# RESUM

L'actual model energètic precisa un imminent canvi per a què aquest sigui més net i sostenible. La generació d'energia elèctrica a partir de l'energia eòlica és una possible solució que requereix una investigació per optimitzar els aerogeneradors. Aquests, encarregats de transformar l'energia mecànica de la turbina produïda pel vent en energia elèctrica, precisen un important desenvolupament.

En el present projecte s'ha volgut dissenyar un prototip de generador de flux axial, emprant imants permanents, per a què posteriorment sigui utilitzat en aplicacions eòliques amb la finalitat d'obtenir energia elèctrica. Aquest està format per 10 imants i 15 bobines de forma circular, les quals seran encarregades de generar energia elèctrica. S'ha estudiat acuradament el seu decalatge per a garantir un correcte funcionament i poder generar un corrent trifàsic.

Diverses simulacions i resolucions de càlculs de les equacions de la màquina s'han dut a terme a partir del MATLAB - SIMULINK per observar i extreure conclusions del funcionament del prototip del generador.

S'ha realitzat un estudi de caràcter global per a conèixer quins són els impactes que causen els aerogeneradors en el medi ambient, així com un estudi propi d'impacte ambiental del disseny del generador.

També s'ha mencionat un estudi econòmic per a conèixer quants seran els anys en què es trigarà en amortitzar el prototip un cop generi energia elèctrica.

El projecte de recerca ha donat pas a l'obtenció d'un seguit d'equacions pròpies de la màquina dissenyada, essent aquestes una futura possible línia d'investigació.

# ABSTRACT

The current energy model requires an imminent change to make it cleaner and more sustainable. The generation of electricity from wind energy is a possible solution that requires an investigation to optimize the wind turbines. These, responsible for transforming the mechanical energy produced by the wind turbine into electrical energy, need an important development.

In this project we have tried to design a prototype axial flux generator, by using permanent magnets, to be used later in wind energy applications in order to obtain electricity. This is formed by ten magnets and fifteen round coils, which will generate electrical energy. We have studied carefully its offset to ensure proper working and to generate a three-phase current.

Several simulations and calculations of the machine have been carried out from MATLAB - SIMULINK to observe and draw conclusions from the working of the prototype generator.

We have done a global study to learn which are the impacts caused by wind turbines on the environment, and a proper study of environmental impact of generator design.

Also, we have mentioned an economic study to know how many years would it take to amortize once the machine begin generating wind power.

The research project has given way to obtaining a set of equations specific to the machine designed, being this a possible future line of research.

# ÍNDEX


**RESUM** ..... 1

**ABSTRACT** ..... 1

**ÍNDEX DE FIGURES** ..... 9

**ÍNDEX D'EQUACIONS** ..... 14

**ÍNDEX DE TAULES** ..... 19

**SIMBOLOGIA** ..... 20

**1. INTRODUCCIÓ** ..... 28

1.1. INTRODUCCIÓ DEL PROJECTE ..... 29
1.2. OBJECTIUS DEL PROJECTE ..... 30
1.3. ABAST DEL PROJECTE ..... 30

**2. RECURSOS EÒLICS** ..... 31

2.1. ENERGIA EÒLICA ..... 32
*2.1.1. Història de l'energia eòlica ..... 32*
2.2. ORIGEN DEL VENT ..... 33
2.3. DENSITAT DEL VENT ..... 34
2.4. EFECTE DE CORIOLIS ..... 34
*2.4.1. Com afecta la força de Coriolis als vents globals ..... 35*
2.5. ATMOSFERA ..... 36
2.6. TIPUS DE VENTS ..... 36
*2.6.1. Vents globals ..... 36*
2.6.1.1. Zona de convergència intertropical ..... 37
2.6.1.2. Zona de divergència subtropical ..... 37
2.6.1.3. Zones de convergència polar ..... 37
*2.6.2. Vents locals ..... 37*
2.6.2.1. Vents de muntanya ..... 37
2.6.2.2. Brises marines ..... 37
2.6.2.3. Vent catabàtic ..... 38
2.6.2.4. Vent anabàtic ..... 38
*2.6.3. Vents geostròfics ..... 38*
*2.6.4. Vents superficials ..... 39*
*2.6.5. Turbulències ..... 39*
2.7. DISTRIBUCIÓ DE WEIBULL ..... 40
*2.7.1. Mètode analític ..... 40*
*2.7.2. Mètode gràfic ..... 41*
*2.7.3. Variació del vent en funció de l'alçada i dels obstacles ..... 42*
2.8. VALORS EXTREMS DEL VENT ..... 44
2.9. ALTRES EFECTES ..... 44
*2.9.1. Efecte del parc ..... 44*
*2.9.2. Efecte túnel ..... 44*
*2.9.3. Efecte muntanya ..... 45*
2.10. EFECTES DEL VENT SOBRE L'AEROGENERADOR ..... 46
*2.10.1. Àrea d'escombrada de les pales la turbina ..... 46*
*2.10.2. Desviació del vent ..... 46*
2.10.2.1. Llei de Betz ..... 47

2.10.2.1.1. Introducció ..... 47
2.10.2.1.2. Demostració ..... 48
*2.10.3. Distribució de la pressió de l'aire a la part davantera i posterior del rotor. ..... 49*
*2.10.4. Potència i energia ..... 49*
*2.10.5. Presa de dades ..... 50*
*2.10.6. L'anemòmetre ..... 50*
*2.10.7. El màstil ..... 51*
*2.10.8. Data logger ..... 51*

**3. L'AEROGENERADOR ..... 52**

3.1. INTRODUCCIÓ ALS AEROGENERADORS ..... 53
3.2. CLASSIFICACIÓ ..... 53
*3.2.1. Rotor d'eix horitzontal ..... 53*
3.2.1.1. Constitució ..... 54
3.2.1.2. Avantatges ..... 58
3.2.1.3. Inconvenients ..... 58
*3.2.2. Rotor d'eix vertical ..... 58*
3.2.2.1. Rotor Savonius ..... 59
3.2.2.1.1. avantatges ..... 59
3.2.2.1.2. inconvenients ..... 60
3.2.2.2. Rotor Darrieus ..... 60
3.2.2.2.1. avantatges ..... 61
3.2.2.2.2. Inconvenients ..... 61
3.2.2.3. Rotor Darrieus i Savonius ..... 61
3.3. COMPARACIÓ ..... 62
3.4. DISPOSICIÓ DEL ROTOR ..... 63
*3.4.1. Funcionament a sobrevent ..... 63*
*3.4.2. Funcionament a sotavent ..... 63*
3.5. VELOCITATS ..... 63
3.6. ORIENTACIÓ DE L'AEROGENERADOR ..... 64
*3.6.1. Amb penell ..... 64*
*3.6.2. Amb conicitat ..... 64*
*3.6.3. Amb molins auxiliars ..... 64*
3.6.3.1. Pas variable ..... 65
3.6.3.2. Regulació activa per pèrdues aerodinàmiques ..... 65
3.6.3.3. Regulació passiva per pèrdues aerodinàmiques ..... 65

**4. PARTS D'UN AEROGENERADOR SÍNCRON AMB IMANTS PERMANENTS DE FLUX AXIAL ..... 66**

4.1. INTRODUCCIÓ A LES PARTS D'UN GENERADOR SÍNCRON D'IMANTS PERMANENTS ..... 67
4.2. ROTOR ..... 67
*4.2.1. Constitució ..... 67*
*4.2.2. Formes constructives típiques ..... 67*
4.3. ESTATOR ..... 68
*4.3.1. Acer magnètic ..... 68*
4.3.1.1. Revestiment ..... 68
4.3.1.2. Propietats magnètiques ..... 68
4.4. BOBINES ..... 69
*4.4.1. Construcció ..... 69*
4.4.1.1. Energia emmagatzemada ..... 69
4.4.1.2. Model matemàtic d'una bobina ..... 69
4.4.1.3. Comportaments ideals i reals ..... 71
4.4.1.3.1. Comportaments en corrent continu ..... 71

4.4.1.3.2. Comportaments en corrent altern ..... 72
4.5. IMANTS ..... 74
*4.5.1. Parts d'un imant ..... 74*
*4.5.2. Magnetisme ..... 74*
4.5.2.1. Camps i forces magnètiques ..... 75
*4.5.3. Imant de terres rares: Imant de neodimi ..... 76*
4.5.3.1. Descripció ..... 76
4.5.3.2. Producció ..... 76
4.5.3.3. Riscs ..... 77
4.5.3.4. Magnetització ..... 77
4.5.3.5. Producte energètic màxim ..... 78
4.5.3.6. Temperatura màxima ..... 78
4.5.3.7. Tipus de pèrdues per temperatura ..... 78
4.5.3.8. Duració de l'escalfament ..... 79
4.5.3.9. Forma i disposicions dels imants en les pèrdues per temperatura ..... 79
4.5.3.10. Força de subjecció ..... 79
4.5.3.11. Romanència ..... 80
4.5.3.11.1. Romanència de saturació ..... 80
4.5.3.12. Coercitivitat ..... 81
4.5.3.13. Inducció magnètica ..... 81
*4.5.4. Corba de desmagnetització ..... 81*

**5. DISSENY DEL GENERADOR ..... 82**

5.1. INTRODUCCIÓ AL DISSENY DEL GENERADOR ..... 83
5.2. DISSENY DEL ROTOR ..... 83
*5.2.1. Fotografies i disseny del disc de fre ..... 83*
5.3. DISSENY DE L'ESTATOR ..... 85
5.4. DISSENY BOBINES ..... 85
*5.4.1. Material del cable ..... 86*
*5.4.2. Dimensions del cable ..... 86*
*5.4.3. Dimensions del debanat ..... 86*
5.5. DISSENY IMANTS ..... 86
*5.5.1. Imant escollit pel disseny ..... 87*
5.5.1.1. Característiques tècniques ..... 88
5.5.1.2. Corba de desmagnetització ..... 89
5.5.1.3. Corba de la força de subjecció ..... 89
5.6. DISSENY DEL GENERADOR ..... 90
*5.6.1. Vista de planta dels imants solapant les bobines ..... 90*
*5.6.2. Rotor amb els imants ..... 90*
*5.6.3. Estator amb els debanats ..... 91*
*5.6.4. Generador assemblat ..... 92*

**6. CONNEXIÓ DEL BOBINAT ..... 93**

6.1. INTRODUCCIÓ A LA CONNEXIÓ DEL BOBINAT ..... 94
6.2. CONNEXIÓ DELS DEBANATS ..... 94
6.3. CIRCUIT EQUIVALENT PER FASE ..... 95
6.4. CIRCUIT EQUIVALENT DEL GENERADOR ..... 96

**7. CÀLCULS PARAMÈTRICS ..... 97**

7.1. INTRODUCCIÓ ALS CÀLCULS PARAMÈTRICS ..... 98
7.2. VELOCITAT DE SINCRONISME ..... 98
7.3. DECALATGE DELS IMANTS ..... 98

7.4. DECALATGE DE LES BOBINES ....99
7.5. INDUCCIÓ MAGNÈTICA ....99
7.6. IMPEDÀNCIA DEL GENERADOR ....100
*7.6.1. Inductància de la bobina ....100*
*7.6.2. Reactància de la bobina ....101*
*7.6.3. Resistència de la bobina ....102*
*7.6.4. Impedància ....103*
7.7. PÈRDUES ....103
*7.7.1. Pèrdues per efecte Joule ....104*
*7.7.2. Pèrdues en el nucli ....105*
*7.7.3. Pèrdues mecàniques. ....106*
*7.7.4. Pèrdues addicionals ....106*
*7.7.5. Pèrdues totals ....106*
7.8. POTÈNCIA ....107
*7.8.1. Potencia del vent ....108*
*7.8.2. Potencia d'entrada del generador ....108*
*7.8.3. Potència de sortida del generador ....108*
7.9. RENDIMENT ....109
7.10. ANALOGIA ELÈCTRICA DEL CIRCUIT MAGNÈTIC ....109
*7.10.1. Paràmetres del circuit magnètic ....111*
7.10.1.1. Força magnetomotriu ....111
7.10.1.2. Flux magnètic ....111
7.10.1.3. Reluctàncies ....111
7.10.1.3.1. Reluctància de l'imant ....112
7.10.1.3.2. reluctància de l'entreferro ....112
7.10.1.3.3. reluctància de la bobina solapada per un imant ....113
7.10.1.3.4. reluctància de la bobina no solapada ....114
7.10.1.3.5. reluctància del rotor ....114
7.10.1.3.6. reluctància de l'estator ....114

**8. EQUACIONS DE LA MÀQUINA DISSENYADA ....115**

8.1. INTRODUCCIÓ A LES EQUACIONS DE LA MÀQUINA ....116
8.2. ÀREES D'INTERSECCIÓ ....116
*8.2.1. Àrea d'intersecció d'un imant solapant una bobina ....116*
*8.2.2. Àrea d'intersecció de dos imants solapant una bobina. ....118*
8.3. FLUX GENERAT ....120
8.4. INTENSITAT ....120
8.5. FORÇA ELECTROMOTRIU GENERADA ....120

**9. RESULTATS OBTINGUTS DE LES EQUACIONS ....122**

9.1. INTRODUCCIÓ ALS RESULTATS OBTINGUTS ....123
9.2. RESULTATS OBTINGUTS EN LA SIMULACIÓ ....123
*9.2.1. Àrea d'intersecció ....123*
*9.2.2. Flux generat en la primera volta de bobina ....124*
*9.2.3. Flux generat en la bobina ....124*
*9.2.4. Corrent en una bobina ....125*
*9.2.5. Corrent produït pels 10 imants sobre una bobina ....125*
*9.2.6. Corrents de les tres fases ....126*

**10. SIMULACIÓ ....127**

10.1. INTRODUCCIÓ AL SOFTWARE DE SIMULACIÓ ....128

10.2. SIMULACIÓ AMB SIMULINK ..... 128
*10.2.1. Construcció de blocs per la simulació ..... 128*
10.2.1.1. Bloc de decalatge ..... 128
10.2.1.2. Bloc de conversió d'unitats de grau a radiants ..... 129
10.2.1.3. Blocs d'imants ..... 130
10.2.1.4. Bloc per a declarar la inducció ..... 132
10.2.1.5. Bloc per a invertir el valor del flux en l'imant negatiu ..... 132
10.2.1.6. Bloc per a declarar el nombre de voltes ..... 132
10.2.1.7. Bloc per a declarar la inductància ..... 132
*10.2.2. Blocs auxiliars per la simulació ..... 133*
10.2.2.1. Sumatori ..... 133
10.2.2.2. Bloc multiplicador ..... 133
10.2.2.3. Bloc divisor ..... 133
10.2.2.4. Bloc d'unió ..... 134
*10.2.3. Construcció de la simulació a partir dels blocs ..... 134*
10.2.3.1. Representació de la fase A en blocs ..... 135
10.2.3.2. Representació de la fase B en blocs ..... 136
10.2.3.3. Representació de la fase C en blocs ..... 137
10.2.3.4. Unió de fases per a la visualització de resultats ..... 138
*10.2.4. Visualització dels resultats ..... 138*

**11. APROFITAMENT DE L'ENERGIA ..... 139**

11.1. OPCIONS DE CONSUM ..... 140
*11.1.1. Connexió al consum ..... 140*
11.1.1.1. Avantatges ..... 140
11.1.1.2. Inconvenients ..... 140
*11.1.2. Càrrega de bateria ..... 141*
11.1.2.1. Avantatges ..... 141
11.1.2.2. Inconvenients ..... 141

**12. MANTENIMENT ..... 142**

12.1. INTRODUCCIÓ AL MANTENIMENT ..... 143
12.2. PREVENTIU ..... 143
*12.2.1. Avantatges ..... 144*
*12.2.2. Inconvenients ..... 144*
12.3. PREDICTIU ..... 144
*12.3.1. Avantatges ..... 145*
*12.3.2. Inconvenients ..... 145*
12.4. CORRECTIU ..... 145
*12.4.1. Avantatges ..... 146*
*12.4.2. Inconvenients ..... 146*

**13. IMPACTE AMBIENTAL ..... 147**

13.1. INTRODUCCIÓ L'ANÀLISI D'IMPACTE AMBIENTAL ..... 148
13.2. IMPACTE AMBIENTAL D'UN AEROGENERADOR ..... 148
*13.2.1. Objecte ..... 148*
*13.2.2. Impacte sonor ..... 148*
13.2.2.1. Contaminació acústica ..... 148
13.2.2.2. Efectes del soroll sobre la salut ..... 148
13.2.2.2.1. Efectes auditius ..... 148
13.2.2.2.2. Efectes no auditius ..... 149
13.2.2.2.3. Mesures adoptades a Espanya ..... 149

*13.2.3. Mesures i càlculs dels nivells de so ..... 149*
*13.2.4. Soroll dels aerogeneradors ..... 151*
13.2.4.1. Soroll mecànic ..... 151
13.2.4.2. Soroll aerodinàmic ..... 151
*13.2.5. Projecció d'ombres ..... 152*
*13.2.6. Regulació ..... 152*
*13.2.7. Predicció del parpelleig de l'ombra ..... 152*
*13.2.8. Impacte sobre la fauna ..... 153*
13.2.8.1. Avifauna ..... 153
13.2.8.2. Animals terrestres ..... 154
13.2.8.3. Fauna marina ..... 154
13.2.8.4. Flora ..... 155
13.3. IMPACTE AMBIENTAL DEL PROTOTIP ..... 155
*13.3.1. Consum energètic ..... 155*
13.3.1.1. Fase de disseny ..... 156
13.3.1.2. Fase de redacció de la memòria ..... 156
*13.3.2. Procedència dels materials ..... 156*
13.3.2.1. Disc de fre ..... 156
13.3.2.2. Imants ..... 156
13.3.2.3. Cable de coure esmaltat ..... 156
*13.3.3. Impacte visual ..... 157*

