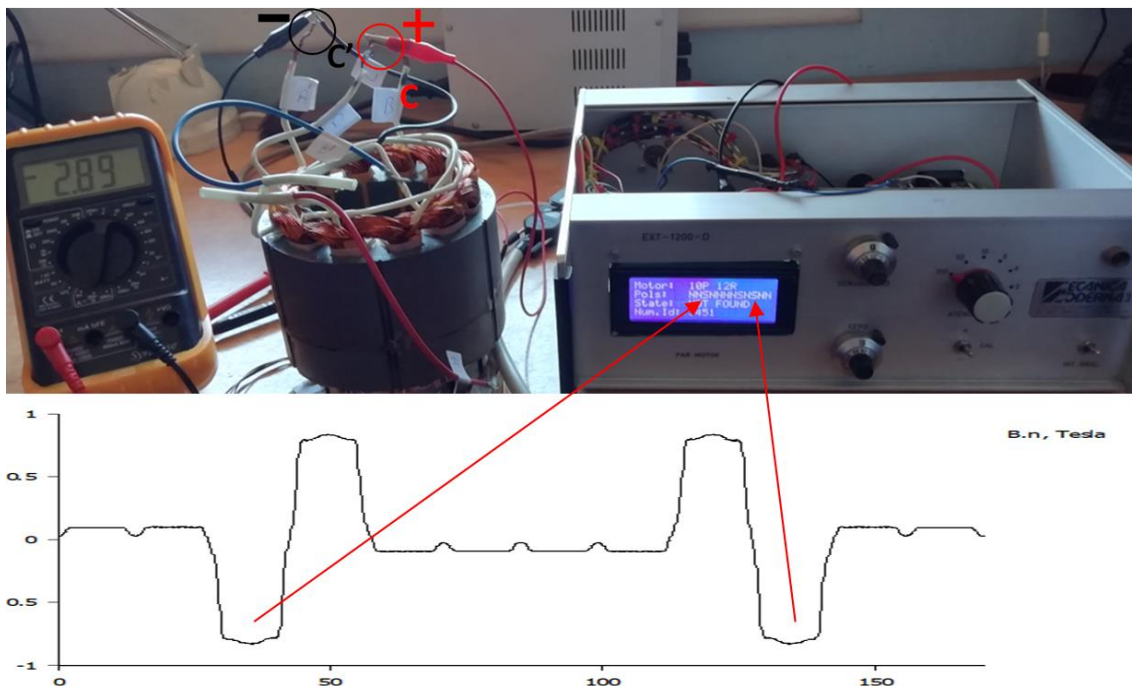


Figura 8.5. Validació del dispositiu amb la detecció del pols generats per la fase C [4]

Un cop realitzada amb èxit la primera prova es procedirà a fer la prova amb el bobinat correcte. Es connectarà el terminal positiu en la fase A i els negatius en la fase B i C. El neutre seran les terminacions de les tres fases.

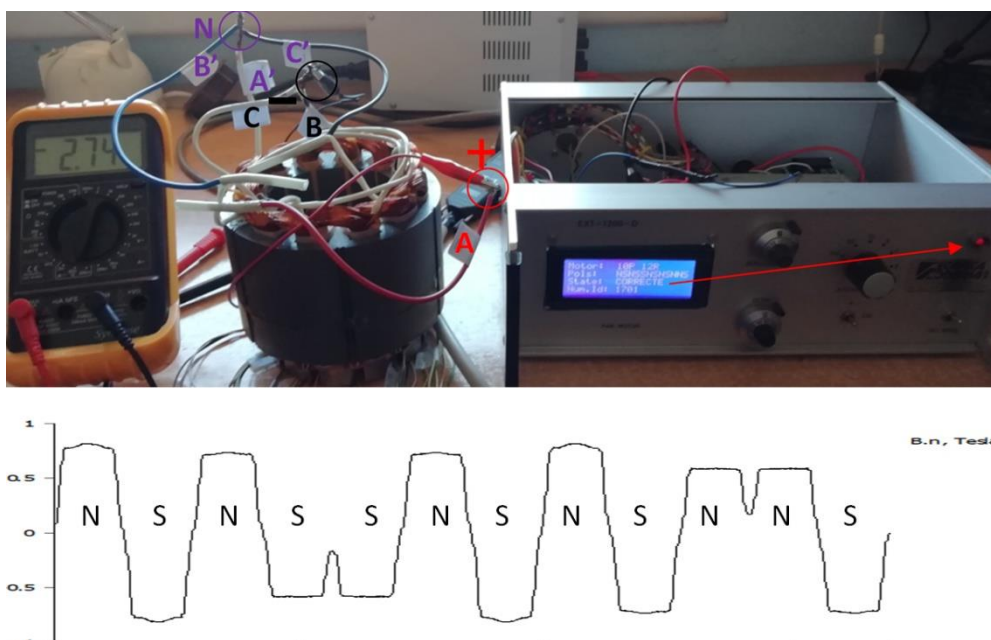


Figura 8.6. Validació del dispositiu amb el bobinat de l'estator en la correcta posició [4]

Veient que el resultat és satisfactori, es procedeix a fer la prova d'invertir els bobinats B i C.