**14. VIABILITAT I ANÀLISI ECONÒMICS ..... 158**

14.1. INTRODUCCIÓ A LA VIABILITAT I ANÀLISI ECONÒMIC ..... 159
14.2. MARC LEGAL ..... 159
14.3. RÈGIM ECONÒMIC ..... 160
*14.3.1. Cedir energia ..... 160*
*14.3.2. Vendre energia ..... 161*
*14.3.3. Conclusions ..... 161*
14.4. PRESSUPOST DEL PROJECTE ..... 162
14.5. ESTUDI DE RENDIBILITAT ..... 162
*14.5.1. Càlcul del cost de generació d'energia ..... 162*
*14.5.2. Càlcul del període de retorn de la inversió ..... 164*

**15. NORMATIVA ..... 166**

**16. CONCLUSIONS ..... 168**

**17. APORTACIONS, RECOMANACIONS I FUTURS PROJECTES ..... 171**

17.1. APORTACIONS ..... 172
17.2. RECOMANACIONS ..... 172
17.3. FUTURS PROJECTES ..... 172

**18. BIBLIOGRAFIA ..... 173**

**19. ANNEX ..... 176**

19.1. CÀLCULS JUSTIFICATIUS ..... 177
*19.1.1. Velocitat de sincronisme ..... 177*
*19.1.2. Càlcul de l'alçada de la bobina ..... 177*
*19.1.3. Càlcul de la longitud total del cable ..... 177*
19.1.3.1. Longitud del cable d'una bobina ..... 177
19.1.3.2. Longitud de cable total ..... 178
*19.1.4. Càlcul de la inducció magnètica en el disc magnètic ..... 178*

*19.1.5. Força de subjecció de l'imant per un entreferro de 0,003 m ..... 179*
*19.1.6. Càlcul de la impedància del generador ..... 179*
19.1.6.1. Inductància de la bobina ..... 179
19.1.6.2. Reactància de la bobina ..... 179
19.1.6.3. Resistència del cable ..... 180
19.1.6.4. Càlcul de la impedància ..... 181
*19.1.7. Càlcul de les pèrdues ..... 182*
19.1.7.1. Pèrdues per efecte Joule ..... 182
19.1.7.2. Pèrdues mecàniques ..... 182
19.1.7.3. Pèrdues addicionals ..... 182
19.1.7.4. Pèrdues totals ..... 183
*19.1.8. Càlcul de potències ..... 183*
19.1.8.1. Potència del vent ..... 183
19.1.8.2. Càlcul de la potència d'entrada ..... 183
19.1.8.3. Càlcul de la potència de sortida ..... 184
*19.1.9. Càlcul del rendiment ..... 184*

# ÍNDEX DE FIGURES

Figura 1. Sentit del vent ocasionat per l'efecte de Coriolis. ....35

Figura 2. Vent catabàtic. ....38

Figura 3. Vent anabàtic. ....38

Figura 4. Distribució de Weibull. ....42

Figura 5. Efecte del parc. ....44

Figura 6. Efecte túnel. ....45

Figura 7. Efecte muntanya. ....45

Figura 8. Tub de vent al travessar el rotor. ....46

Figura 9. Corba de ràtio de ($P/P_o$) en funció de ($v_2/v_1$). ....49

Figura 10. Energia segons la velocitat del vent. ....49

Figura 11. Anemòmetre de cassoleta. ....50

Figura 12. Data logger. ....51

Figura 13. Aerogenerador bipala. ....53

Figura 14. Aerogenerador tripala. ....53

Figura 15. Aerogenerador multipala. ....53

Figura 16. Parts d'un aerogenerador. ....54

Figura 17. Generador síncron d'imants permanents. ....55

Figura 18. Generador síncron multipolar. ....56

Figura 19. Generador asíncron de gàbia d'esquirol. ....56

Figura 20. Generador asíncron de rotor bobinat. ....56

Figura 21. Generador asíncron doblement alimentat. ....57

Figura 22. Rotor Savonius. ....59

Figura 23. Forma Troposkien o corda de saltar. ....61

Figura 24. Rotor Darrieus. ....61

Figura 25. Rotor Darrieus i Savonius. ....62

Figura 26. Comparació de rendiments de varis aerogeneradors. ....62

Figura 27. Velocitats de la turbina eòlica. ....64

Figura 28. Esquema bobina. ....71
Figura 29. Resistència debanat d'una bobina. ....71
Figura 30. Diagrama temporal de les tensions i corrents en una bobina. ....72
Figura 31. Diagrama fasorial. ....72
Figura 32. Impedàncies en sèrie i paral·lel. ....73
Figura 33. Imants. ....74
Figura 34. Parts d'un imant. ....74
Figura 35. Línies de forces magnètiques produïdes per un camp magnètic. ....74
Figura 36. Corba de desmagnetització. ....81
Figura 37. Vista superior del disc de fre (rotor). ....83
Figura 38. Vista superior del rotor dissenyat. ....83
Figura 39. Vista frontal del disc de fre (rotor). ....84
Figura 40. Vista frontal del rotor dissenyat. ....84
Figura 41. Vista inferior del disc de fre (rotor). ....84
Figura 42. Vista inferior del rotor dissenyat. ....84
Figura 43. Vista isomètrica del disc de fre (rotor). ....84
Figura 44. Vista isomètrica del rotor dissenyat. ....84
Figura 45. Vista superior de la bobina dissenyada. ....85
Figura 46. Vista frontal de la bobina dissenyada. ....85
Figura 47. Vista isomètrica de la bobina dissenyada. ....85
Figura 48. Imatge de l'imant escollit pel disseny. ....87
Figura 49. Vista superior de l'imant dissenyat. ....87
Figura 50. Vista frontal de l'imant dissenyat. ....87
Figura 51. Vista isomètrica de l'imant dissenyat. ....88
Figura 52. Dimensions del disc magnètic S-45-10-N. ....88
Figura 53. Corba de desmagnetització del imant. ....89
Figura 54. Corba de la força de subjecció. ....89
Figura 55. Vista planta dels imants solapant les bobines. ....90

Figura 56. Vista frontal del rotor amb imants. ....91
Figura 57. Vista inferior del rotor amb imants. ....91
Figura 58. Vista superior de l'estator amb debanats. ....91
Figura 59. Vista frontal de l'estator amb debanats. ....92
Figura 60. Vista isomètrica de l'estator amb debanats. ....92
Figura 61. Vista frontal del generador. ....92
Figura 62. Vista isomètrica del generador. ....92
Figura 63. Connexió dels debanats. ....94
Figura 64. Circuit de la fase A. ....95
Figura 65. Circuit de la fase B. ....95
Figura 66. Circuit de la fase C. ....95
Figura 67. Circuit equivalent de la fase A. ....95
Figura 68. Circuit equivalent de la fase B. ....96
Figura 69. Circuit equivalent de la fase C. ....96
Figura 70. Circuit equivalent del generador connectat en triangle. ....96
Figura 71. Paràmetres d'un imant cilíndric pel càlcul de la seva inducció magnètica. ....100
Figura 72. Esquema d'una inductància d'una sola capa. ....101
Figura 73. Esquema de potències i pèrdues en el generador. ....103
Figura 74. Diagrama de flux de potència d'un generador trifàsic. ....107
Figura 75. Mapa conceptual de les potències. ....107
Figura 76. Circuit magnètic de la bobina sobreposada per un imant. ....110
Figura 77. Reluctància de l'imant. ....112
Figura 78. Reluctància en l'entreferro. ....113
Figura 79. Reluctància de la bobina sobreposada per l'imant. ....113
Figura 80. Àrea d'intersecció entre un imant i una bobina. ....116
Figura 81. Àrea d'intersecció de dos imants solapant una bobina. ....119
Figura 82. Àrea abraçada. ....123
Figura 83. Flux generat en la primera volta de bobina. ....124

Figura 84. Flux generat en la bobina .....124

Figura 85. Corrent en una bobina. .....125

Figura 86. Corrent produït per 10 imants sobre una bobina. .....125

Figura 87. Corrents per fase d'una bobina. .....126

Figura 88. Logotip del *software* MATLAB – SIMULINK. .....128

Figura 89. Bloc de posicionament de l'imant pel SIMULINK. .....128

Figura 90. Paràmetres del bloc de decalatge en SIMULNK. .....129

Figura 91. Bloc de conversió de graus a radiants en SIMULINK. .....129

Figura 92. Blocs d'imants per l'obtenció de l'àrea pel SIMULINK. .....130

Figura 93. Bloc per declarar la inducció. .....132

Figura 94. Bloc d'inversió de flux. .....132

Figura 95. Bloc per declarar el nombre de voltes. .....132

Figura 96. Bloc per declarar la inductància. .....132

Figura 97. Blocs sumatoris. .....133

Figura 98. Bloc multiplicador. .....133

Figura 99. Bloc divisor. .....133

Figura 100. Bloc d'unió. .....134

Figura 101. Simulació de la fase A pel SIMULINK. .....135

Figura 102. Simulació de la fase B pel SIMULINK. .....136

Figura 103. Simulació de la fase C pel SIMULINK. .....137

Figura 104. Unió de les fases. .....138

Figura 105. Visualitzador. .....138

Figura 106. Esquema de connexió al consum. .....140

Figura 107. Esquema de connexió a bateria. .....141

Figura 108. Gràfica dels temps de funcionament amb manteniment preventiu. .....143

Figura 109. Gràfica dels temps de funcionament amb manteniment predictiu. .....144

Figura 110. Gràfica dels temps de funcionament amb manteniment correctiu. .....145

Figura 111. Ombra d'un aerogenerador. .....152

Figura 112. Aus travessant les pales d'aerogeneradors. ..... 153

Figura 113. Turbina de color púrpura. ..... 153

Figura 114. Muntatge d'un aerogenerador en un parc eòlic. ..... 154

Figura 115. Parc eòlic marí (*offshore*). ..... 154

Figura 116. Construcció d'un parc eòlic. ..... 155

# ÍNDEX D'EQUACIONS

Equació 1. Càlcul de la força de Coriolis. ....35

Equació 2. Desviació mitja del vent. ....39

Equació 3. Desviació vertical del vent. ....39

Equació 4. Desviació perpendicular del vent. ....39

Equació 5. Intensitat de la turbulència. ....39

Equació 6. Intensitat de la turbulència segons la rugositat del terreny. ....40

Equació 7. Distribució de Weibull. ....40

Equació 8. Densitat de probabilitat. ....40

Equació 9. Velocitat mitja del vent. ....40

Equació 10. Desviació estàndard del vent. ....41

Equació 11. Factor de forma. ....41

Equació 12. Factor d'escala. ....41

Equació 13. Funció gamma. ....41

Equació 14. Recta de regressió. ....41

Equació 15. Càlcul paràmetre Y. ....41

Equació 16. Càlcul paràmetre X. ....41

Equació 17. Pendent de la recta. ....42

Equació 18. Velocitat del vent respecte l'alçada. ....42

Equació 19. Càlcul paràmetre α. ....43

Equació 20. Càlcul paràmetre α segons la rugositat del terreny. ....43

Equació 21. Equació de la llei de Gumbel o Fisher-Tippet. ....44

Equació 22. Àrea d'escombrada de les pales de la turbina. ....46

Equació 23. Igualtat de volum de vent. ....46

Equació 24. Massa del vent a través d'un rotor durant un segon. ....48

Equació 25. Potència del vent extreta pel rotor. ....48

Equació 26. Potència extreta pel vent. ....48

Equació 27. Potència total del vent sense pertorbar. ....48

Equació 28. Ràtio de la potència extreta del vent i la potència del vent sense pertorbar. ....48
Equació 29. Potència del vent. ....50
Equació 30. Energia emmagatzemada per una bobina. ....69
Equació 31. Flux magnètic (Llei de Biot-Savart). ....70
Equació 32. Força electromotriu. ....70
Equació 33. Segona Llei de Kirchhoff. ....70
Equació 34. Caiguda de tensió en una bobina. ....70
Equació 35. Intensitat en la bobina. ....70
Equació 36. Tensió d'una inductància. ....71
Equació 37. Reactància. ....72
Equació 38. Tensió. ....73
Equació 39. Intensitat bobina en corrent altern. ....73
Equació 40. Valor eficaç corrent en forma polar. ....73
Equació 41. Reactància en forma polar. ....73
Equació 42. Força causada pels camps magnètics. ....75
Equació 43. Força magnètica. ....75
Equació 44. Inducció magnètica. ....81
Equació 45. Velocitat de sincronisme. ....98
Equació 46. Desplaçament imants. ....98
Equació 47. Decalatge entre els imants. ....98
Equació 48. Parell de pols. ....99
Equació 49. Igualació de les equacions de parell de pols. ....99
Equació 50. Graus mecànics. ....99
Equació 51. Càlcul de la inducció magnètica per un imant cilíndric. ....99
Equació 52. Inductància. ....100
Equació 53. Reactància de la bobina. ....101
Equació 54. Pulsació. ....101
Equació 55. Reactància equivalent de les bobines. ....101

Equació 56. Resistència del cable. ..... 102

Equació 57. Resistència equivalent. ..... 102

Equació 58. Resistència conductor elèctric a qualsevol temperatura. ..... 102

Equació 59. Impedància estatòrica. ..... 103

Equació 60. Desfasament impedància estatòrica. ..... 103

Equació 61. Pèrdues. ..... 103

Equació 62. Resistència del cable. ..... 104

Equació 63. Pèrdues al coure de l'estator per fase. ..... 104

Equació 64. Pèrdues per Focault. ..... 105

Equació 65. Pèrdues per histèresis. ..... 105

Equació 66. Pèrdues totals per Focault. ..... 105

Equació 67. Pèrdues totals per histèresi. ..... 105

Equació 68. Pèrdues mecàniques. ..... 106

Equació 69. Pèrdues addicionals. ..... 106

Equació 70. Pèrdues totals. ..... 107

Equació 71. Potència del vent. ..... 108

Equació 72. Potència de la turbina. ..... 108

Equació 73. Potència de sortida del generador. ..... 108

Equació 74. Eficiència de la màquina de corrent altern. ..... 109

Equació 75. Inducció magnètica. ..... 109

Equació 76. Intensitat de camp magnètic. ..... 109

Equació 77. Força magnetomotriu. ..... 109

Equació 78. Caiguda de tensió. ..... 109

Equació 79. Força magnetomotriu. ..... 110

Equació 80. Reluctància. ..... 110

Equació 81. Força magnetomotriu. ..... 111

Equació 82. Permeabilitat magnètica. ..... 111

Equació 83. Reluctància de l'imant. ..... 112

Equació 84. Reluctància de l'entreferro. ..... 112

Equació 85. Reluctància de la bobina sobreposada per l'imant. ..... 113

Equació 86. Reluctància de la bobina no sobreposada per l'imant. ..... 114

Equació 87. Reluctància del rotor. ..... 114

Equació 88. Reluctància de l'estator. ..... 114

Equació 89. Distància entre dos radis. ..... 117

Equació 90. Càlcul de la incògnita $x(\theta)$. ..... 117

Equació 91. Càlcul de la incògnita $y(\theta)$. ..... 117

Equació 92. Càlcul de la incògnita $\alpha_i(\theta)$. ..... 117

Equació 93. Càlcul de la incògnita $\alpha_b(\theta)$ si $x(\theta) > 0$. ..... 117

Equació 94. Càlcul de la incògnita $\alpha_b(\theta)$ si $x(\theta) < 0$. ..... 118

Equació 95. Càlcul de l'àrea d'intersecció d'una capa. ..... 118

Equació 96. Càlcul de l'àrea d'intersecció de vàries capes. ..... 118

Equació 97. Àrea d'intersecció del solapament de dos imants sobre una bobina. ..... 119

Equació 98. Àrea d'intersecció de no solapament de dos imants sobre una bobina. ..... 119

Equació 99. Flux generat. ..... 120

Equació 100. Intensitat a partir del flux. ..... 120

Equació 101. Intensitat a partir del flux tenint en compte el nombre de voltes. ..... 120

Equació 102. Força electromotriu. ..... 120

Equació 103. Derivada del flux respecte l'angle $\theta$ si $x(\theta) > 0$. ..... 121

Equació 104. Derivada del flux respecte l'angle $\theta$ si $x(\theta) < 0$. ..... 121

Equació 105. Nivell de pressió. ..... 150

Equació 106. Tassa interna de rendibilitat (TIR). ..... 162

Equació 107. Cost de capital. ..... 163

Equació 108. Factor de capacitat. ..... 163

Equació 109. Costos d'operació i manteniment. ..... 163

Equació 110. Costos de generació d'electricitat. ..... 163

Equació 111. Despeses de la instal·lació. ..... 164

Equació 112. Terme de potència. ....164
Equació 113. Terme d'energia. ....164
Equació 114. Energia consumida en un any. ....165
Equació 115. Velocitat de sincronisme. ....177
Equació 116. Alçada bobina. ....177
Equació 117. Longitud cable d'una bobina. ....177
Equació 118. Longitud cable per a tots els debanats. ....178
Equació 119. Càlcul de la longitud cable per a tots els debanats. ....178
Equació 120. Càlcul de la inducció magnètica per un imant cilíndric. ....178
Equació 121. Inductància. ....179
Equació 122. Reactància. ....179
Equació 123. Pulsació. ....179
Equació 124. Reactància equivalent. ....180
Equació 125. Resistència conductor elèctric. ....180
Equació 126. Resistència equivalent. ....180
Equació 127. Resistència conductor elèctric a qualsevol temperatura. ....181
Equació 128. Impedància estatòrica. ....181
Equació 129. Desfasament impedància estatòrica. ....181
Equació 130. Pèrdues al coure de l'estator per fase. ....182
Equació 131. Pèrdues mecàniques. ....182
Equació 132. Pèrdues addicionals. ....182
Equació 133. Pèrdues totals. ....183
Equació 134. Potència del vent. ....183
Equació 135. Potència de la turbina. ....183
Equació 136. Potència de sortida del generador. ....184
Equació 137. Eficiència de la màquina de corrent altern. ....184

# ÍNDEX DE TAULES

Taula 1. Taula de direccions del vent. ....36

Taula 2. Coeficient de rugositat segons el terreny. ....43

Taula 3. Paràmetre α en funció de la rugositat. ....43

Taula 4. Temperatura d'operació màxima dels imants de neodimi. ....78

Taula 5. Dimensions de l'estator ....85

Taula 6. Dimensions del cable. ....86

Taula 7. Dimensions de la bobina. ....86

Taula 8. Característiques tècniques del disc magnètic S-45-10-N. ....88

Taula 9. Valors de temperatura i resistències. ....102

Taula 10. Permeabilitats ....111

Taula 11. Decalatge entre imants en el *start time* per a la simulació al SIMULINK. ....134

Taula 12. Nivells sonors i resposta humana. ....150

Taula 13. Grup normatiu. ....160

Taula 14. Pressupost del projecte. ....162

Taula 15. Format factura d'electricitat. ....165

Taula 16. Valors de temperatura i resistències. ....181

# SIMBOLOGIA

$A_{escombrada}$: Àrea d'escombrada de les pales de la turbina ($m^2$).

$A_{int}$ : Àrea d'intersecció entre l'imant i una capa de la bobina ($m^2$).

$A_{intersecció\ Nord}$: Àrea d'intersecció del solapament de l'imant nord ($m^2$).

$A_{intersecció\ Sud}$: Àrea d'intersecció del solapament de l'imant sud ($m^2$).

$A_{intersecció\ total}$: Àrea d'intersecció del solapament de dos imants sobre una bobina ($m^2$).

$A_{intersecció\ un\ imant}$ : Àrea d'intersecció entre l'imant i la bobina ($m^2$).

$A_{no\ solapament}$: Àrea d'intersecció de no solapament de dos imants sobre una bobina ($m^2$).

$B$ : Inducció magnètica (T).

$B_{màx}$: Flux magnètic màxim (T).

$B_r$ : Camp romanent, independentment de la geometria del imant (T).

$b$ : Bisectriu (m).

$C_C$ : Cost de capital $(€/kWh)$.

$C_e$ : Factor d'escala.

$C_{om}$ : Costos d'operació i manteniment $(€/kWh)$.

$cdt$ : Caiguda de tensió (V).

$c_p$ : Coeficient de potència de la turbina.

$D$ : Distància entre els dos radis (m).

$Despeses$ : Despeses de la instal·lació (€).

$d$ : Distància de separació entre imants (m).

$d_i$ : Distància des d'on es calcula la inducció (m).

$d'$: Meitat de la distància de separació entre imants (m).

$EC$ : Energia consumida (kWh).

$e$ : Força electromotriu (V).

$F$ : Força (N).

$F_c$ : Força de Coriolis (N).

$FC$ : Factor de capacitat.

$F_{subjecció}$: Força de subjecció de l'imant (N).

$f$ : Freqüència (Hz).

$f.m.m.$ : Força magnetomotriu (Av).

$f_v$ : Freqüència de la velocitat del vent (Hz).

$H$ : Intensitat de camp magnètic (Av/m).

$h$ : Alçada de la torre de l'aerogenerador (m).

$h_{any}$ : Hores d'un any (h).

$h_b$ : Alçada bobina (m).

$h_{bs}$ : Alçada bobina sobreposada per l'imant (m).

$h_E$ : Distància de l'entreferro (m).

$h_e$ : Meitat de l'alçada de l'estator (m).

$h_{funcionament}$ : Hores de funcionament del generador (h).

$h_i$ : Alçada de l'imant (m).

$h_0$ : Alçada de referència sent normalment de 10 m (m).

$h_r$ : Meitat de l'alçada del rotor (m).

$h_t$ : Alçada on s'estudia la intensitat de la turbulència (m).

$I$ : Intensitat (A).

$I_A$ : Intensitat de fase A (A).

$I_i$ : Inversió inicial (€).

$I_L$ : Intensitat de línia (A).

$k$ : Factor de forma.

$k_F$ : Coeficient característic de Focault del material (W/kg).

$k_H$ : Coeficient característic de histèresi del material (W/kg).

$k_{mec}$ : Coeficient de pèrdues mecàniques.

$k_p$ : Coeficient de potència.

$L$ : Inductància (H).

$L_d$ : Distància del centre del rotor cap al centre de l'imant i al centre de la bobina (m).

$L_p$ : Nivell de pressió sonora (dB).

$l$ : Longitud del cable (m).

$l_{bobina}$ : Longitud de la bobina (m).

$l_{pala}$: Longitud de la pala (m).

$m_{nucli}$: Massa del material del nucli (kg).

$m_v$ : Massa del vent (kg/s).

$N$ : Nombre d'espires.

$N_m$ : Nombre de mesos.

$N_t$ : Nombre total de mesures.

$N_v$ : Nombre de voltes.

$n$ : Anys de vida útil de la instal·lació (anys).

$n_s$ : Velocitat de sincronisme (rpm).

$P$ : Pressió (Pa).

$P_{AC}$ : Potència d'entrada del rectificador (W).

$P_{DC}$ : Potència de sortida del rectificador (W).

$P_{elèc}$ : Potència elèctrica (W).

$P_{entrada}$: Potència d'entrada (W).

$P_{entrada_{rectificador}}$ : Potència d'entrada del rectificador (W).

$PF$ : Potència a facturar (kW).

$P_{inst}$ : Potència de la instal·lació (kW).

$P_{mec}$ : Potència mecànica (W).

$P_0$ : Potència extreta del vent (W).

$P_{ref}$ : Pressió de referència sent aquesta la pressió sonora en el llindar d'audició amb valor de $20\ x\ 10^{-6}\ Pa$ .

$P_{son}$: Pressió sonora instantània (Pa).

$P_{sortida}$: Potència sortida (W).

$P_{sortida_{rectificador}}$ : Potència de sortida del rectificador (W).

$P_{vent}$ : Potència del vent (W).

$p$ : Parell de pols.

$p_{add}$ : Pèrdues addicionals (W).

$p_{cu}$ : Pèrdues al coure (W).

$p_F$ : Pèrdues per Focault (W/kg).

$p_{FT}$ : Pèrdues totals per Focault (W).

$p_H$ : Pèrdues per histèresi (W/kg).

$p_{HT}$ : Pèrdues totals per histèresi (W).

$p_{mec}$ : Pèrdues mecàniques (W).

$p_{totals}$ : Pèrdues (W)

pu: Valor per unitat.

$Q_{sortida}$: Potència reactiva de sortida (VAr).

$q$ : Càrrega elèctrica de la partícula (C).

$R$ : Resistència (Ω).

$R_b$ : Radi de la bobina (m).

$R_{cable}$ : Resistència del cable (Ω).

$R_{eq}$ : Resistència equivalent per fase (Ω).

$R_{eqT_o}$ : Resistència equivalent per fase referent a la temperatura $T_o$ (Ω).

$R_i$ : Radi de l'imant (m).

$R_{màx\,bobina}$: Radi màxim de la bobina (m).

$R_T$ : Resistència conductor elèctric a qualsevol temperatura. (Ω).

$r$ : Radi (m).

$r_{ti}$ : Tassa d'interès aplicada.

$\Re$ : Reluctància $\left(Av/Wb\right)$.

$\Re_b$ : Reluctància de la bobina no sobreposada per l'imant $\left(Av/Wb\right)$.

$\Re_i$ : Reluctància de l'imant $\left(Av/Wb\right)$.

$\Re_E$ : Reluctància de l'entreferro $\left(Av/Wb\right)$.

$\Re_S$ : Reluctància de la bobina sobreposada per l'imant $\left(Av/Wb\right)$.

$\Re_3$ : Reluctància del rotor $\left(Av/Wb\right)$.

$\Re_4$ : Reluctància de l'estator $\left(Av/Wb\right)$.

$S_{sortida}$: Potència aparent (VA).

$s$ : Secció del cable ($m^2$).

$s_{bobina}$: Superfície de la bobina ($m^2$).

$s_3(\theta)$: Àrea d'intersecció del rotor ($m^2$).

$s_4(\theta)$: Àrea d'intersecció de l'estator ($m^2$).

$T$ : Temperatura que està sotmès el cable ( ºC).

$TE$ : Terme d'energia (€/mes).

$T_i$ : Parell intern (Nm).

$TIR$: Tassa interna de rendibilitat.

$T_m$ : Parell mecànic produït pel vent (Nm).

$T_o$ : Temperatura de referència on es coneix $R_o$ (Ω).

$TP$ : Terme de potència (€/mes).

$t_e$ : Preu del terme de l'energia (€/kWh).

$t_p$ : Preu del terme de la potència (€/kWmes).

$U$ : Energia emmagatzemada (J).

$U_d$ : Dispersió de la distribució.

$U_m$ : Indicador de moda.

$\hat{u}_r$ : Vector unitari.

$V$ : Volum ($m^3$).

$V_{DC}$ : Tensió mitja (V).

$V_L$ : Tensió de línia (V).

$V_{màx}$ : Tensió màxima de pic de fase (V).

$V_{rms}$ : Tensió eficaç (V).

$v$ : Velocitat del vent (m/s).

$v_h$ : Velocitat del vent a una alçada concreta (m/s).

$v_i$ : Velocitat de cada mesura (m/s).

$v_m$ : Velocitat del vent a l'alçada de la torre meteorològica (m/s).

$v_{mig}$ : Velocitat mitjana del vent (m/s).

$\vec{v}_c$ : Velocitat de la càrrega (m/s).

$v_0$ : Velocitat del vent a l'alçada de referència (m/s).

$v_{pu}$ : Velocitat del vent (p.u.).

$W$ : Treball (J).

$X_L$ : Reactància de la bobina (Ω).

$X_{Leq}$ : Reactància de la bobina equivalent (Ω).

$x$ : Distància del centre de la bobina al punt d'intersecció que forma l'imant amb la bobina (m).

$y$ : Distància de l'alçada del centre de la bobina al punt d'intersecció que forma l'imant amb la bobina (m).

$z$ : Distància sobre l'eix de simetria d'una superfície polar (m).

$z_0$ : Coeficient de rugositat del terreny.

$|z|$ : Mòdul de la impedància estatòrica (Ω).

$\alpha$ : Coeficient Oliverià de la temperatura, $\alpha = 0{,}00393$ pel coure.

$\alpha_b$ : Angle del sector que formen els punts d'intersecció amb el centre de la bobina (º).

$\alpha_d$ : Angle de decalatge dels imants (º).

$\alpha_i$ : Angle del sector que formen els punts d'intersecció amb el centre de l'imant (º).

$\beta$ : Angle de desfasament d'impedàncies (º).

$\beta_d$ : Angle de decalatge de les bobines (º).

$\beta_p$ : Angle d'inclinació de la pala (º).

$\gamma$ : Angle entre $E_A$ i $I_A$ (º).

$\eta$ : Eficiència màquina de corrent altern (%).

$\eta_{rectificador}$ : Eficiència del rectificador (%).

$\theta$ : Angle format entre el radi de l'imant i el radi de la bobina (º).

$\theta_{\vec{v}\vec{B}}$ : Angle entre els vectors $\vec{v}$ i $\vec{B}$ (º).

$\lambda$ : Relació entre la velocitat punta de la velocitat d'extrem de les pales del rotor a la velocitat del vent.

$\mu$ : Permeabilitat absoluta del material, $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \ \left(H/m\right)$.

$\mu_{aire}$: Permeabilitat de l'aire $\left(H/m\right)$.

$\mu_{cu}$ : Permeabilitat del coure $\left(H/m\right)$.

$\mu_{Fe}$ : Permeabilitat del ferro $\left(H/m\right)$.

$\mu_{Nd}$ : Permeabilitat del neodimi $\left(H/m\right)$.

$\mu_0$ : Permeabilitat en el buit, de valor $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ $\left(H/m\right)$.

$\mu_r$ : Permeabilitat relativa del material $\left(H/m\right)$.

$\rho$ : Densitat de l'aire (1,225 kg/m$^3$ a pressió atmosfèrica a nivell del mar i a 15ºC).

$\rho_{cu}$ : Resistivitat $\left(\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}\right)$. La resistivitat del coure és de $\frac{1}{56}\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$ .

$\phi$ : Flux (Wb).

$\varphi$ : Angle de desfasament (º).

$\omega$ : Pulsació (rad/s).

$\vec{\omega}_c$ : Velocitat angular produïda per la força de Coriolis (rad/s).

$\omega_r$ : Velocitat elèctrica angular del rotor (rad/s).

# 1. INTRODUCCIÓ

## 1.1. Introducció del projecte

El present model energètic és brut i insostenible. La generació d'electricitat a partir de fonts d'origen no renovable contribueixen a augmentar la contaminació del planeta de manera indiscriminada i és necessari que aquestes es deixin d'utilitzar, donant pas a fonts d'origen renovable per a generar energia elèctrica, ja que aquestes són molt més netes i més sostenibles.

Les fonts d'origen no renovable provenen dels combustibles fòssils i de l'energia nuclear.

Els combustibles fòssils són el carbó, el petroli i el gas. Tots aquests, al utilitzar-los com a combustible i emprar-los per a la combustió, emeten una sèrie de partícules que contribueixen a augmentar l'efecte hivernacle. No solament afecten de forma negativa al planeta terra, sinó que també perjudiquen la salut de tots els éssers vius.

L'energia nuclear empra urani com a combustible, i és la font de generació elèctrica més perillosa d'avui en dia. La seva utilització sense cessar posa en perill a tota la població mundial ja que l'emissió de partícules radioactives que emet aquesta energia és nociva per l'ésser humà i pel medi ambient. A més, crea uns residus que hauran de ser tractats i emmagatzemats durant milers d'anys per què aquests no siguin alliberats a l'atmosfera, ja que són radioactius.

És per aquest motiu que és necessari emprar energies d'origen renovable per a la generació d'energia elèctrica. Hi ha sis fonts d'energia renovable: l'eòlica, la solar, la mareomotriu, la geotèrmica, la hidràulica i la biomassa. Aquestes no són del tot netes i si que contaminen, ja que és necessari fabricar, transportar i implementar uns generadors. A més, si no hi ha estudis ambientals, poden causar grans desperfectes irreparables al medi ambient.

No obstant això, són molt més netes que les energies d'origen no renovable. El seu major defecte és la intermitència, ja que depenen de factors naturals per ser usades. Però una eficaç investigació i desenvolupament, així com uns precisos estudis d'implementació, poden ser totalment útils per cobrir la demanda.

Un gran avenç tecnològic ha sigut poder aprofitar l'energia eòlica per poder generar energia elèctrica. A dia d'avui, és la font d'origen renovable que més electricitat produeix, gràcies a les grans instal·lacions de parcs eòlics però una possible solució per a cobrir la demanda recau en la generació d'autoconsum.

L'autoconsum no està disponible en tots els llocs ja que la intermitència del vent o l'absència d'aquest condicionen la implementació d'un generador. Així doncs, on es pugui aprofitar el vent, seria convenient poder disposar d'instal·lacions generadores d'autoconsum per consumir. En el cas de què estigui coberta la demanda particular, hauria d'haver la possibilitat de lliurar l'energia excedent a la xarxa per a què altres demandants puguin aprofitar-la.

Així doncs, la generació d'autoconsum precisa d'una important investigació i desenvolupament per a garantir un màxim rendiment quan es pretengui l'aprofitament de l'energia eòlica.

## 1.2. Objectius del projecte

Un dels objectius del projecte és l'estudi sobre l'aprofitament de l'energia eòlica per a obtenir energia elèctrica mitjançant aerogeneradors, i donar a conèixer els diferents tipus que hi ha.

És objectiu també del present projecte dissenyar i simular un generador síncron de flux axial emprant imants permanents per a poder generar energia elèctrica essent utilitzat en aplicacions eòliques.

A més, s'ha plantejat obtenir les equacions de la màquina dissenyada per a poder realitzar diversos estudis i extreure conclusions sobre el seu funcionament i resultats obtinguts.

També es realitza un estudi sobre les possibilitats d'aprofitament de l'energia generada a partir d'aerogeneradors i quins impactes ambientals causen aquests.

## 1.3. Abast del projecte

Una síntesi dels diferents punts que s'han tractat i resumeixen l'abast del projecte són:

- Introducció al món eòlic i als aerogeneradors, fent èmfasi en els aerogeneradors amb imants permanents.
- Extreure les equacions pròpies de la màquina i realitzar el disseny del generador síncron d'imants permanents.
- Calcular els seus paràmetres i simular el model.
- Es comenta com podria ser aprofitada l'energia obtinguda de l'aerogenerador.
- Valorar globalment l'impacte ambiental i la viabilitat econòmica que comporta la instal·lació d'un aerogenerador.
- Extreure conclusions i comentar quines han sigut les aportacions, així com també quines són possibles línies d'investigació per seguir desenvolupant aerogeneradors de flux axial emprant imants permanents.

# 2. RECURSOS EÒLICS

## 2.1. Energia eòlica

L'energia eòlica té el seu origen en el Sol, ja que aquest és el responsable de què es produeixi el vent degut a què la calor del Sol escalfa la superfície de la Terra. Aquesta superfície és irregular, hi ha muntanyes, oceans, entre altres. L'aire no té la mateixa temperatura en unes zones o en unes altres, amb la qual cosa les pressions també són diferents. La diferència de pressions fa que l'aire tendeixi a desplaçar-se des de les zones d'alta pressió fins a les de baixa pressió. Tot plegat, juntament amb el moviment de rotació terrestre, l'alternança entre el dia i la nit i la nebulositat genera un flux continu d'aire, conegut com a vent.