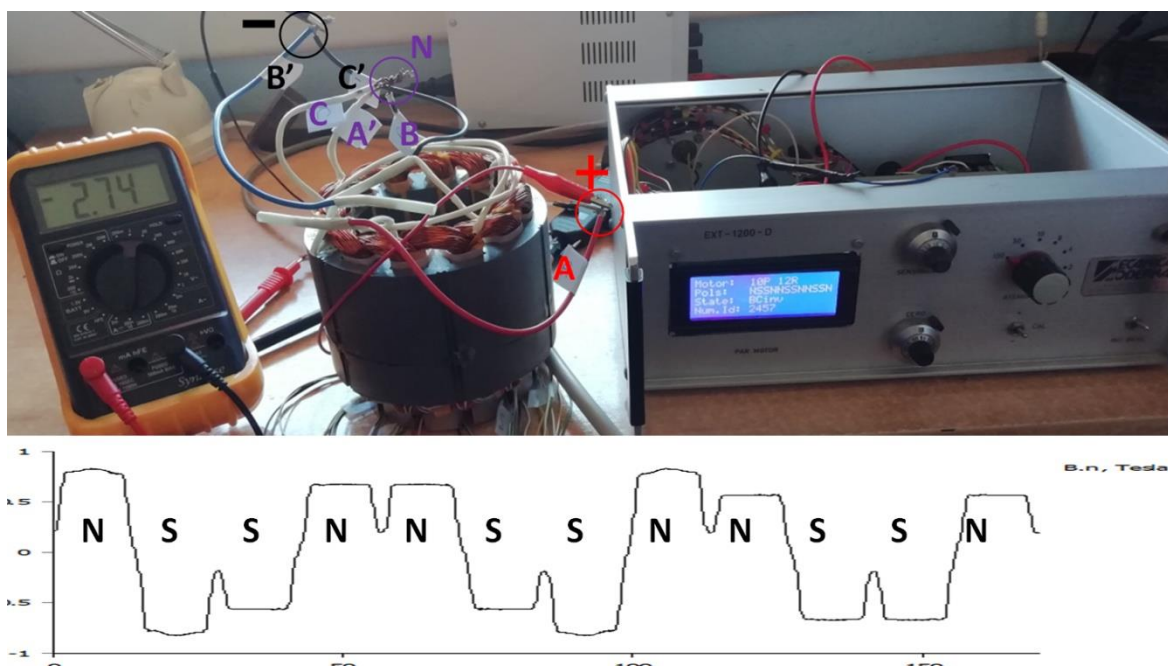


Figura 8.7. Validació del dispositiu amb les fases B i C a l'inrevés [4]

Es pot observar que el patró de camps magnètics coincideix amb el patró simulat en FEMM per les fases B i C a l'inrevés.

El dispositiu actua correctament en les diferents combinacions. És capaç d'accionar una sortida digital quan el bobinat és correcte i d'informar de l'error quan el bobinat és incorrecte. Amb aquestes condicions el dispositiu estarà preparat per ser utilitzat en la fàbrica de construcció de motors.

9. Anàlisi Econòmica

9.1. Cost del dispositiu de verificació

En aquest apartat es mostrarà el cost requerit per a la construcció del dispositiu de verificació de bobinats. Com a mode de resum es desglossarà en la següent taula el cost de les peces, cost a causa del temps dedicat de disseny i construcció de l'enginyer, i els costos de mecanització.

Taula 2. Cost dispositiu de verificació

Component/procés	Unitats/Temps	Cost/unitat o Cost/temps	Cost
Disseny i construcció per part de l'enginyer	600 hores	15 €/hora	9.000 €
Útil del rotor	1	300 €/unitat	300 €
Caixa del dispositiu	1	20 €/unitat	20 €
Sensors Hall	20	3,36 €/10 unitats	6,72 €
Connectors DB9	4	2,5 €/unitat	10 €
Resistències 3,3 Ω	3	4,34 €/unitat	13,02 €
Convertidor 12VDC	1	15 €/unitat	15 €
Arduino Mega	1	14 €/unitat	14 €
Mòdul adaptador de senyals	1	20 €/unitat	20 €
Carregador 5 VDC	1	5,17 €/unitat	5,17 €
Cablejat dispositiu	1	8 €/unitat	8 €
Total			9.411,91 €

El cost total del disseny, fabricació i construcció del dispositiu és de **9.411,91 €**.

9.2. Cost de fabricació actual

A continuació es farà una estimació del cost anual de la fabricació dels estators sense tenir en compte la utilització del dispositiu de verificació.

L'operari encarregat de bobinar l'estator haurà de fer les connexions corresponents per deixar l'estator finalment bobinat. Un cop bobinat, ja que el motor haurà de funcionar en condicions humides, se li aplicarà un resinat. Aquesta resina implica que si s'ha bobinat malament, o hi ha algun error produït per la màquina de bobinar, s'hagi de desprendre d'aquest per la seva inutilitat.