L'energia provinent del Sol, d'ara endavant vent, està entre un 1 i un 2 % aproximadament. Si s'exclouen les àrees de gran valor ambiental, aquest percentatge suposa un potencial d'energia eòlica de 53 TWh/any al món, és a dir, cinc cops més que el consum elèctric actual a tot el planeta, la qual cosa significa que l'energia eòlica permetria atendre àmpliament les necessitats energètiques del món.

Cal dir que no tots els corrents de vent són aprofitables. De fet, la tecnologia eòlica només opera amb corrents horitzontals, ja que els verticals són no tenen l'energia dinàmica que cal per al seu aprofitament, i sempre que la seva velocitat estigui dintre d'uns límits, sent aquests a partir d'uns 3 m/s i per sota dels 25 m/s.

Les màquines emprades per a transformar la força del vent en electricitat reben el nom de turbines eòliques o aerogeneradors. Reben aquest nom perquè converteixen l'energia eòlica en energia elèctrica, mitjançant l'ús d'un alternador. Aquests s'intenten situar lluny d'obstacles que creïn turbulències a l'aire i en llocs on el vent bufi amb una intensitat semblant tota l'estona, a fi d'optimitzar el seu rendiment. La potència obtinguda depèn de la velocitat del vent, del tipus d'aerogenerador i de la superfície que cobreix.

L'ús de l'energia eòlica és un dels mètodes d'aprofitament d'energia renovable més antics que existeixen i en la seva ocupació industrial es poden citar com exemples els molins utilitzats per al bombejament d'aigua o el molí de gra. Actualment s'aprofita com a producció d'energia elèctrica.

### 2.1.1. Història de l'energia eòlica

La primera i més senzilla aplicació de l'energia del vent, correspon a l'ús de les veles per a la navegació. La referència més antiga que es coneix a la navegació es troba en gravats egipcis que daten del V mil·lenni aC.

Els primers mecanismes impulsats pel vent, és a dir, les màquines eòliques, que es coneixen, van ser unes rodes d'oració que s'empraven en actes religiosos en el Tibet i Mongòlia.

Els primers molins de vent és creença generalitzada que es van començar a utilitzar a l'Orient, ja sigui en l'antiga Pèrsia o en Xina, d'eix vertical, conegut com panèmona que captaven l'energia del vent sobre les aspes o veles construïdes amb fustes i teles.

L'extensió d'aquests enginys cap a Europa i per tant a Espanya des d'Orient Mig es va portar a terme per mitjà de la difusió de la cultura islàmica cap als països Mediterranis. Per als països europeus sense influència del Islam, com Anglaterra i Holanda, la idea va aparèixer de manera autòctona.

A Espanya el seu ús es va estendre per tota la franja costanera Mediterrània, illes Balears, Múrcia i Andalusia i també en l'interior de la Península. En la regió manxega en els segles XVI i XVII van arribar a ser molt abundants, encara que molins de vent es trobaven també a Castella, Galícia i País Basc.

Els molins espanyols en les zones interiors presentaven una tipologia més semblant a la centreeuropea, mentre que els construïts en el camp de Cartagena o Andalusia responen al model que existia també en altres zones mediterrànies com Grècia o Greta on les seves aspes adquireixen un aire mariner assemblant les veles de les petites embarcacions que solcaven el Mediterrani.

Els elements que composaven aquests antics molins de vent són fonamentalment similars als existents en l'actualitat: torre de suport, barqueta on s'allotja l'eix de rotació i la gegantesca roda Catalina, sistema d'orientació, engranatges i politges com a sistema de transmissió i canvi de direcció del vent, rotors amb varies pales dotades de l'angle de torsió necessari per a optimitzar la incidència del vent, sistemes de parada i de seguretat contra vents elevats i amb el control de l'artefacte encomanat al moliner.

El bombeig és l'aplicació que li va donar una major importància en els segles posteriors amb la colonització de l'Oest Americà a on es necessitava abundant quantitat d'aigua que hi havia al subsòl. Amb aquest fi es va desenvolupar un molí petit, lent, amb un gran número de pales i elevat parell d'arrencada. Es van fabricar més de 6 milions de molins "multipala americà" entre 1880 i 1930. La seva mida mitjana era de 3 metres de diàmetre amb un número de pales que oscil·lava entre 18 i 24.

No va ser fins als primers anys del segle XX quan van aparèixer les aplicacions dels molins de vent per a generació elèctrica. Les teories aerodinàmiques van permetre establir els principis bàsics de funcionament de les noves aeroturbines aconseguint optimitzar els dissenys.

*Betz*, publica en 1927 el seu famós enunciat que demostraria que no és possible extreure més del 59 % de l'energia continguda en el vent i *Glauert* estableix les teories en què es basa el comportament aerodinàmic de les aeroturbines modernes.

Dinamarca és el país on es presta una major atenció a la generació eòlica d'energia elèctrica i és allà on es construeix el primer prototip dissenyat pel professor *Poul la Cour (1846-1908)*. Aquest disseny comptava amb pales amb forma de lames de persianes que al girar deixaven passar l'aire al seu través constituint un enginyós sistema de seguretat contra vents elevats.

Aquest va ser el pioner de la llarga sèrie d'aerogeneradors que es van construir en aquest país i on el seu major exponent és el de *Gedser* construït en l'any 1957 i que com a plataforma d'assaigs va durar fins al 1979.

Estats Units també va conèixer un desenvolupament important de l'energia eòlica durant les primeres dècades del segle XX. En els anys 40 es va construir l'aerogenerador *Smith-Putnma*, disseny de gran complexitat i audàcia i que per problemes de fatiga de material va patir greus errors.

En la dècada dels 70 coincidint amb la crisi del petroli novament hi ha una etapa de gran desenvolupament.

## 2.2. Origen del vent

El factor originador i predeterminant a gran escala és la diferència de l'escalfament entre unes zones i altres d'acord amb determinats factors geogràfics i astronòmics. Aquestes diferències de temperatura són l'origen primer dels canvis de pressió, que a la vegada fan que, les masses d'aire es desplacin d'una zona a una altra zona propera de diferent pressió i són, per tant, les causes del vent. També tenen una important influència les variacions estacionals o temporals produïdes pel moviment de rotació i translació del planeta. Quan es parla del vent es fa referència sempre als vents en la superfície terrestre a certa altura, que varia segons la latitud, el relleu i altres factors.

Altres forces que mouen el vent o afecten són la força de gradient de pressió, la força de Coriolis, les forces de flotabilitat i de fricció, i la configuració del relleu. Quan entre dues masses d'aire adjacents existeix una diferència de densitat, l'aire tendeix a fluir des de les regions de major pressió a les de menor pressió. Degut a què la Terra està sotmesa a rotació, aquest flux es veurà influenciat, accelerat, elevat o transformat per l'efecte Coriolis en qualsevol superfície terrestre.

## 2.3. Densitat del vent

L'energia cinètica d'un cos en moviment és proporcional a la seva massa o pes. Així doncs, l'energia cinètica del vent dependrà de la densitat de l'aire, és a dir, de la seva massa per unitat de volum. Com més pesat sigui l'aire, més energia rebrà la turbina.

A pressió atmosfèrica normal i a 15 ºC, l'aire pesa uns 1,225 kg/m$^3$, tot i que la densitat disminueix lleugerament amb la humitat. A grans altituds, com seria en les muntanyes, la pressió de l'aire és més baixa i l'aire és menys dens.

## 2.4. Efecte de Coriolis

L'efecte Coriolis, descrit en 1836 pel científic francès *Gaspard-Gustave Coriolis*, és l'efecte que s'observa en un sistema de referència en rotació i, per tant, no inercial quan un cos entra en moviment respecte d'aquest sistema de referència. Aquest efecte consisteix en la existència d'una acceleració relativa del cos en dit sistema de rotació. Aquesta acceleració és sempre perpendicular a l'eix de rotació del sistema i a la velocitat del cos.

L'efecte Coriolis fa que, un objecte que es mogui sobre el radi d'un disc en rotació tendeixi a accelerar-se respecte d'aquest disc, segons si el moviment és cap a l'eix de gir o allunyant-se d'aquest. Pel mateix principi, en el cas d'una esfera en rotació, el moviment d'un objecte sobre els meridians, també presenta aquest efecte, ja que dit moviment redueix o incrementa la distància al eix de gir de l'esfera.

Degut a què l'objecte pateix una acceleració des del punt de vista de l'observador en rotació, és com si per aquest, existís una força sobre l'objecte que l'accelera. Aquesta força s'anomena força de Coriolis, i no és una força real en el sentit de que no hi ha res que la produeixi.

Es tracta doncs, d'una força inercial o fictícia que s'introdueix per explicar, des del punt de vista del sistema de rotació, l'acceleració d'un cos, del qual el seu origen està en realitat, en el fet de què el sistema d'observació està rotant.

La força de Coriolis té dos components:

- Una component tangencial, degut a la component radial del moviment del cos.
- Una component radial, degut a la component tangencial del moviment del cos.

La component del moviment del cos paral·lela a l'eix de rotació no engendra la força de Coriolis.

El valor de la força de Coriolis $F_c$ és:

$$F_c = -2 \cdot m \cdot (\vec{\omega}_c \ x \ \vec{v})$$

**Equació 1. Càlcul de la força de Coriolis.**

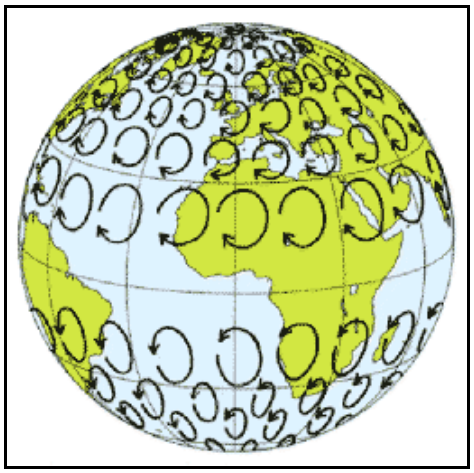


**Figura 1. Sentit del vent ocasionat per l'efecte de Coriolis.**

Degut a la rotació del globus, qualsevol moment en l'hemisferi nord és desviat cap a la dreta, si es mira des de la nostra posició en el terra (en l'hemisferi sud és desviat cap a l'esquerra).

En l'hemisferi nord el vent tendeix a girar en el sentit contrari a les agulles del rellotge. En l'hemisferi sud el vent gira en el sentit de les agulles del rellotge al voltant de l'àrea de baixes pressions.

L'exemple més notori de manifestació de l'efecte de Coriolis es dóna quan les masses d'aire es desplacen seguint els meridians terrestres, i la seva trajectòria i velocitat es veu modificades per ell. En efecte, els vents que es desplacen seguint un meridià es desvien accelerant en la direcció de gir (est) si va cap als pols o, al contrari (oest) si va cap a l'equador.

Pot no resultar obvi que una partícula movent-se en l'hemisferi nord no sigui desviada cap a la dreta.

El que succeeix a l'equador és que els vents van disminuint de velocitat a mesura que s'apropen a la zona de convergència intertropical, i aquesta disminució queda automàticament compensada per un augment en l'alçada de l'aire en tota la zona equatorial.

### 2.4.1. Com afecta la força de Coriolis als vents globals

El vent puja des de l'equador i es desplaça cap al nord i cap al sud en les capes més altes de l'atmosfera. Al voltant dels 30º de latitud en ambdós hemisferis, la força de Coriolis evita que el vent es desplaci més enllà. En aquesta latitud es troba una àrea d'altes pressions, pel què l'aire comença a descendir de nou. Quan el vent pugi des de l'equador hi haurà una àrea de baixes pressions a prop del nivell del terra atraient els vents del nord i del sud. En els pols, hi haurà altes pressions degut a la força del fred. Tenint en ment la força de

curvatura de la força de Coriolis, s'obtenen els resultats generals següents de les direccions dels vents dominants.

| Direccions del vent dominant | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Latitud | 90-60ºN | 60-30ºN | 30-0ºN | 0-30ºS | 30-60ºS | 60-90ºS |
| Direcció | NE | SO | NE | SE | NO | SE |

**Taula 1. Taula de direccions del vent.**

Les direccions dominants del vent són importants per l'emplaçament de l'aerogenerador, ja que òbviament es voldrà situar-lo en el lloc en què hi hagi el mínim nombre d'obstacles possibles per a les direccions dominants del vent. No obstant això, la geografia local pot influenciar en els resultats de la taula anterior.

## 2.5. Atmosfera

L'atmosfera terrestre és la part gasosa de la Terra, essent la capa més externa i menys densa del planeta. Està constituïda per varis gasos que varien en quantitat segons la pressió a diverses alçades. La barreja de gasos que forma l'atmosfera rep el nom d'aire. El 75 % de massa atmosfèrica es troba en els primers 11 km d'alçada des de la superfície del mar. Els principals elements que la composen són l'oxigen (21 %) i el nitrogen (78 %).

L'atmosfera i la hidrosfera constitueixen el sistema de capes fluides superficials del planeta, de les quals els moviments dinàmics estan estretament relacionats. Els corrents d'aire redueixen dràsticament les diferències de temperatura entre el dia i la nit, distribuint la calor per tota la superfície del planeta. Aquest sistema tancat evita que les nits siguin gèlides o que els dies siguin extremadament càlids.

## 2.6. Tipus de vents

Per tal d'escollir l'emplaçament de l'aerogenerador cal conèixer les direccions dominants del vent ja que aquest s'ha de situar en un lloc on hi hagi el mínim d'obstacles possibles en les direccions dominants del vent. Existeixen diferents tipus de vent.

### 2.6.1. Vents globals

Els vents globals, constants o planetaris, es generen principalment com a conseqüència del moviment de rotació terrestre, que origina un desigual escalfament a l'atmosfera per la insolació i procedent de centres d'acció disposats en franges latitudinals d'altes i baixes pressions, és a dir, d'anticiclons i depressions.

Aquests cinturons es disposen aproximadament en les latituds equatorials, sud tròpiques i polars (cercles polars), i s'encarreguen de transportar una gran quantitat d'energia realment desmesurada, davant la qual, la possibilitat d'un escalfament global de caràcter antropogènic no semblaria tenir cap valor. Aquests vents són coneguts com alisis en les latituds intertropicals i vents de l'oest en les zones temperades.

Un altre tipus de vent planetari és el monsó que afecta a Àsia i l'oceà Índic i es genera pels diferents estacionals de temperatura entre els continents i el mar.

*2.6.1.1. Zona de convergència intertropical*

La zona de convergència intertropical és el cinturó de baixes pressions (entre 1009 i 1013 mbar) i està determinada pel moviment de rotació terrestre el qual genera el que es coneix com inflor equatorial terrestre.

*2.6.1.2. Zona de divergència subtropical*

Són zones de subsidència d'aire fred procedent de grans alçades en les zones de convergència intertropical, és a dir, de la franja equatorial, i que donen origen a la vegada a: vents alisis, que es retornen cap a l'equador a baixa altura; i a vents de l'oest, que van incrementant la seva velocitat a mesura que també l'altitud.

*2.6.1.3. Zones de convergència polar*

Són zones de baixa pressió que atrauen als vents provinents de les altituds subtropicals. Aquests vents porten masses d'aire més càlides i humides, humitat que es va perdent per condensació a mesura que es van concentrant l'aire més fred amb l'augment de la latitud.

### 2.6.2. Vents locals

Com els demés tipus de vents, els vents locals representen un desplaçament de l'aire des de zones d'alta pressió fins a zones de baixa pressió, determinant els vents dominants i els vents regnants d'una àrea més o menys amplia. Tot i així, s'ha de tenir en compte nombrosos factors locals que influeixen o determinen els caràcters d'intensitat i periodicitat dels moviments de l'aire. Aquests factors, difícils de simplificar per la seva multiplicitat, són els que permeten parlar de vents locals, els quals són, en molts llocs, més importants que els de caràcter general. Les condicions climàtiques locals poden influenciar en les direccions del vent més comunes. Els vents locals sempre es sobreposen en els sistemes eòlics a gran escala, ja que la direcció del vent és influenciada per la suma dels efectes global i local.

*2.6.2.1. Vents de muntanya*

Es produeixen per la diferència d'insolació i les diferències d'escalfaments de l'aire en les zones de cims i capçaleres de les valls. Això dóna lloc a què durant el dia es produeixi una forta ascendència sobre les vessants exposades al Sol, així com subsidències en la part central de la vall. A última hora del dia ocorre el contrari, és a dir, des de les vessants que ja no són escalfades pel Sol, l'aire descendeix pel refredament cap al fons de la vall aixecant l'aire encara càlid que es manté en aquestes.

*2.6.2.2. Brises marines*

Durant el dia, la terra s'escalfa més ràpidament que el mar per l'efecte del sòl. L'aire puja, circula cap al mar, i crea una depressió a nivell del terra que atrau l'aire fred del mar. Això s'anomena brisa marina. A vegades, hi ha un període de calma al vespre, quan les temperatures del terra i del mar s'igualen. Durant la nit, els vents bufen en sentit contrari. Normalment durant la nit, la brisa terrestre té velocitats inferiors degut a què la diferència de temperatures entre el terra i el mar és més petita.

*2.6.2.3. Vent catabàtic*

Són vents que descendeixen des de les alçades fins al fons de les valls produït pel lliscament a ras del terra de l'aire fred i dens des dels elements del relleu més elevats. Ocorre ja que el Sol deixa d'escalfar la superfície de la muntanya i cedeix la calor al vesant.

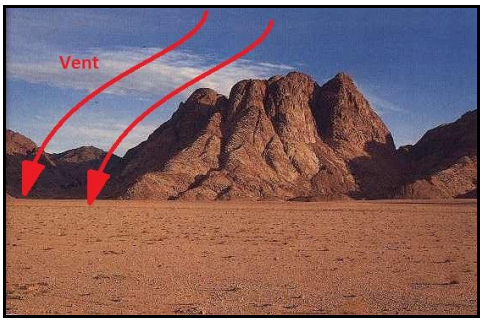



**Figura 2. Vent catabàtic.**

*2.6.2.4. Vent anabàtic*

Vents que ascendeixen des de les zones més baixes fins a les més altes a mesura que el Sol escalfa el relleu. Mentre el vent puja, es va condensant, formant núvols de tipus cúmuls o nuvolositat lenticular.

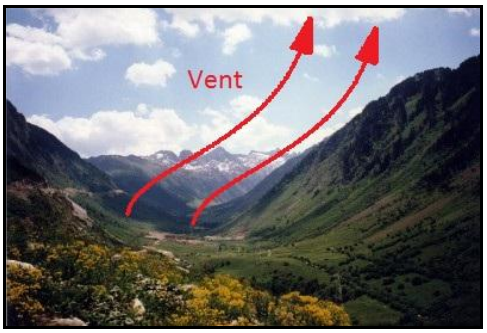



**Figura 3. Vent anabàtic.**

### 2.6.3. Vents geostròfics

Els vents geostròfics són generats, principalment, per les diferències de temperatura, així com per les de pressió, i quasi res són influenciats per la superfície de la terra, ja aquest tipus de vent es troben a una alçada de 1.000 metres a partir del nivell del sòl on la seva velocitat pot ésser mesurada amb globus meteorològic o també conegut com a globus sonda. Aquest porta incorporat instruments meteorològics que permeten conèixer dades com la pressió atmosfèrica, la temperatura, la humitat i la velocitat del vent. Per a obtenir les dades del vent poden ser rastrejats per radar, recerca direccional o amb sistema de posicionament global (GPS).

### 2.6.4. Vents superficials

Els vents superficials estan molt més influenciats per la superfície terrestre a altituds de fins a 100 metres. Aquest és frenat per la rugositat de la superfície de la terra i pels diversos obstacles que s'hi pot trobar. Les direccions del vent a la vora de la superfície seran lleugerament diferents als vents geostròfics degut a la rotació de la terra.

### 2.6.5. Turbulències

Les turbulències són moviments irregulars, és a dir, fluctuacions ràpides i desordenades generalment en forma de remolins, que es produeixen en el corrent d'un fluid, en aquest cas l'aire.

Per a determinar les desviacions típiques de la velocitat en cada una de les tres direccions dels eixos de coordenades (x, y, z) s'utilitzen les expressions següents, de forma què, la direcció x equival a la direcció mitja del vent, la direcció z és la vertical i la direcció y pertany a la velocitat perpendicular a les anteriors.

$$\sigma_{\omega x}(t_0) = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{t_0 - T/2}^{t_0 + T/2} \left(v_x(t) - v_w(t_0)\right)^2 dt}$$

**Equació 2. Desviació mitja del vent.**

$$\sigma_{\omega y}(t_0) = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{t_0 - T/2}^{t_0 + T/2} \left(v_y(t)\right)^2 dt}$$

**Equació 3. Desviació vertical del vent.**

$$\sigma_{\omega z}(t_0) = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{t_0 - T/2}^{t_0 + T/2} \left(v_z(t)\right)^2 dt}$$

**Equació 4. Desviació perpendicular del vent.**

La intensitat de la turbulència ens dóna una estimació del valor relatiu de la turbulència sent:

$$I_x = \frac{1}{\ln\left(\frac{h_t}{h_0}\right)}$$

**Equació 5. Intensitat de la turbulència.**

Segons si la rugositat del terreny augmenta la intensitat de la turbulència també ho farà o bé disminuirà amb l'alçada, obtenint que:

$$I_x = \frac{\alpha}{1 - \alpha \ln\left(\frac{h_t}{15{,}25}\right)}$$

**Equació 6. Intensitat de la turbulència segons la rugositat del terreny.**

## 2.7. Distribució de Weibull

La distribució de *Weibull* és una funció contínua que ens dóna una predicció sobre la variació de la velocitat mitjana durant un període de temps.

L'expressió de la distribució de Weibull és la següent:

$$f_v(V_0) = P(v < v_{mig}) = e^{\left(-\frac{v}{C_e}\right)^k}$$

**Equació 7. Distribució de Weibull.**

Tant mateix, la funció de la densitat de probabilitat és:

$$f(v_{mig}) = k \cdot \frac{v^{k-1}}{C_e^k} \cdot e^{-\left(\frac{v}{C_e}\right)^k}$$

**Equació 8. Densitat de probabilitat.**

Per a poder calcular la distribució de Weibull és necessari conèixer els valors dels paràmetres $C_e$ i k. Aquests es poden obtenir mitjançant dos mètodes diferents, el mètode analític o el mètode gràfic, a partir de les dades de velocitat mitjana i de les freqüències de classe de cada sector.

### 2.7.1. Mètode analític

Per a conèixer els paràmetres $C_e$ i k cal determinar altres valors com són la velocitat mitja del vent sent:

$$v_{mig} = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{i=n} v_i$$

**Equació 9. Velocitat mitja del vent.**

i la desviació estàndard del vent, on s'ha emprat la fórmula següent:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_t - 1}\sum_{i=1}^{i=n}\left(v_i - v_m\right)^2}$$

**Equació 10. Desviació estàndard del vent.**

Un cop trobats, ja es pot obtenir el valors dels paràmetre $C_e$ i k a partir de les expressions següents:

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_m}\right)^{-1,086} \qquad \left(1 \le k \le 10\right)$$

**Equació 11. Factor de forma.**

$$C_e = \frac{v_m}{\Gamma\left(1 + 1/k\right)}$$

**Equació 12. Factor d'escala.**

$$\Gamma\left(x\right) = \int_0^\infty t^{x-1} \cdot e^{-t}\ dt$$

**Equació 13. Funció gamma.**

### 2.7.2. Mètode gràfic

Aquest mètode consisteix en ajustar per mínims quadrats les dades a la recta:

$$Y = Y_0 + kX$$

**Equació 14. Recta de regressió.**

Els anteriors paràmetres es calculen a partir de les equacions següents:

$$Y = \ln\left[-\ln\left(f_v\right)\right]$$

**Equació 15. Càlcul paràmetre Y.**

$$X = \ln\left(v_0\right)$$

**Equació 16. Càlcul paràmetre X.**

Mitjançant l'equació del pendent de la recta, obtenim que el paràmetre k correspon al valor del pendent i el paràmetre $C_e$ es troba a partir de la intersecció amb l'eix Y.

$$Y_0 = -k \cdot \ln(C_e)$$

**Equació 17. Pendent de la recta.**

### 2.7.3. Variació del vent en funció de l'alçada i dels obstacles

Per a la indústria és molt important ser capaç de descriure la variació de les velocitats del vent. Els projectistes de turbines necessiten la informació per optimitzar el disseny dels seus aerogeneradors, així com per minimitzar els costos de generació. Els inversors necessiten la informació per estimar els seus ingressos per producció d'electricitat.

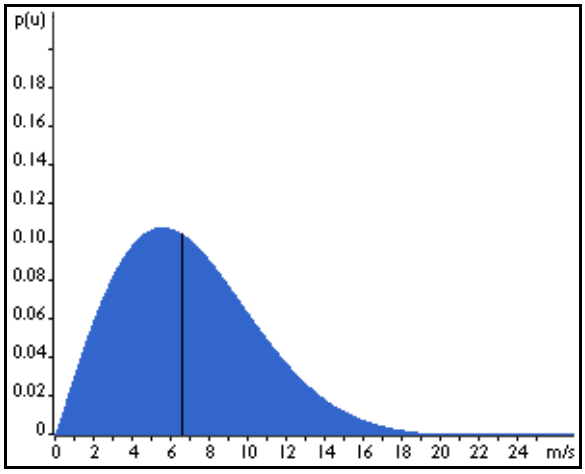



**Figura 4. Distribució de Weibull.**

Si es mesura les velocitats del vent al llarg d'un any s'observarà que en la majoria d'àrees els forts vendavals són inusuals, mentre que els vents frescos i moderats són força comuns.

La variació del vent en un emplaçament típic es sol descriure utilitzant l'anomenada Distribució de Weibull, com la que es mostra en el dibuix anterior. Aquest emplaçament particular té una velocitat mitjana del vent de 7 metres per segon, i la forma de la corba està determinada per un factor de forma de $k = 2$.

Aquesta característica és important alhora de determinar l'alçada de la torre de l'aerogenerador i les dimensions de les pales. Cal tenir en compte que la velocitat del vent augmenta respecte l'alçada, no obstant, a major alçada, major serà la fatiga mecànica que hauran de suportar les pales.

Per a calcular la velocitat del vent respecte l'alçada es fa ús de l'expressió següent:

$$v_h = v_0 \left( \frac{h}{h_0} \right)^{\alpha}$$

**Equació 18. Velocitat del vent respecte l'alçada.**

El valor d'α varia depenent de l'estació de l'any i l'hora, la velocitat del vent, la rugositat del terreny i l'estabilitat atmosfèrica. En general, α augmenta amb la rugositat del terreny i disminueix amb la velocitat del vent i amb el grau d'estabilitat atmosfèrica.

$$\alpha = \left(\frac{h_0}{10}\right)^{0,2} \left(1 - 0,55 \log v_0\right)$$

**Equació 19. Càlcul paràmetre α.**

Una altra equació per a calcular el valor d'α depenen només de la rugositat del terreny és:

$$\alpha = \frac{1}{\ln\left(\frac{15,25}{z_0}\right)}$$

**Equació 20. Càlcul paràmetre α segons la rugositat del terreny.**

Tot seguit les dades de rugositat i el càlcul del valor d'α segons el tipus de terreny les trobem a les següents taules:

| Tipus de terreny | Coeficient de rugositat $z_0$ |
|---|---|
| Gel | $10^{-5}$ a $3 \cdot 10^{-5}$ |
| Aigua | $10^{-4}$ a $3 \cdot 10^{-4}$ |
| Herba | $10^{-3}$ a $10^{-2}$ |
| Terreny rocós | $10^{-2}$ a $5 \cdot 10^{-2}$ |
| Pastures | 0,1 a 0,3 |
| Suburbis | 0,5 a 1 |
| Boscos | 0,1 a 1 |
| Ciutats | 1 a 5 |

**Taula 2. Coeficient de rugositat segons el terreny.**

| Tipus de terreny | Paràmetre α |
|---|---|
| Gel | 0,070 a 0,076 |
| Aigua | 0,084 a 0,092 |
| Herba | 0,104 a 0,136 |
| Terreny rocós | 0,136 a 0,175 |
| Pastures | 0,199 a 0,255 |
| Suburbis | 0,293 a 0,367 |
| Boscos | 0,199 a 0,367 |
| Ciutats | 0,367 a 0,897 |

**Taula 3. Paràmetre α en funció de la rugositat.**

## 2.8. Valors extrems del vent

Un altre factor d'interès en la realització de l'estudi eòlic són els valors extrems del vent. La llei de *Gumbel* o *Fisher-Tippett* ens dóna la probabilitat de què la velocitat del vent màxim en un lloc concret superi un valor determinat. Així doncs, l'equació queda de la forma següent:

$$P\left(V_{\substack{T\,extrem\\ anual}} < U_0\right) = e^{\left[-e^{\left(-\frac{U_0-U_m}{U_d}\right)}\right]}$$

**Equació 21. Equació de la llei de Gumbel o Fisher-Tippet.**

## 2.9. Altres efectes

### 2.9.1. Efecte del parc

Cada aerogenerador afebleix el vent darrere de sí mateix a l'obtenir energia per convertir-la en electricitat.

Per a què això no ocorri o es minimitzi, caldria separar les turbines el màxim possible en la direcció del vent dominant. Però degut al cost del terreny i de la connexió dels aerogeneradors a la xarxa elèctrica, s'aconsella instal·lar turbines més a prop unes de les altres.

Coneixent el rotor de la turbina eòlica, la rosa dels vents, la distribució de Weibull i la rugositat en les diferents direccions, els fabricants poden calcular la pèrdua d'energia degut a l'apantallament entre aerogeneradors. La pèrdua típica és entorn al 5 %.

**Figura 5. Efecte del parc.**

### 2.9.2. Efecte túnel

L'efecte túnel es dóna quan l'aire es comprimeix en la part dels edificis o de les muntanyes a la què està exposat el vent. La seva velocitat augmentarà considerablement entre els obstacles del vent.

Situar un aerogenerador en un túnel d'aquest tipus és una forma intel·ligent d'obtenir velocitats del vent superior a les de les àrees confrontants.

Per a obtenir un bon efecte túnel, el túnel ha d'estar integrat en el paisatge. Però si els turons són molt accidentats, pot haver-hi moltes turbulències en aquesta àrea, i el vent podria bufar en moltes direccions diferents i amb canvis molt ràpids. Si hi ha moltes turbulències es veurà anul·lada l'avantatge de la major velocitat del vent, i els canvis d'aquest, poden causar trencaments i desgasts innecessaris en l'aerogenerador.

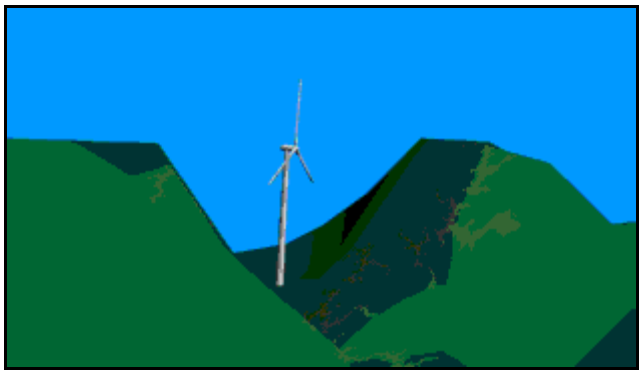


**Figura 6. Efecte túnel.**

### 2.9.3. Efecte muntanya

Una forma correcta d'emplaçar aerogeneradors és situant-los en turons o estriacions dominants al paisatge circumdant. En particular, sempre suposa un avantatge tenir una vista el més amplia possible en la direcció del vent dominant de l'àrea.

En els turons, sempre s'aprecien velocitats de vent superiors a la de les àrees circumdants. Això és degut a què el vent és comprimit en la part de la muntanya, i un cop l'aire arriba al cim del turó pot tornar a expandir-se al descendir cap a les zones de més baixes pressions pel vessant a sotavent del turó.

Es pot donar el cas de què el vent sigui molt irregular un cop passat a través del rotor de l'aerogenerador.

**Figura 7. Efecte muntanya.**

## 2.10. Efectes del vent sobre l'aerogenerador

Els generadors eòlics obtenen la seva potència d'entrada convertint la força del vent en una força de gir anomenat parell que actua sobre les pales del rotor. La quantitat d'energia transferida pel vent cap al rotor depèn de la densitat de l'aire, de l'àrea que té com a radi la longitud de les pales i de la velocitat del vent.

### 2.10.1. Àrea d'escombrada de les pales la turbina

L'àrea d'escombrada de les pales de la turbina és la secció del tub d'aire que arriba de cara a l'aerogenerador i que té com a radi la longitud de la pala.

L'energia que es podrà extreure del vent dependrà en bona part d'aquesta àrea d'escombrada.

L'expressió que ens dóna l'àrea d'escombrada és la següent:

$$A_{escombrada} = \pi \cdot l_{pala}^2$$

**Equació 22. Àrea d'escombrada de les pales de la turbina.**

Per tant direm que l'àrea d'escombrada augmenta amb el quadrat del radi del rotor, és a dir, una turbina que sigui dos vegades més gran, rebrà quatre vegades més energia.

### 2.10.2. Desviació del vent

Observant la figura següent es veu que l'aerogenerador comença a desviar el vent cap a l'exterior fins i tot abans de què arribi a les pales. Aquest fet significa que mai serem capaços de capturar tota l'energia que té el vent fent ús d'un aerogenerador.

No obstant, es compleix l'expressió següent:

$$P \cdot V_1 = P \cdot V_2$$

**Equació 23. Igualtat de volum de vent.**

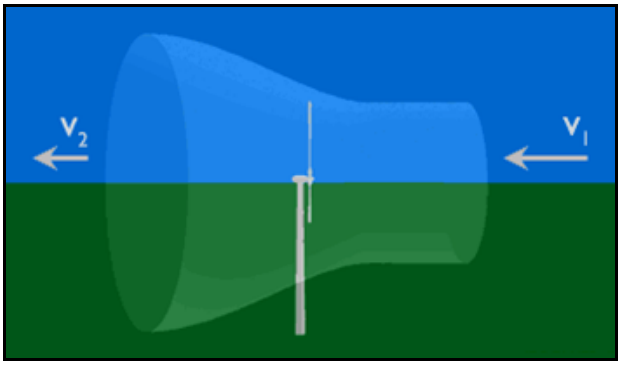



**Figura 8. Tub de vent al travessar el rotor.**

A més, el rotor de la turbina eòlica frena el vent quan capta la seva energia cinètica i la converteix en energia giratòria, cosa que implica que el vent es mogui més lentament a la part posterior del rotor que abans de l'impacte amb les pales. Donat que la quantitat d'aire que passa a través de l'àrea d'escombrada pel rotor ha de ser la mateixa abans d'incidir contra les pales i a la seva part posterior, l'aire ocuparà un major diàmetre, anomenat secció transversal a la part posterior del rotor.

Si es volgués aconseguir extreure tota l'energia del vent, l'aire sortiria per l'altre extrem amb una velocitat nul·la que implicaria que no podria abandonar la turbina. Òbviament no es podria obtenir cap energia per què al mateix temps s'impossibilitaria l'entrada de vent nou al sistema.

Coneixent aquest fet es dedueix que ha d'existir algun mètode per frenar el vent que estigui entre aquests dos extrems i que sigui més eficient per a la conversió de l'energia eòlica en energia mecànica útil. Aquest mètode s'aconsegueix gràcies a la llei de *Betz* que se sap que un aerogenerador ideal alenteix el vent fins a 2/3 parts de la seva velocitat inicial.