El cost en pèrdues de desprendre's d'un estator mal bobinat i amb la capa de resina és de 20€ (inclou la matèria primera, la mecanització i el cable de coure aïllat). La probabilitat de què es fiqui la resina a un motor mal bobinat o amb algun problema de cablejat és del 2%. En un any es produeixen 10000 motors en l'horari normal de la fàbrica i en el cas que un estator estigui mal bobinat s'haurà de recuperar el temps malgastat en hores extres. El cost de la mà d'obra és de 10€/h en hores normals i de 15 €/h en hores extres. El temps malgastat en bobinar de manera incorrecta l'estator és d'0,5 h.

Taula 3. Cost de fabricació actual

Peça/procés	Unitats	Temps	Cost/unitat o Cost/temps	Cost
Nº d'estators malgastats	200	-	20 €/unitat	4000 €
Nº d'estators útils produïts en hores normals	9800	-	20 €/unitat	196.000 €
Nº d'estators útils produïts en hores extres	200	-	20 €/unitat	4000 €
Mà d'obra en la construcció dels estators en hores normals	1 operari	1 any (261 dies laborables)	10 €/hora	20880 €
Mà d'obra en la construcció dels estators en hores extres	1 operari	100 hores	15 €/hora	1500 €
Total				226.380 €

El cost total de la fabricació i construcció dels estators en un any és de **226.380 €**.

9.3. Cost de fabricació amb el dispositiu de verificació

A continuació es farà una estimació del cost anual de la fabricació dels estators tenint en compte la utilització del dispositiu de verificació.

En utilitzar el dispositiu s'aconseguirà comprovar que tots els estators aniran a parar a la següent etapa de fabricació estant correctament bobinats.

La inversió inicial serà de **9.411,91 €**, que serà el cost d'adquisició del dispositiu.

Taula 4. Cost de fabricació amb dispositiu de verificació

Peça/procés	Unitats	Temps	Cost/unitat o Cost/temps	Cost
Inversió inicial	1	-	9.411,91 €/unitat	9.411,91 €
Nº d'estators malgastats	0	-	20 €/unitat	0 €
Nº d'estators útils produïts en hores normals	10000	-	20 €/unitat	200.000 €
Nº d'estators útils produïts en hores extres	0	-	20 €/unitat	0 €
Mà d'obra en la construcció dels estators en hores normals	1 operari	1 any (261 dies laborables)	10 €/hora	20880 €
Mà d'obra en la construcció dels estators en hores extres	1 operari	0 hores	15 €/hora	0 €
Cost total 1r any				230.291,91 €
Cost a partir del 2n any				220.880 €

El cost total de la fabricació i construcció dels estators al primer any, tenint en compte la inversió inicial és de **230.291,91 €**. A partir del segon any el cost anual serà de **220.880€**.

9.4. Viabilitat

A continuació es farà una l'estudi de viabilitat econòmica per saber si serà rendible la implementació del dispositiu a la fàbrica.

Es prendrà com l'estalvi anual com la diferència entre el cost anual de fabricació amb i sense el dispositiu.

$$\text{Estalvi} = 226.380 - 220.880 = 5500 \text{ €}$$

Prenent un període de 3 anys amb una taxa d'interès del 15% obtenim els següents resultats.

Taula 5. Viabilitat econòmica

Any	0	1	2	3
Inversió	9.411,91			
Estalvi		5.500	5.500	5.500
Moviment de fons	-9.411,91	5.500	5.500	5.500
Moviment de fons actualitzat (i=10%)	-9.411,91	5.000	4.545,45	4.132,23
Acumulat	-9.411,91	-4.411,91	133,544545	4.265,77595

El VAN serà de **4265,78 €** i el TIR del **34,32 %**.

$$VAN = -9411,91 + 5000 + 4545,45 + 4132,23 = 4265,78 \text{ €}$$

La recuperació de la inversió serà en 1,97 anys, pràcticament **2 anys**.

A causa que el VAN de l'anàlisi econòmic és positiu i el TIR és molt elevat es donarà per assegurada la viabilitat de la introducció del dispositiu a la fàbrica.

10. Conclusions

Aquest projecte ha tingut com a objectiu la solució d'un problema específic dintre d'un procés de fabricació d'un motor elèctric. A causa de la complexitat i el nombre total d'operacions que s'ha de fer per bobinar un estator d'una màquina elèctrica, és molt probable que el resultat final no sigui com el que un s'espera.

Dins de l'anàlisi exposat, s'ha intentat establir un criteri d'enginyeria amb el qual validar el resultat final del bobinat d'un estator. El criteri serà el de la simulació dels camps magnètics per saber el sentit del camp magnètic a cada ranura del motor. Amb aquest criteri es tindrà coneixement de quines són les condicions a partir de les quals es podrà donar per acabada l'etapa de fabricació. Durant el desenvolupament del projecte s'ha requerit la construcció d'un dispositiu que pugui reconèixer aquestes condicions, processar la informació rebuda i validar el resultat de l'assaig de l'estator. Per poder obtenir les condicions i avaluar-les ha sigut necessària la introducció de sensors per poder detectar els camps magnètics comentats, que sorgiran mitjançant l'aplicació de corrent als bobinats amb un convertidor, un microcontrolador per processar i avaluar la informació per després mostrar-la per pantalla.

Finalment, després de dur a la pràctica el dispositiu de verificació de bobinats es pot dir que funciona amb les prestacions establertes inicialment. S'ha aconseguit crear un dispositiu capaç de detectar que els bobinats formen els camps magnètics adequats, condició indispensable que significa que s'ha bobinat correctament.