### *2.10.2.1. Llei de Betz*

Quant major sigui l'energia cinètica que un aerogenerador extregui del vent, major serà l'alentiment que patirà el vent que deixa l'aerogenerador per la seva part esquerra de la figura 8 de l'apartat 2.10.2.

Si s'intenta extreure tota l'energia del vent, l'aire sortiria amb una velocitat nul·la, és a dir, l'aire no podria abandonar la turbina. En aquest cas, no s'extrauria cap energia en absolut, ja que òbviament també se l'impediria l'entrada d'aire al rotor de l'aerogenerador. En un altre cas extrem, el vent podria passar a través del nostre tub (figura 8) sense destorbar per res. En aquest cas tampoc hauríem extret cap energia del vent.

Així doncs, podríem assumir que hi ha d'haver alguna forma de frenar el vent que estigui entre mig de dos extrems, i que sigui més eficient en la conversió de l'energia sorprenentment simple: un aerogenerador ideal alentiria el vent fins a 2/3 de la seva velocitat inicial. Per a entendre el per què, hauríem d'usar la llei física fonamental de l'aerodinàmica dels aerogeneradors.

#### 2.10.2.1.1. INTRODUCCIÓ

La llei de Betz diu que solament es pot convertir menys de 16/27 (59 %) de l'energia cinètica en energia mecànica usada en un aerogenerador.

La llei de Betz va ser formulada per primer cop pel físic alemany Albert Betz en 1919. El seu llibre *Wind-Energie*, publicat en 1926, proporciona bona part del coneixement que en aquell moment es tenia sobre l'energia eòlica i els aerogeneradors.

És sorprenent que es pugui fer una afirmació general tant taxativa que es pugui aplicar a qualsevol aerogenerador amb un rotor en forma de disc.

2.10.2.1.2. DEMOSTRACIÓ

Considerem, cosa bastant raonable, que la velocitat mitja del vent a través de l'àrea del rotor és el promig de la velocitat del vent sense pertorbar abans de la turbina eòlica, $v_1$, i la velocitat del vent després del seu pas pel pla del rotor $v_2$, així doncs, $\frac{(v_1+v_2)}{2}$. La massa del vent a través del rotor durant un segon és:

$$m_v = \rho \cdot A_{escombrada} \cdot \frac{(v_1+v_2)}{2}$$

**Equació 24. Massa del vent a través d'un rotor durant un segon.**

$\frac{(v_1+v_2)}{2}$ és la velocitat del vent promig a través de l'àrea del rotor. La potència del vent extreta pel rotor és igual a la massa per la diferència dels quadrats de la velocitat del vent, d'acord amb la segona llei de Newton:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot m_v \cdot \left(v_1^2 - v_2^2\right)$$

**Equació 25. Potència del vent extreta pel rotor.**

Substituint en aquesta expressió la $m$ de la primera equació del vent s'obté l'expressió següent per la potència extreta del vent:

$$P_{vent} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot \left(v_1^2 - v_2^2\right) \cdot (v_1+v_2) \cdot A_{escombrada}$$

**Equació 26. Potència extreta pel vent.**

Ara, es compara el resultat amb la potència total del corrent del vent no pertorbada a través de la mateixa àrea $A_{escombrada}$, sense cap rotor que bloquegi el vent. S'anomena a aquesta potència $P_0$:

$$P_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^3 \cdot A_{escombrada}$$

**Equació 27. Potència total del vent sense pertorbar.**

El ràtio entre la potència que s'extreu del vent i la potència del vent sense pertorbar és:

$$\left(\frac{P_{vent}}{P_0}\right) = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \left(\frac{v_2}{v_1}\right)\right)$$

**Equació 28. Ràtio de la potència extreta del vent i la potència del vent sense pertorbar.**

La gràfica és ($P_{vent}/P_o$) en funció de ($v_2/v_1$):

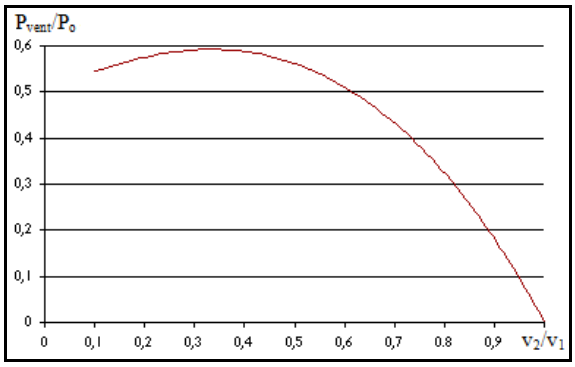



**Figura 9. Corba de ràtio de ($P/P_o$) en funció de ($v_2/v_1$).**

Es pot veure que la funció arriba al seu màxim per $\left(\frac{v_2}{v_1}\right)=\frac{1}{3}$, i que el valor màxim de la potència extreta és de 0,59 cops ó 16/27 de la potencia eòlica disponible. A aquest valor se l'anomena Límit de Betz.

### 2.10.3. Distribució de la pressió de l'aire a la part davantera i posterior del rotor.

La pressió de l'aire augmenta gradualment a mesura que el vent s'apropa al rotor des del davant degut a què el rotor actua com de barrera del vent. La pressió de l'aire cau immediatament darrere del pla del rotor, on seguidament augmenta de forma gradual fins al nivell de pressió normal a l'emplaçament.

### 2.10.4. Potència i energia

La velocitat del vent és molt important per a la quantitat d'energia que un aerogenerador pot transformar en electricitat. La quantitat d'energia que té el vent varia amb el cub de la velocitat mitja, tal i com es pot observar en el següent gràfic.

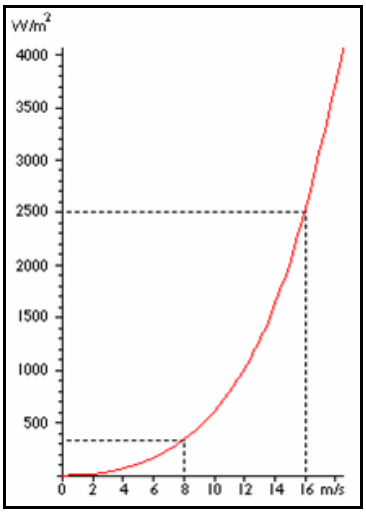



**Figura 10. Energia segons la velocitat del vent.**

La potència del vent que travessa perpendicularment a través d'una àrea circular és:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot \pi \cdot r^2$$

**Equació 29. Potència del vent.**

### 2.10.5. Presa de dades

Un bon estudi de les condicions eòliques de l'emplaçament és essencial per a una bona elecció de la turbina que s'ha d'instal·lar. El fet de situar estacions meteorològiques al futur emplaçament aporta fiabilitat a les dades, però a més cal tenir en compte altres aspectes que es detallaran a continuació.

### 2.10.6. L'anemòmetre

Per a mesurar les velocitats del vent es fa ús generalment d'un anemòmetre de cassoleta, que consisteix en tres o quatre cassoletes orientades en la mateixa direcció en torn a l'eix vertical de l'anemòmetre. El vent és capturat per les cassoletes i les fa girar. Normalment, aquest conté un penell per a detectar la direcció del vent.

També existeixen altres tipus d'anemòmetres que poden estar equipats amb hèlix, tot i que no sol ser habitual. Altrament n'hi ha que inclouen ultrasons o que estan previstos de làser, on aquests detecten el desfasament del so o la llum coherent reflectida per les molècules de l'aire. Per altra banda, els de fil electro-escalfat detecten la velocitat del vent mitjançant petites diferències de temperatura entre els cables situats al vent i amb l'ombra que deixa a sotavent.

L'anemòmetre de l'aerogenerador no cal que sigui tant precís com el de la torre meteorològica. Aquest tant sols s'utilitza per a determinar si bufa el vent suficient com per a què valgui la pena orientar el rotor de l'aerogenerador paral·lelament al vent o posar-lo en marxa. Malgrat això, a l'hora de la presa de dades si que és molt més important que es faci amb un anemòmetre fiable, amb un petit marge d'error.

La millor manera de mesurar la velocitat del vent per a una futura localització és situar un anemòmetre a l'extrem superior d'un pal que tingui la mateixa alçada que la de l'eix del nostre aerogenerador. En el cas que això no fos possible, s'haurien de tornar a fer els càlculs de les velocitats per a una alçada diferent que la de la presa de dades.

**Figura 11. Anemòmetre de cassoleta.**

### 2.10.7. El màstil

Si es col·loca l'anemòmetre a la part superior del màstil es minimitzen les pertorbacions dels corrents d'aire creades pel propi màstil. Si l'anemòmetre es situés a la part lateral, és fonamental enfocar-lo en la direcció del vent dominant per a minimitzar l'abric del pal.

Per a evitar l'abric del vent, es solen utilitzar pals cilíndrics i prims, tibats amb cables. La seva instal·lació és senzilla i es ven juntament amb l'anemòmetre i l'enregistrador de dades o més conegut com a *data logger*.

### 2.10.8. Data logger

Per a guardar totes les dades preses a la torre meteorològica ens caldrà un enregistrador de dades o data logger. Es tracta d'una petita computadora que pot funcionar amb una bateria. L'únic manteniment que s'ha de fer és anar periòdicament a retirar el xip amb les dades enregistrades cada 10 minuts i substituir-lo per un de nou.

**Figura 12. Data logger.**

# 3. L'AEROGENERADOR

## 3.1. Introducció als aerogeneradors

Els aerogeneradors són les màquines capaces de capturar l'energia del vent i transformar-la en energia elèctrica.

Actualment existeixen diferents formes de classificació dels aerogeneradors. La més habitual és segons la posició del seu eix principal, sent aquest d'eix horitzontal o d'eix vertical. Una altra aspecte de classificació seria segons la seva posició respecte del vent, és a dir, a sobrevent o a sotavent.

## 3.2. Classificació

### 3.2.1. Rotor d'eix horitzontal

Els aerogeneradors d'eix horitzontal deuen el seu nom al fet que posseeixen els eixos principals situats paral·lels al terra. Aquest tipus d'aerogeneradors necessiten un sistema de control d'orientació al vent que en aerogeneradors de més de 50 kW, normalment és un petit motor elèctric. Els elements de connexió com són el multiplicador i el generador es troben a l'alçada del rotor en la gòndola situat a la part alta de la torre. En aquest tipus d'aerogeneradors les pales poden estar a sobrevent (situades enfront el vent) o a sotavent (situades darrere el vent). L'avantatge de tenir les pales a sobrevent és que evita l'abric després de la torre però el seu inconvenient és que el rotor ha de ser el més rígid possible. D'altra banda si les pales estan situades a sotavent el flux del vent es distorsiona per entrar en contacte amb la gòndola abans d'incidir sobre les pales. En els aerogeneradors amb pales situades a sotavent es produeixen fluctuacions de la potència eòlica, factor que pot crear càrregues de fatiga.

Una altra classificació dintre dels aerogeneradors d'eix horitzontal és en funció del nombre de pales. Es diferencien entre turbines ràpides i turbines lentes.

Les turbines ràpides generalment són bipales o tripales on el nombre de pales no influeix en la potència proporcionada, sinó que és funció de la superfície escombrada pel rotor i on la seva aplicació és la generació d'energia elèctrica. En canvi, les turbines lentes estan formades per multipales, és a dir, per múltiples plaques metàl·liques de perfil no aerodinàmic que posseeixen un parell d'engegada proporcional al nombre de pales i al diàmetre. Presenten parells d'engegada elevats i una velocitat de gir reduïda i per tant, no tenen aplicacions per a la producció d'energia elèctrica, sinó que destaquen en aplicacions mecàniques de baixa potència com per exemple el bombeig d'aigua.

**Figura 13. Aerogenerador bipala.**

**Figura 14. Aerogenerador tripala.**

**Figura 15. Aerogenerador multipala.**

*3.2.1.1. Constitució*

Els principals components que formen un aerogenerador d'eix horitzontal són els següents:

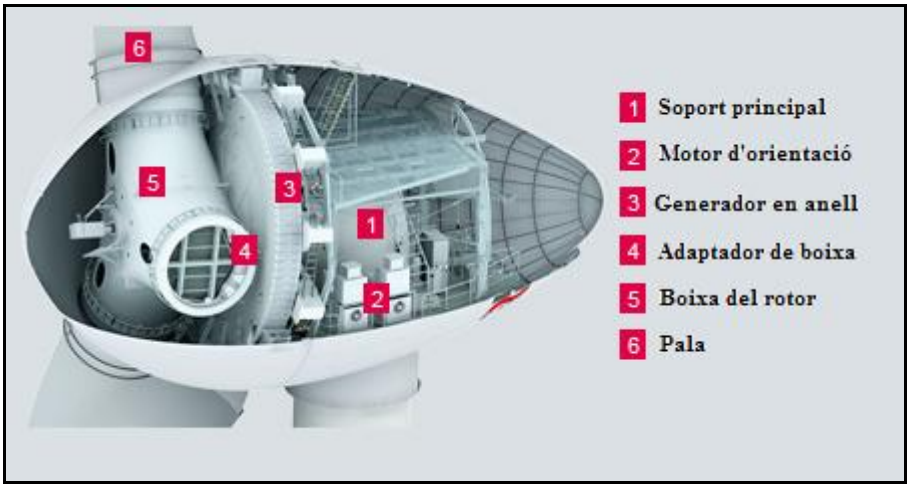



**Figura 16. Parts d'un aerogenerador.**

- **Torre:** Estructura que suporta l'aerogenerador, és a dir, la gòndola i el rotor. Aquesta és millor quan més alta és ja que a més alçada més velocitat del vent. Les torres poden ser tubulars, escalonada o de gelosia:

  - **Tubulars:** Són les més segures i utilitzades degut a la seva simplicitat, fàcil fabricació i baix cost. Aquest tipus de torres permeten incrementar o disminuir la seva alçada en un moment donat afegint més o menys trams de tub. Existeixen de dos tipus:

    - **De formigó:** Formada per formigó armat o pretensat. Per al disseny de torres d'elevada rigidesa i competitiva amb la tubular d'acer, les torres de formigó pretensat presenten millors característiques.

    - **D'acer:** És la més emprada en el mercat. El muntatge habitual es du a terme mitjançant la unió de diversos trams. La llargada habitual és de 60 metres formada per 2 o 3 trams on el seu diàmetre augmenta segons es va apropant a la base per tal d'augmentar la resistència.

  - **Escalonada:** Presenta la particularitat d'escalar fins a l'aerogenerador per realitzar-hi revisions periòdiques sense haver d'abatre la torre. Les dimensions de la torre seran més grans que en la torre de tipus tubular.

  - **Gelosia:** Són les més econòmiques degut a què necessiten només la meitat del material que una tubular amb la mateixa rigidesa. Aquesta pot ser triangular o rectangular però no és abatible i no és suficientment capaç de suportar el pes d'un aerogenerador i els esforços causats. Altrament són les menys utilitzades degut al seu impacte visual.

- **Gòndola:** Situada a la part superior de la torre on en el seu interior es troba tota la maquinària com són el generador elèctric, el multiplicador i el sistema d'orientació. A la seva part esquerra es troben les pales, el rotor i la boixa. Està constituïda per acer forjat o fibra de vidre i s'uneix a la torre gràcies a una corona dentada que permet l'orientació del rotor en funció de la direcció del vent predominant.

  - **Anemòmetre:** Aparell que mesura la velocitat del vent, envia senyals al controlador electrònic connectant l'aerogenerador quan el vent assoleixi la velocitat d'engegada. Si la velocitat supera el límit, generalment 25 m/s, l'ordinador pararà l'aerogenerador per evitar els desperfectes.

- **Controlador electrònic:** Està equipat amb ordinadors per a monitoritzar les condicions de l'aerogenerador i controlar el mecanisme d'orientació en cas de disfunció automàticament pari l'aerogenerador i doni avís a l'ordinador de l'operari encarregat de la turbina.

- **Eix d'alta velocitat amb fre mecànic:** Gira aproximadament a 1.500 rpm factor que permet el funcionament del generador elèctric. Està equipat amb un disc de fre
- mecànic d'emergència. El fre mecànic s'utilitza en cas de fallida del fre aerodinàmic, o durant el manteniment de la turbina. És l'encarregat de fer l'acoblament entre el generador i la caixa multiplicadora.

- **Eix de baixa velocitat:** Gira solidàriament a la velocitat de les pales. Es troba acoblat a la boixa.

- **Generador elèctric:** Transforma l'energia mecànica en energia elèctrica. Es poden classificar segons el tipus de senyal elèctrica que produeixin sent aquesta contínua o alterna.

  - **Corrent continu:** Els aerogeneradors amb generador elèctric de corrent continu o també coneguts com a dinamos, estan totalment descartats per a màquines d'alta potència ja que només es poden connectar a la xarxa mitjançant convertidors electrònics que converteixin el corrent continu a altern. L'alt preu de la màquina i l'elevat cost de manteniment fan que s'hagin substituït per alternadors síncrons d'imants permanents que juntament a un pont rectificador són molt útils per a aplicacions en corrent contínua.

  - **Corrent altern:** Existeixen dos tipus:

    - **Síncron:** Connectat directament a la xarxa té el desavantatge de què la freqüència i el flux són constants i a conseqüència el rotor girarà també a velocitat constant. Degut això es connecten a la xarxa a través d'un convertidor de freqüència per aconseguir independitzar la freqüència del generador amb la de la xarxa per tal de poder treballar a velocitat variable.

      - **Imants permanents:** L'inductor està format per imants. EL principal desavantatge és que aquest tipus d'aerogenerador no pot oferir potències elevades.