11. Agraïments

Vull agrair a totes les persones que m'han donat suport durant el meu període d'elaboració del TFG i també a tots aquells que han hagut d'aguantar els meus sermons, dubtes, i inquietuds que m'anaven sorgint al llarg del treball.

Vull agrair especialment al tutor del TFG per tots els coneixements que he adquirit durant les assignatures de màquines i també durant l'optativa de disseny de màquines. També vull agrair-li tota l'ajuda i paciència que ha tingut amb mi durant el transcurs del treball.

12. Annexos

12.1. Taula de resultats de les combinacions al bobinar

A continuació es presentarà, com a mode de resum, les diferents combinacions possibles dels errors al bobinar l'estator del motor. S'interpretarà com a pol nord l' "1" i com a pol sud el "0".

Taula6. Combinacions bobinat

Bobinat	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	ID combinació
Correcte	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1701
A1inv	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1702
A2inv	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1637
Ainv	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1638
B1inv	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	2725
A1B1inv	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	2726
A2B1inv	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	2661
AB1inv	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	2662
B2inv	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1685
A1B2inv	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1686
A2B2inv	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1621
AB2inv	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1622
Binv	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	2709
A1Binv	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	2710
A2Binv	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	2645
ABinv	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	2646
C1inv	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1445
A1C1inv	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1446
A2C1inv	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1381
AC1inv	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1382
B1C1inv	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	2469
A1B1C1inv	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	2470
A2B1C1inv	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	2405
AB1C1inv	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	2406
B2C1inv	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1429
A1B2C1inv	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1430
A2B2C1inv	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1365
AB2C1inv	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1366
BC1inv	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	2453
A1BC1inv	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	2454

A2BC1inv	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	2389
ABC1inv	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	2390
C2inv	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1705
A1C2inv	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1706
A2C2inv	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1641
AC2inv	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1642
B1C2inv	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	2729
A1B1C2inv	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	2730
A2B1C2inv	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	2665
AB1C2inv	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	2666
B2C2inv	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1689
A1B2C2inv	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1690
A2B2C2inv	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1625
AB2C2inv	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1626
BC2inv	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	2713
A1BC2inv	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	2714
A2BC2inv	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	2649
ABC2inv	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	2650
Cinv	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1449
A1Cinv	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1450
A2Cinv	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1385
ACinv	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1386
B1Cinv	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	2473
A1B1Cinv	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	2474
A2B1Cinv	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	2409
AB1Cinv	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	2410
B2Cinv	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1433
A1B2Cinv	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1434
A2B2Cinv	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1369
AB2Cinv	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1370
BCinv	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	2457
A1BCinv	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	2458
A2BCinv	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	2393
ABCinv	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	2394

12.2. Codi del software del dispositiu amb Arduino IDE 1.5.7

A continuació es mostrarà el codi complet del programa amb comentaris de les diferents funcions i paràmetres.

```
//Importació de les llibreries de la LCD
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Wire.h>

//Paràmetres de la LCD
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4);

//Conjunt de combinacions
String correcte = "CORRECTE"; //1
String A1inv = "A1inv"; //2
String A2inv = "A2inv"; //3
String Ainv = "Ainv"; //4
String B1inv = "B1inv"; //5
String A1B1inv = "A1B1inv"; //6
String A2B1inv = "A2B1inv"; //7
String AB1inv = "AB1inv"; //8
String B2inv = "B2inv"; //9
String A1B2inv = "A1B2inv"; //10
String A2B2inv = "A2B2inv"; //11
String AB2inv = "AB2inv"; //12
String Binv = "Binv"; //13
String A1Binv = "A1Binv"; //14
String A2Binv = "A2Binv"; //15
String ABinv = "ABinv"; //16
String C1inv = "C1inv"; //17
String A1C1inv = "A1C1inv"; //18
String A2C1inv = "A2C1inv"; //19
String AC1inv = "AC1inv"; //20
String B1C1inv = "B1C1inv"; //21
String A1B1C1inv = "A1B1C1inv"; //22
String A2B1C1inv = "A2B1C1inv"; //23
String AB1C1inv = "AB1C1inv"; //24
String B2C1inv = "B2C1inv"; //25
String A1B2C1inv = "A1B2C1inv"; //26
String A2B2C1inv = "A2B2C1inv"; //27
String AB2C1inv = "AB2C1inv"; //28
String BC1inv = "BC1inv"; //29
String A1BC1inv = "A1BC1inv"; //30
String A2BC1inv = "A2BC1inv"; //31
String ABC1inv = "ABC1inv"; //32
String C2inv = "C2inv"; //33
String A1C2inv = "A1C2inv"; //34
String A2C2inv = "A2C2inv"; //35
String AC2inv = "AC2inv"; //36
```

```

String B1C2inv = "B1C2inv"; //37
String A1B1C2inv = "A1B1C2inv"; //38
String A2B1C2inv = "A2B1C2inv"; //39
String AB1C2inv = "AB1C2inv"; //40
String B2C2inv = "B2C2inv"; //41
String A1B2C2inv = "A1B2C2inv"; //42
String A2B2C2inv = "A2B2C2inv"; //43
String AB2C2inv = "AB2C2inv"; //44
String BC2inv = "BC2inv"; //45
String A1BC2inv = "A1BC2inv"; //46
String A2BC2inv = "A2BC2inv"; //47
String ABC2inv = "ABC2inv"; //48
String Cinv = "Cinv"; //49
String A1Cinv = "A1Cinv"; //50
String A2Cinv = "A2Cinv"; //51
String ACinv = "ACinv"; //52
String B1Cinv = "B1Cinv"; //53
String A1B1Cinv = "A1B1Cinv"; //54
String A2B1Cinv = "A2B1Cinv"; //55
String AB1Cinv = "AB1Cinv"; //56
String B2Cinv = "B2Cinv"; //57
String A1B2Cinv = "A1B2Cinv"; //58
String A2B2Cinv = "A2B2Cinv"; //59
String AB2Cinv = "AB2Cinv"; //60
String BCinv = "BCinv"; //61
String A1BCinv = "A1BCinv"; //62
String A2BCinv = "A2BCinv"; //63
String ABCinv = "ABCinv"; //64

//Funció de la sortida digital que s'activa quan el bobinat és correcte
int PASA(int CMag[]){
    if (CMag[0]==1 && CMag[1]==0 && CMag[2]==1 && CMag[3]==0 && CMag[4]==0 && CMag[5]==1
        && CMag[6]==0 && CMag[7]==1 && CMag[8]==0 && CMag[9]==1 && CMag[10]==1 && CMag[11]==0 ){
        return 1;}
    else{
        return 0;}
}

//Funció que dona el veredict de l'estator de 12 ranures 10 pols
String Veredictel(int CMag[]){
    if (CMag[0]==1 && CMag[1]==0 && CMag[2]==1 && CMag[3]==0 && CMag[4]==0 && CMag[5]==1 && CMag[6]==0
        && CMag[7]==1 && CMag[8]==0 && CMag[9]==1 && CMag[10]==1 && CMag[11]==0 ){return correcte;} //1
    if (CMag[0]==0 && CMag[1]==1 && CMag[2]==1 && CMag[3]==0 && CMag[4]==0 && CMag[5]==1 && CMag[6]==0
        && CMag[7]==1 && CMag[8]==0 && CMag[9]==1 && CMag[10]==1 && CMag[11]==0 ){return Alinv;} //2