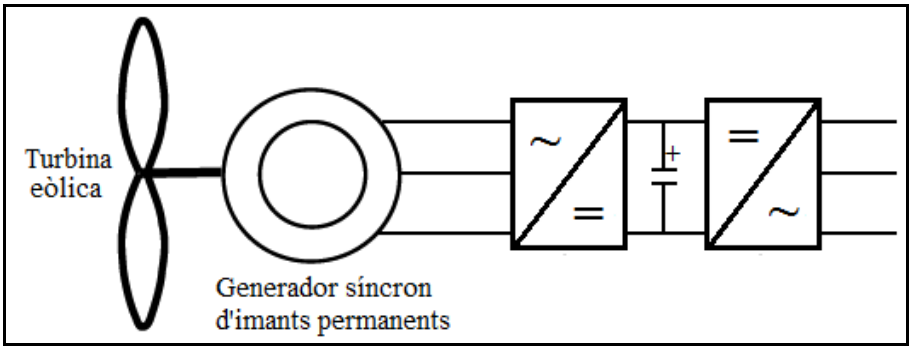



**Figura 17. Generador síncron d'imants permanents.**

      - **Multipol amb convertidor:** Un generador amb un nombre elevat de pols ofereix la possibilitat de reduir les etapes de la màquina però augmentant el cost. Altrament, és necessari utilitzar un convertidor per a l'excitació del debanat en corrent continu.

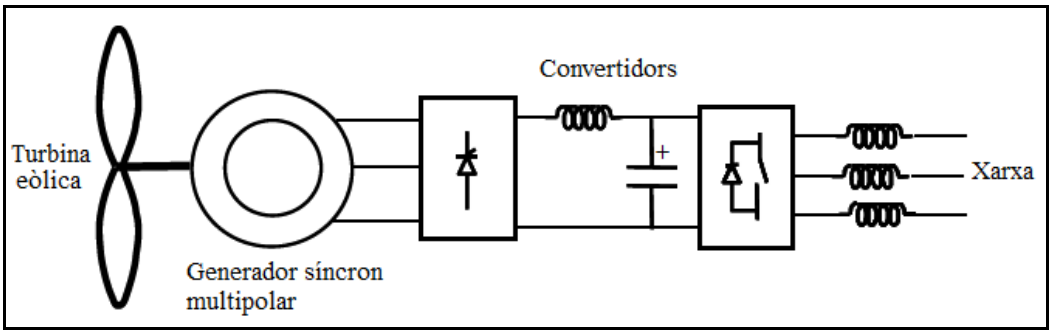



**Figura 18. Generador síncron multipolar.**

- **Asíncron:** Aquest tipus de generador té com a principal desavantatge el consum d'energia reactiva per a la seva excitació magnètica. Per a compensar aquest consum generalment s'instal·len bateries de condensadors.

  - **Gàbia d'esquirol:** És la més simple. Està format per una sèrie de barres de coure o alumini connectades en curtcircuit mitjançant dos anells.

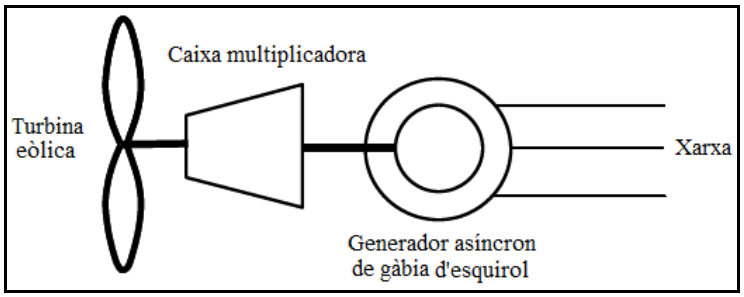



**Figura 19. Generador asíncron de gàbia d'esquirol.**

  - **Rotor bobinat:** Controlat per un convertidor electrònic té la funció de variar la velocitat en un rang d'un 10 % respecte la velocitat de sincronisme gràcies a la variació del valor de les resistències en el rotor.

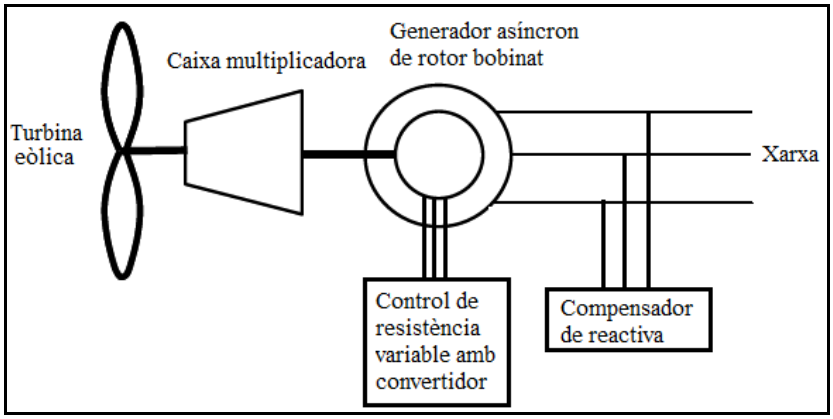



**Figura 20. Generador asíncron de rotor bobinat.**

  - **Doblament alimentat:** Permeten regular la velocitat del rotor amb l'objectiu de treballar en el punt de màxim rendiment de la turbina eòlica per un ampli rang de velocitats de vent. A més, permeten regular la potència reactiva subministrada per la màquina de forma contínua.

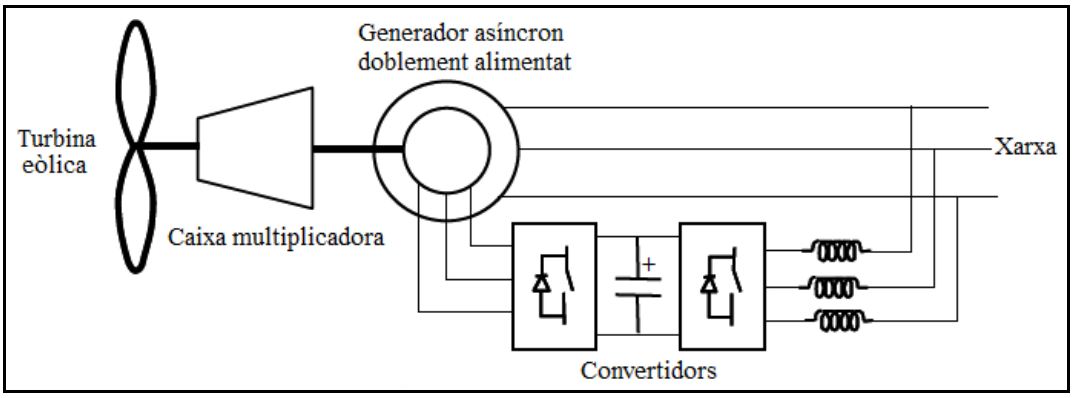



**Figura 21. Generador asíncron doblement alimentat.**

- **Fre de disc:** S'aplica després de què la velocitat de rotació es redueixi considerablement, i a conseqüència, el parell motriu és molt menor. És emprat per efectuar la parada forçada.

- **Mecanisme d'orientació:** Utilitzat per a mantenir el rotor de la turbina en posició contra el vent, és a dir, perpendicular a la direcció del vent per a què a través del rotor incideixi la major proporció possible d'energia eòlica. Existeixen dos tipus de mecanismes:

  - **Actiu:** Utilitzen un penell o molins auxiliars per orientar l'aerogenerador malgrat que no s'empren per a turbines eòliques.

  - **Passiu:** Utilitzen motors elèctrics o sistemes hidràulics per efectuar el moviment de la gòndola. S'empra per aerogeneradors situats a sobrevent. Generalment estan constituïts per dos motors, un de gir de dretes i l'altre de gir d'esquerres.

- **Sistema hidràulic:** Restaura els frens aerodinàmics de l'aerogenerador.

- **Sistema de refrigeració:** Formada per un ventilador elèctric i una unitat de refrigeració d'oli, el primer refreda el generador i el segon refreda l'oli de la caixa multiplicadora. Altres turbines tenen generadors refredats per aigua.

- **Penell:** Mesura la direcció del vent, envia senyals al controlador de forma que fa girar l'aerogenerador en contra del vent utilitzant el mecanisme d'orientació.

- **Rotor:** Conjunt d'elements encarregats del moviment exterior. Està format per les pales, la boixa i el sistema de canvi de pas per les pales.

  - **Pales:** Elements que s'encarreguen de transformar per aprofitament aerodinàmic l'energia cinètica del vent en energia mecànica en l'eix del generador, transmetent la potència del vent cap a la boixa. El nombre de pales suposa un increment del coeficient de potència màxim, és a dir, si es passa de 1 a 2 pales s'obtindrà un increment del 10 %; de 2 a 3, entre un 3 i un 4 %; i de 3 a 4 només un 1 %. Per aquest motiu s'utilitza el tripala ja que la última opció ja no surt rentable. El material emprat en la construcció de les pales és la fibra de vidre juntament amb resina de polièster obtenint unes bones propietats de resistència a la fatiga i d'estructura. Altrament tenen una conductivitat elèctrica reduïda, cosa interessant per la protecció contra raigs i un coeficient de dilatació baix.

  - **Boixa:** Part que uneix les pales del rotor amb l'eix de baixa velocitat. És el centre del rotor a on s'encasten les pales i mitjançant aquest la potència captada pel rotor es transmet a l'eix principal. En funció de si el rotor està format per dos o tres pales podem trobar dos tipus de boixa:

- **Rígida:** Per aerogeneradors de 3 pales. Consisteix en una estructura metàl·lica buida formada generalment amb base en una fosa d'acer nodular.

- **Basculant:** Per aerogeneradors de 2 pales. Permet que les pales es puguin moure lleugerament en una direcció perpendicular al pla del rotor.

- **Sistema de canvi de pas per les pales:** La seva funció principal és fer girar la pala al voltant del seu eix longitudinal per tal d'aprofitar el màxim de vent possible per a produir més energia elèctrica. Aquest sistema té altres funcions com la de controlar la velocitat de gir del rotor i la potència, així com també la capacitat de frenar aerodinàmicament el sistema en cas d'averia.

Cal especificar que els aerogeneradors més emprats són els d'eix horitzontal orientats a sobrevent i amb torre tubular.

*3.2.1.2. Avantatges*

- Extrems de pala variable, el que dóna a les pales l'angle d'atac òptim. Permetre que l'angle d'atac sigui ajustat proporciona gran control, de manera que la turbina pugui recollir la màxima quantitat d'energia eòlica de cada dia i estació.
- Les torres altes permeten accedir a vents més forts en llocs amb més diferència de velocitat de vent. En alguns llocs, cada 10 metres d'alçada, la velocitat del vent s'incrementa un 20 %.
- Alt rendiment, a prop del 50 %.

*3.2.1.3. Inconvenients*

- Les turbines horitzontals tenen problemes per funcionar a prop del terra, degut a les turbulències.
- Les torres altes i les pales llargues són difícils de transportar. El transport pot arribar a costar un 20 % del cost d'equipament.
- Les turbines altes són difícils d'instal·lar i necessiten poderoses grues i hàbils operadors.
- Les turbines altes poden afectar als radars de l'aeroport.
- Presenten impacte visual en l'entorn, i en freqüència susciten reclamacions per enlletgiment del paisatge.
- Exigeixen un control acurat, del contrari, són propenses a la fatiga del material i danys estructurals.
- Tenen que orientar-se cap al vent.

### 3.2.2. Rotor d'eix vertical

Els aerogeneradors d'eix vertical deuen el seu nom al fet que posseeixen els eixos principals situats perpendiculars al terra. Tenen l'avantatge fonamental de què no precisen dispositius d'orientació, ja que poden captar el vent que provingui de qualsevol direcció, simplificant la maquinaria i evitant averies.

Aquesta característica de captació omnidireccional, li permet ser instal·lat en qualsevol terreny sense necessitat d'aixecar altes torres, reduint els costos. D'altra banda disposen dels seus elements interiors a nivell del terra com són el generador elèctric, el tren de potència i els sistemes de control, el que suposa una major simplicitat i una reducció de costos en el muntatge. No obstant, no són els més usuals ja que posseeixen una capacitat de producció d'energia escassa enfront els aerogeneradors d'eix horitzontal, però són més econòmics, cosa que els fa més atractius a ulls del comprador.

*3.2.2.1. Rotor Savonius*

Aquesta turbina va ser inventada per l'enginyer finlandès *Sigurd J. Savonius* l'any 1920, d'aquí el seu nom. Aquest rotor és el més simple que existeix. Consisteix en un cilindre buit partit per la meitat, en el qual les seves dos meitats han sigut desplaçades per convertir-les en una S. Les parts còncaves de la S capten el vent, mentre que els reversos presenten una menor resistència al vent, pel què giraran en el sentit que menys resistència ofereixin.

Aquest sistema té l'inconvenient de presentar una sobrepressió a l'interior de les zones còncaves al no poder sortir l'aire, perjudicant el seu rendiment. El sistema queda millorat separant ambdues pales i deixant un forat entre elles per a què existeixi un flux d'aire.

Degut a la gran resistència a l'aire que ofereix aquest tipus de rotor, només pot ser utilitzat a baixes velocitats. L'ús per a generació d'energia elèctrica precisaria de multiplicadors de gir que reduirien el rendiment.

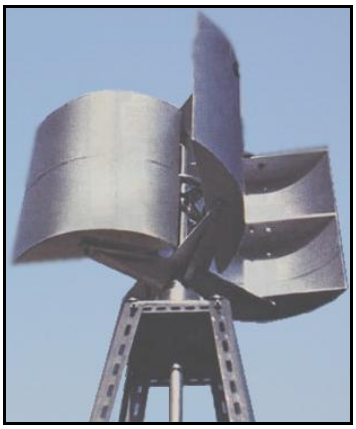


**Figura 22. Rotor Savonius.**

3.2.2.1.1. AVANTATGES

- De fàcil disseny i construcció.
- En ser d'eix vertical no necessita de cap mecanisme d'orientació.
- Baixa velocitat de rotació i, per tant, poc desgast mecànic.
- L'alternador està situat al peu, cosa que ens facilita la instal·lació i el manteniment.
- Més econòmica que la màquina d'eix horitzontal.

- En ser fàcil de construir, resulta molt interessant per a experiències educatives sobre energies renovables.

3.2.2.1.2. INCONVENIENTS

- Baix rendiment, entre un 15 % i un 24 %.
- Les velocitats del vent a prop del nivell del sòl són molt baixes, de manera que tot i que pot estalviar-se la torre, les seves velocitats de vent seran molt baixes a la part més inferior del seu rotor.
- Les pales precisen de més material per a la seva construcció que en els altres tipus.
- La màquina pot necessitar cables tensors de subjecció.
- Per a substituir el coixinet principal del rotor es necessita desmuntar el rotor, tant en les màquines d'eix horitzontal com en les d'eix vertical. En el cas de les últimes, implica que tota la màquina haurà de desmuntar-se.

*3.2.2.2. Rotor Darrieus*

Aquesta turbina deu el nom a l'enginyer francès *Georges Darrieus*, qui va patentar el disseny al 1931. La màquina Darrieus es caracteritza per les seves pales en forma de C on normalment es construeix amb dos o tres àleps.

El rotor Darrieus consta d'unes fines pales amb forma d'ala d'avió simètrica, que estan unides a l'eix només per dos extrems, amb una corda especial dissenyada per a un màxim rendiment entre les dos unions de l'eix. El model de corda més utilitzat és el denominat *Troposkien* o forma de la "corda de saltar". Aquest fet redueix les tensions de flexió de la cara plana degudes a les forces centrífugues i gravitacionals que tendeixen desplaçar menys l'àlep de la seva forma original. La fabricació d'aquest model pot no ser econòmicament pràctica, per què probablement seria necessari l'ús de tècniques de maquinàries de control numèric. Per tant, pot ser avantatjós aproximar-la amb una forma o una combinació de les formes que són més simples de fabricar.

Aquest rotor presenta el problema de què no pot arrencar per sí mateix, tenint que emprar un sistema d'engegada secundari, encara que un cop en funcionament, és capaç de mantenir-se gràcies a l'aerodinàmica de les seves pales. Cal donar-los una velocitat inicial mitjançant un motor o rotors Savonius acoblats. Permet majors velocitats que les del rotor Savonius, però no arriba a les d'un rotor d'eix horitzontal, però de totes formes ja és útil per a la generació d'energia elèctrica.

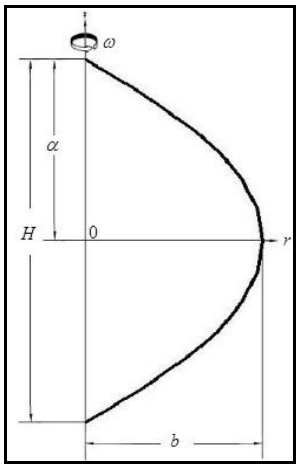



Figura 23. Forma Troposkien o corda de saltar.

Figura 24. Rotor Darrieus.

3.2.2.2.1. AVANTATGES

- En ser d'eix vertical no necessita de cap mecanisme d'orientació.
- Alt rendiment, de l'ordre del 40 %.
- L'alternador està situat al peu, cosa que en facilita la instal·lació i el manteniment.
- Més econòmica que la màquina d'eix horitzontal.

3.2.2.2.2. INCONVENIENTS

- Necessiten un dispositiu d'arrencada.
- Les velocitats del vent a prop del nivell del sòl són molt baixes, de manera que tot i que pot estalviar-se la torre, les seves velocitats de vent seran molt baixes a la part més inferior del seu rotor.
- El seu disseny i construcció és més aviat complex.
- No hi ha massa desenvolupament sobre aquest tipus de rotors.
- La màquina pot necessitar cables tensors de subjecció.
- Per a substituir el coixinet principal del rotor es necessita desmuntar el rotor, tant en les màquines d'eix horitzontal com en les d'eix vertical. En el cas de les últimes, implica que tota la màquina haurà de desmuntar-se.