```



```

//Funció que dona el veredict de l'estator de 12 ranures 15 pols
String Veredict2(int CMag[]){
    if (CMag[0]==1 && CMag[1]==0 && CMag[2]==1 && CMag[3]==0 && CMag[4]==0 && CMag[5]==1 && CMag[6]==0
        && CMag[7]==1 && CMag[8]==0 && CMag[9]==1 && CMag[10]==1 && CMag[11]==0 ){return "NOT FOUND";} //1
    if (CMag[0]==0 && CMag[1]==1 && CMag[2]==1 && CMag[3]==0 && CMag[4]==0 && CMag[5]==1 && CMag[6]==0
        && CMag[7]==1 && CMag[8]==0 && CMag[9]==1 && CMag[10]==1 && CMag[11]==0 ){return "NOT FOUND";} //2
    if (CMag[0]==1 && CMag[1]==0 && CMag[2]==1 && CMag[3]==0 && CMag[4]==0 && CMag[5]==1 && CMag[6]==1
        && CMag[7]==0 && CMag[8]==0 && CMag[9]==1 && CMag[10]==1 && CMag[11]==0 ){return "NOT FOUND";} //3
    if (CMag[0]==0 && CMag[1]==1 && CMag[2]==1 && CMag[3]==0 && CMag[4]==0 && CMag[5]==1 && CMag[6]==1
        && CMag[7]==0 && CMag[8]==0 && CMag[9]==1 && CMag[10]==1 && CMag[11]==0 ){return "NOT FOUND";} //4
    if (CMag[0]==1 && CMag[1]==0 && CMag[2]==1 && CMag[3]==0 && CMag[4]==0 && CMag[5]==1 && CMag[6]==0
        && CMag[7]==1 && CMag[8]==0 && CMag[9]==1 && CMag[10]==0 && CMag[11]==1 ){return "NOT FOUND";} //5
    if (CMag[0]==0 && CMag[1]==1 && CMag[2]==1 && CMag[3]==0 && CMag[4]==0 && CMag[5]==1 && CMag[6]==0
        && CMag[7]==1 && CMag[8]==0 && CMag[9]==1 && CMag[10]==0 && CMag[11]==1 ){return "NOT FOUND";} //6
    if (CMag[0]==1 && CMag[1]==0 && CMag[2]==1 && CMag[3]==0 && CMag[4]==0 && CMag[5]==1 && CMag[6]==1
        && CMag[7]==0 && CMag[8]==0 && CMag[9]==1 && CMag[10]==0 && CMag[11]==1 ){return "NOT FOUND";} //7
    if (CMag[0]==0 && CMag[1]==1 && CMag[2]==1 && CMag[3]==0 && CMag[4]==0 && CMag[5]==1 && CMag[6]==1
        && CMag[7]==0 && CMag[8]==0 && CMag[9]==1 && CMag[10]==0 && CMag[11]==1 ){return "NOT FOUND";} //8
    else{
        return "NOT FOUND";
    }
}

//Funció que actualitza els resultats a la LCD de l'estator de 12 ranures 10 pols
void LCD12(String a,int CMag[], int acum){
    lcd.clear();//Limpiamos la LCD
    lcd.print("Motor: 10P 12R");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Pols: ");
    for (int i=0;i<12;i++)
    {
        if (CMag[i]==1){
            lcd.print("N");
        }
        else{
            lcd.print("S");
        }
    }
    lcd.setCursor(0,2);
    lcd.print("State: ");
    lcd.print(a);//Escribimos en la primera linea
    lcd.setCursor(0,3);
    lcd.print("Num. Id: ");
    lcd.print(acum);
}

```

```

//Funció que actualitza els resultats a la LCD de l'estator de 15 ranures 10 pols
void LCD15(String a,int CMag[], int acum){
  lcd.clear();//Limpiamos la LCD
  lcd.print("Motor: 10P 15R");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Pols:");
  for (int i=0;i<15;i++)
  {
    if (CMag[i]==1){
      lcd.print("N");
    }
    else{
      lcd.print("S");
    }
  }
  lcd.setCursor(0,2);
  lcd.print("State: ");
  lcd.print(a);//Escribimos en la primera linea
  lcd.setCursor(0,3);
  lcd.print("Num. Id: ");
  lcd.print(acum);
}

//Funció que dona per sortida el nº ID de l'estator de 12 ranures 10 pols
int Eval1(int CMag[]){
  int acum= CMag[0]*pow(2,0)+CMag[1]*pow(2,1)+CMag[2]*pow(2,2)+CMag[3]*pow(2,3)+CMag[4]*pow(2,4)+
  CMag[5]*pow(2,5)+CMag[6]*pow(2,6)+CMag[7]*pow(2,7)+CMag[8]*pow(2,8)+CMag[9]*pow(2,9)+
  CMag[10]*pow(2,10)+CMag[11]*pow(2,11);
  return acum;
}

//Funció que dona per sortida el nº ID de l'estator de 15 ranures 10 pols
int Eval2(int CMag[]){
  int acum= CMag[0]*pow(2,0)+CMag[1]*pow(2,1)+CMag[2]*pow(2,2)+CMag[3]*pow(2,3)+CMag[4]*pow(2,4)+
  CMag[5]*pow(2,5)+CMag[6]*pow(2,6)+CMag[7]*pow(2,7)+CMag[8]*pow(2,8)+CMag[9]*pow(2,9)+
  CMag[10]*pow(2,10)+CMag[11]*pow(2,11)+CMag[12]*pow(2,12)+CMag[13]*pow(2,13)+CMag[14]*pow(2,14);
  return acum;
}

```

```

//Part del programa que s'executa un cop
void setup() {
  for (int thisPin = 0; thisPin < 12; thisPin++) { //Declarar els pins de lectura
                                                    //dels sensors del motor de 12R
    pinMode(22+thisPin*2, INPUT);}

  for (int thisPin = 0; thisPin < 15; thisPin++) { //Declarar els pins de lectura dels
                                                    //sensors del motor de 15R
    pinMode(23+thisPin*2, INPUT);}
  pinMode(2,OUTPUT); //Sortida digital si bobinat és correcte
  pinMode(3,INPUT); //Entrada del interruptor per saber si és el bobinat de 12R(5V) o de 15R(0V)
  Serial.begin(9600);
  lcd.backlight();
  lcd.init();
}

//Part del programa que es repeteix indefinidament
void loop() {
  int Lectures12R[12];
  for (int thisPin = 0; thisPin < 12; thisPin++) { //Resgistrar la lectura dels sensors del motor de 12R
    Lectures12R[thisPin]=digitalRead(22+2*thisPin);}

  int Lectures15R[15];
  for (int thisPin = 0; thisPin < 15; thisPin++) { //Resgistrar la lectura dels sensors del motor de 12R
    Lectures15R[thisPin]=digitalRead(23+2*thisPin);}
  //Quan estado és igual a 1 s'executarà el programa per l'estator de 12 ranures i quan
  // és 0 el de 15 ranures
  int estado=digitalRead(3);

  if (estado==1){

    int acum2=Eval1(Lectures12R); //1600
    int b =acum2;
    digitalWrite(2,PASA(Lectures12R));
    String a=Veredictel(Lectures12R);
    LCD12(a,Lectures12R,acum2);
    bool bo= true ;
    bool esl=true;
  }
}

```

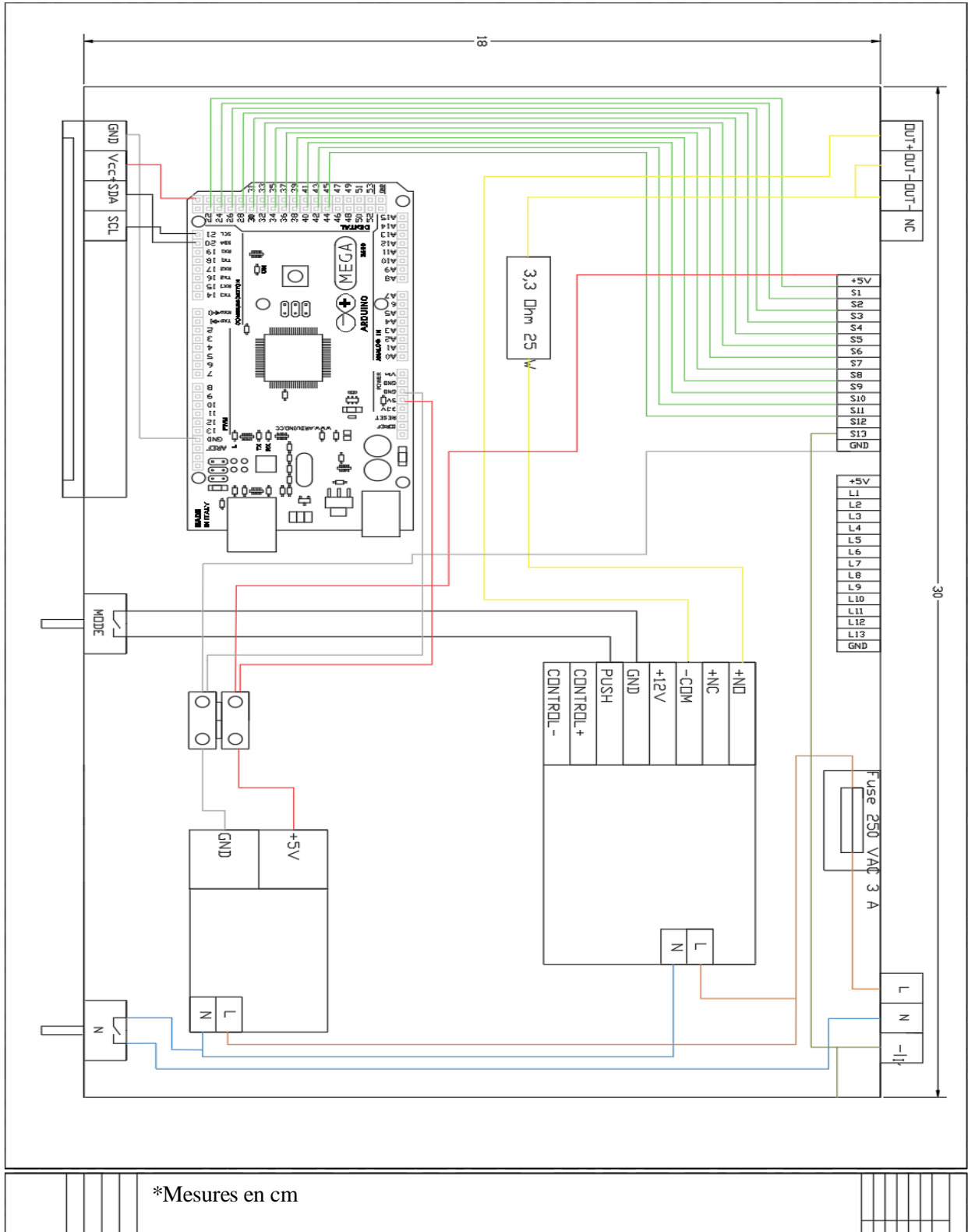
```

//bucle que permet que la pantalla només s'actualitzi quan hi hagi un canvi dels sensors
while (bo && es1){
  Serial.println(acum2);
  Serial.println(b);
  int lectures12R[12];
  for (int thisPin = 0; thisPin < 12; thisPin++) { //Registrar la lectura dels sensors
                                                    //del motor de 12R
    lectures12R[thisPin]=digitalRead(22+2*thisPin);}
  int acum2=Eval1(lectures12R);
  int es1=digitalRead(3);
  delay(100);
  if (Eval1(lectures12R) != b){
    bo=false;
  }
  if (es1 == 0){
    es1=false;
  }
}

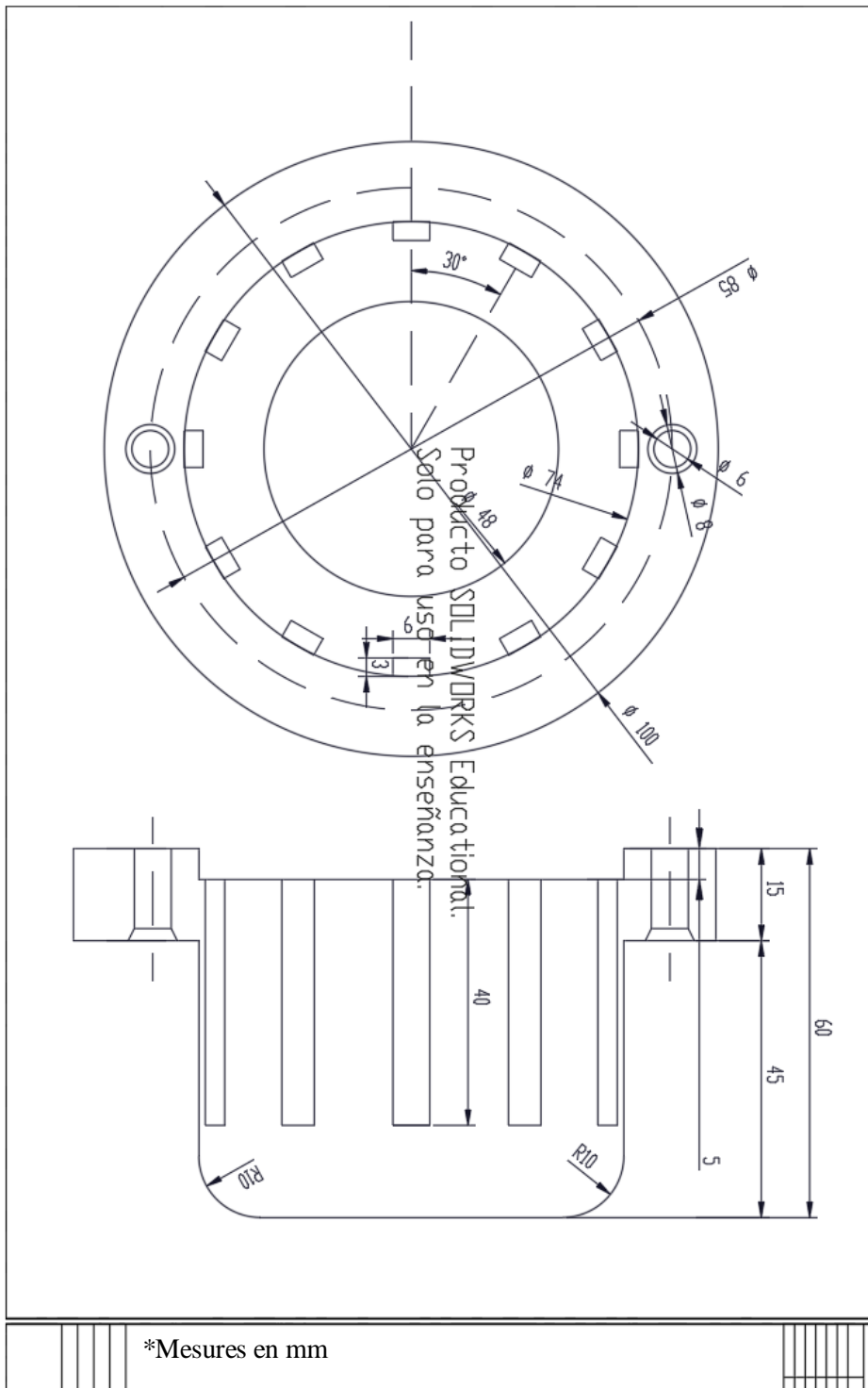
if (estado==0){
  int acum2=Eval2(Lectures15R); //1600
  int b =acum2;
  digitalWrite(2,PASA(Lectures15R));
  String a=Veredict2(Lectures15R);
  LCD15(a,Lectures15R,acum2);
  bool bo= true ;
  bool es2=true;
  while (bo && es2){
    Serial.println(acum2);
    Serial.println(b);
    int lectures15R[15];
    for (int thisPin = 0; thisPin < 15; thisPin++) {
      //Registrar la lectura dels sensors del motor de 12R
      lectures15R[thisPin]=digitalRead(23+2*thisPin);}
    int ess=digitalRead(3);
    int acum2=Eval2(lectures15R);
    delay(100);
    if (Eval2(lectures15R) != b){
      bo=false;
    }
    if (ess == 1){
      es2=false;
    }
  }
}

```

12.3. Plànols del cablejat del dispositiu de verificació



12.4. Plànol de l'útil del rotor



13. Bibliografia

- [1] Apunts Màquines I
- [2] Apunts Màquines II
- [3] Apunts optativa Disseny de Màquines J
- [4] FEMM DOCUMENTATION (FEMM Reference Manual)
[URL:<http://www.femm.info/wiki/Documentation/>]
- [5] XARXA TRIFÀSICA (imatges sistema equilibrat)
[URL:<https://automatismosuets.wordpress.com/la-red-trifasica/>]
- [6] CONEXIÓN ESTRELLA [URL:[https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema trif%C3%A1sico](https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_trif%C3%A1sico)]
- [7] ESQUEMES BOBINATS [URL:<https://www.jmag-international.com/express/>]
- [8] FERRO DEL MOTOR (non-orientedsteel) [URL:<https://www.aksteel.com/our-products/electrical-steel/non-oriented-electrical-steels>]
- [9] SENSOR HALL [URL:https://ca.wikipedia.org/wiki/Sensor_d%27efecte_Hall]
- [10] LCD [URL:https://ca.wikipedia.org/wiki/Pantalla_de_cristall_l%C3%ADquid]
- [11] I2C [URL:<https://ca.wikipedia.org/wiki/I%C2%B2C>]
- [12] MAGNETIC THEORIES [URL:<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/a-review-of-basic-magnetic-theories/>]
- [13] PSIM [URL:<https://powersimtech.com/products/psim/>]
- [14] SOLIDWORKS
[URL:https://help.solidworks.com/2018/English/WhatsNew/c_documentation.htm]
- [15] SENSOR HALL (datasheet) [URL:<https://www.elecrow.com/download/A3141-2-3-4-Datasheet.pdf>]
- [16] ARDUINO (documentació) [URL:<https://www.arduino.cc/en/Guide/HomePage>]