*3.2.2.3. Rotor Darrieus i Savonius*

Existeixen algunes aplicacions pràctiques on es fa una barreja entre rotors Darrieus i Savonius per augmentar l'eficiència de la màquina degut a què la màquina amb rotor Darrieus té problemes a l'engegada i a l'incorporar un rotor Savonius, el qual no té problemes a l'engegada, podria substituir al motor d'engegada. És per aquest motiu que es pretén dissenyar la turbina en base a aquest principi, buscant la major eficiència per aquest tipus de turbina.

**Figura 25. Rotor Darrieus i Savonius.**

## 3.3. Comparació

En el següent gràfic es pot observar una comparació de rendiments de varis tipus d'aerogeneradors d'eix horitzontal i d'eix vertical. Com es pot veure, els d'eix horitzontal (bipala i tripala) obtenen un millor rendiment que tota la resta, inclús que els d'eix horitzontal multipala. Com s'ha comentat anteriorment, es pot observar que els aerogeneradors d'eix vertical com són els de rotor Darrieus i els de rotor Savonius tenen un rendiment inferior que els d'eix horitzontal.

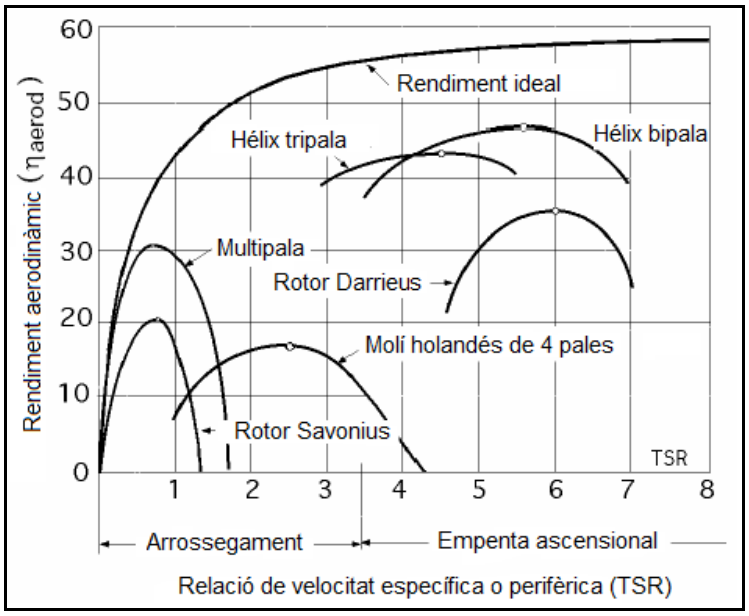



**Figura 26. Comparació de rendiments de varis aerogeneradors.**

## 3.4. Disposició del rotor

### 3.4.1. Funcionament a sobrevent

Són els aerogeneradors que tenen situat el rotor de cara al vent, evitant així la interposició del cos de la torre entre el propi rotor i el vent.

El principal avantatge d'aquest disseny és que s'evita l'abric del vent després de la torre. D'altra banda també hi ha alguna cosa d'abric enfront la torre, és a dir, el vent comença a desviar-se de la torre abans d'aconseguir-la, encara que la torre sigui rodona i llisa. Així doncs, cada vegada que el rotor passi per la torre, la potència de l'aerogenerador caurà lleugerament.

El principal inconvenient d'aquest disseny és que el rotor necessita ser bastant rígid, i estar situat a una certa distància de la torre. A més una màquina d'aquest tipus requereix un mecanisme d'orientació per mantenir el rotor de cara al vent.

Aquest funcionament és el més utilitzat degut a les elevades càrregues aerodinàmiques que apareixen sobre la màquina quan la disposició és a sotavent.

### 3.4.2. Funcionament a sotavent

Són els aerogeneradors que tenen situat el rotor a la cara de sotavent de la torre.

El principal avantatge d'aquest disseny és que es poden construir sense un mecanisme d'orientació, si el rotor i la gòndola tenen un disseny apropiat que fa que la gòndola segueixi al vent passivament que es basa en la inclinació de les pales. No obstant això, en grans màquines aquest és un avantatge una mica dubtós, ja que és necessiten cables per a conduir el corrent fora del generador. Si la màquina ha estat orientada de forma passiva en la mateixa orientació durant un llarg període de temps i no disposa d'un mecanisme d'orientació, els cables poden arribar a patir una torsió excessiva. Un aspecte més important és que el rotor pot fer-se més flexible. Això suposa un avantatge tant en qüestió de pes com de dinàmica de potència de la màquina, és a dir, les pales es corbaran a altes velocitats del vent, de manera que trauran part de la càrrega a la torre.

L'inconvenient principal d'aquest disseny és l'escassa eficiència ja que el pas del rotor a través de l'abric de la torre fa que sorgeixi una fluctuació de la potència. Això pot crear més càrregues de fatiga en la turbina que amb un disseny a sobrevent.

## 3.5. Velocitats

Per al disseny de les turbines eòliques és necessari definir les tres velocitats característiques:

- Velocitat d'engegada ($V_a$): És la velocitat a la qual la màquina comença a funcionar.
- Velocitat de disseny o nominal ($V_n$): És aquella velocitat de la qual es pot obtenir el màxim guany energètic possible i assolint les condicions de disseny.
- Velocitat de posada en bandera ($V_b$): És la velocitat màxima de vent en què pot operar la màquina sense destruir-se, sobre aquesta velocitat l'aerogenerador es para.

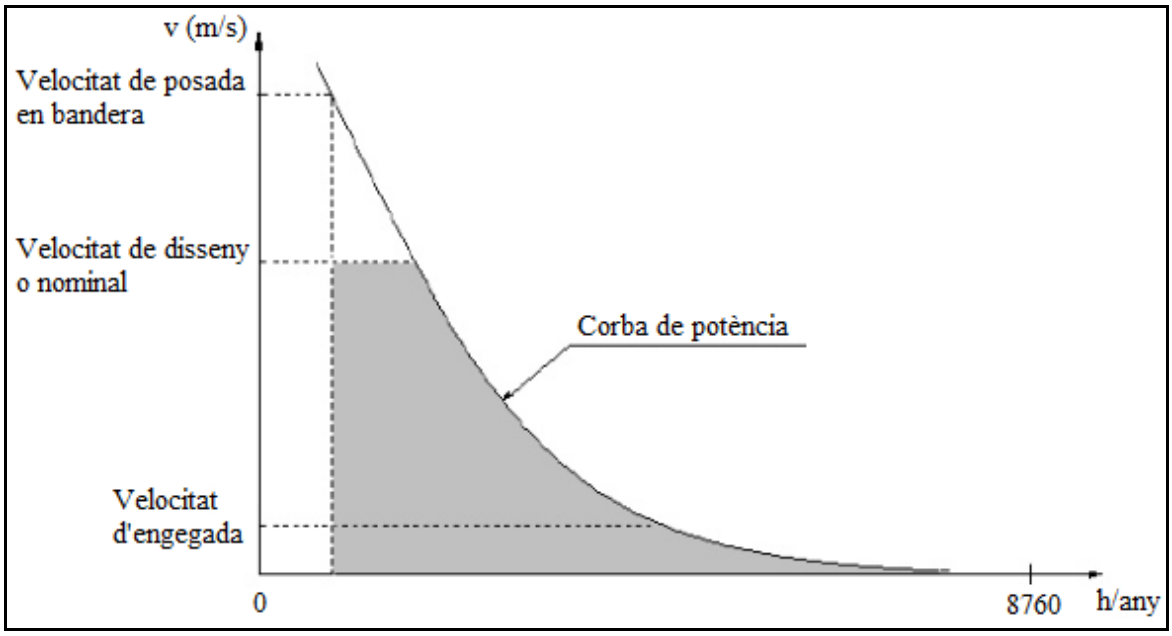



**Figura 27. Velocitats de la turbina eòlica.**

## 3.6. Orientació de l'aerogenerador

L'aerogenerador obtindrà una part de l'energia del vent i la transformarà en energia elèctrica per tant, el vent que quedi a la part posterior patirà una alentiment a conseqüència de la disminució de la seva energia cinètica. Per això, al mateix temps de situar el generador i orientar-lo s'ha de fer un estudi per tal d'esbrinar en quina direcció s'obtindrà un major percentatge d'energia elèctrica, és a dir, quina serà la direcció predominant del vent en cada instant i un cop realitzat, es situarà en la direcció més òptima. Seguidament es veurà quins mètodes existeixen per a dur-ho a terme.

### 3.6.1. Amb penell

Aquest mètode és el més simple que existeix en el mercat però amb una limitació que només és útil per a petits sistemes. Es basa amb un penell situat a la part posterior de la gòndola per a orientar-se.

### 3.6.2. Amb conicitat

Són els aerogeneradors que utilitzen un motor elèctric i un sistema d'engranatges per a orientar la gòndola en la direcció predominant del vent.

Aquest sistema d'orientació té com a principal avantatge la rapidesa adaptació en la direcció òptima del vent, però com a inconvenients fonamentals la seva complexitat i l'excés de consum del motor.

### 3.6.3. Amb molins auxiliars

Aquest sistema és molt poc usual. Es basa en què el flux de l'aire promou els dos rotors ubicats un a cada costat de la gòndola, orientant el generador fins a la posició desitjada.

No obstant, també és necessari tenir sistemes de control de la potència generada per tal d'evitar que en cas de vent excessiu l'aerogenerador pateixi danys en els diferents components que el formen. D'aquesta manera obtenim els sistemes següents:

#### *3.6.3.1. Pas variable*

Aquest sistema consisteix en què les pales variïn el seu angle d'incidència respecte del vent. Per tant, si es dóna el cas que la potència generada és excessiva, les pales comencen a girar sobre el seu eix longitudinal fins adoptar la posició coneguda com de bandera on la resistència al vent, el parell i la potència generada són mínims. L'encarregat de controlar la posició de les pales en funció de la velocitat del vent és un sistema electrònic i el mecanisme de variació de l'angle de pas funciona de forma hidràulica.

Amb aquest mètode s'augmenta la vida útil de la instal·lació en general i conseqüentment, el seu rendiment ja que també es podrà aprofitar els vents escassos.

#### *3.6.3.2. Regulació activa per pèrdues aerodinàmiques*

En la regulació activa per pèrdues aerodinàmiques, els aerogeneradors són similars als de regulació per sistemes de pas variable degut a què els dos poden variar el seu angle de pas.

La diferència fonamental entre les dos és quan el generador amb regulació activa per pèrdua aerodinàmica assoleix la potència nominal. És llavors que aquest quan es vagi a sobrecarregar, faci que es girin les pales en direcció contrària a la què ho faria el sistema de pas variable. D'aquesta manera augmentarà l'angle de pas de les pales per tal de poder-les ubicar en una posició de major pèrdua de sustentació, aconseguint consumir l'excés d'energia del vent.

Tant mateix, el principal avantatge d'aquest mètode és que té la possibilitat de funcionar a aproximadament a potència nominal a totes les velocitats del vent.

#### *3.6.3.3. Regulació passiva per pèrdues aerodinàmiques*

En la regulació passiva per pèrdues aerodinàmiques, els aerogeneradors tenen les pales col·locades en un angle fix. Degut a aquest fet, el perfil de la pala està dissenyat per garantir que en el moment que la velocitat del vent sigui massa elevada, es formi una turbulència en la part de la pala posterior al vent. Així, aquesta pèrdua de sustentació evita que la força ascensional de la pala actuï sobre el rotor. Si augmenta la velocitat del vent, l'angle d'incidència de la pala també ho fa fins arribar al punt de començar a perdre sustentació.

Aquest sistema té com avantatges evitar les parts mòbils al rotor i també d'un sistema de control complex. Malgrat això, tenen l'inconvenient de la complexitat del disseny aerodinàmic de les pales.

# 4. PARTS D'UN AEROGENERADOR SÍNCRON AMB IMANTS PERMANENTS DE FLUX AXIAL

## 4.1. Introducció a les parts d'un generador síncron d'imants permanents

En el present apartat s'explica els elements més importants que formen un generador síncron amb imants permanents per donar a conèixer al lector quins són aquests i quines particularitats tenen, doncs aquests seran els dissenyats en el present projecte. Aquests són:

- Rotor.
- Estator.
- Bobines.
- Imants.

## 4.2. Rotor

El rotor sol ser l'element mòbil de qualsevol màquina elèctrica sigui aquesta un motor o un generador. Juntament amb l'estator, part habitualment fixa, forma el conjunt fonamental per a la transmissió de potència.

### 4.2.1. Constitució

El rotor està format per un eix que suporta un parell de bobines enrotllades sobre un nucli magnètic que gira dins d'un camp magnètic creat o bé per un imant o pel pas per un altre parell de bobines enrotllades sobre unes peces polars, que romanen estàtiques i que constitueixen el que s'anomena estator d'un corrent continu o altern, depenent del tipus de màquina de què es tracti.

Disposa d'unes ranures on van col·locats els conductors que formen la bobina d'induït que estan tancats sobre si mateix constituint un circuit tancat. A l'estar influenciats els conductors per un camp magnètic variable es generen en ells una força electromotriu que dóna lloc a corrents elèctrics. Al circular els corrents elèctrics per uns conductors dins d'un camp magnètic, apareixen forces que obliguen al rotor a moure's seguint el camp magnètic.

En les màquines de corrent altern de mitja i gran potència, és comú la fabricació de rotors amb làmines de material ferromagnètic, generalment d'acer laminat amb un 2 % de contingut en silici per a disminuir les pèrdues associades als camps magnètics variables, com són els corrents de Focault i les produïdes pel fenomen anomenat histèresis.

### 4.2.2. Formes constructives típiques

- **Rotor de gàbia d'esquirol:** Està constituït per barres de coure o d'alumini unides en els seus extrems a dos anells del mateix material.
- **Rotor bobinat o d'anells lliscants:** Està constituït per tres debanats de fil de coure connectats en un punt comú. Els extrems poden estar connectats a tres anells de coure que giren solidàriament amb l'eix, anomenats anells lliscants. Fent contacte amb aquests tres anells es troben unes escombretes que permeten connectar a aquests debanats unes resistències que permeten regular la velocitat de gir del motor. Són més cars i necessiten un major manteniment.

## 4.3. Estator

L'estator és la part fixa d'una màquina rotativa i un dels dos elements fonamentals per a la transmissió de potència (essent l'altra la seva contrapart mòbil, el rotor). El terme aplicat principalment a la construcció de màquines elèctriques i depenent de la configuració de la màquina, l'estator pot ser:

- **L'allotjament del circuit magnètic del camp en les màquines de corrent continu:** En aquest cas, l'estator interactua amb l'armadura mòbil per produir parell motor en l'eix de la màquina. La seva construcció pot ser d'imants permanents o d'electroimants, en qualsevol cas, la bobina que l'energitza es denomina debanat de camp.
- **L'allotjament del circuit d'armadura de les màquines de corrent continu altern:** En aquest cas, l'estator interactua amb el camp rotatori per produir el parell motor i la seva construcció consisteix en una estructura buida amb simetria cilíndrica, feta de làmines d'acer magnètic apilades, per així reduir les pèrdues degudes a la histèresis i als corrents de Foucault.

### 4.3.1. Acer magnètic

L'acer elèctric, també anomenat acer magnètic, acer al silici o acer per transformadors, és un acer especial fabricat per posseir determinades propietats magnètiques, tals com una zona d'histèresis petita (poca dissipació d'energia per cicle), que equival a baixes pèrdues en el nucli i una alta permeabilitat magnètica.

El material es fabrica habitualment en forma de xapes laminades en fred de 2 mm d'espessor o menys. Aquestes xapes s'apilen i un cop reunides, formen nuclis de transformadors o d'estators i rotors de motors elèctrics.

#### *4.3.1.1. Revestiment*

L'acer elèctric sol estar recobert per augmentar la resistència elèctrica entre les lamines, per proporcionar resistència a la corrosió o a la oxidació i lubricació durant el tall. Existeixen varis revestiments, tant orgànics com inorgànics i la seva utilització depèn de l'aplicació de l'acer. El tipus de recobriment seleccionat depèn del tipus de tractament tèrmic de les lamines, de si l'aplicació inclou immersió en oli i de la temperatura de treball de l'aparell.

#### *4.3.1.2. Propietats magnètiques*

Les propietats magnètiques de l'acer elèctric depenen del tractament tèrmic, ja que l'augment de la mida mitja dels vidres disminueixen les pèrdues per histèresis. Les pèrdues per histèresis es determinen mitjançant proves estàndards i pels graus comunament disponibles d'acer elèctric, poden variar de 2 a 10 vats per quilogram per una freqüència de 50 Hz i un flux magnètic de 1,5 Tesles. Existeixen també acers elèctrics semielaborats, els quals són lliurats en un estat tal que, després de donar-l'hi a les xapes la forma final mitjançant l'encunyat, un posterior i últim tractament tèrmic desenvolupa la mida del gra desitjat de 150 micròmetres. Els acers totalment elaborats generalment s'entreguen amb revestiments aïllants, tractaments tèrmics complets, i propietats magnètiques definides, per aplicacions on l'operació d'encunyat no degrada significativament les propietats del material. Una curvatura excessiva, un tractament tèrmic incorrecte, o inclòs una manipulació o emmagatzematge incorrectes de l'acer, poden afectar negativament a les propietats magnètiques i augmentar els sorolls degut a la magnetostricció.

## 4.4. Bobines

Una bobina, o també anomenat inductor, és un component passiu d'un circuit elèctric que, degut al fenomen de l'autoinducció, emmagatzema energia en forma de camp magnètic.

### 4.4.1. Construcció

Un inductor està construït usualment per un cap buit d'una bobina de conductor, típicament filferro o fil de coure esmaltat. Existeixen inductors amb nucli d'aire o amb nucli fet de material ferrós (per exemple, acer magnètic), per incrementar la seva capacitat de magnetisme.

L'inductor consta de les parts següents:

- **Debanat inductor:** És el conjunt d'espires destinat a produir el flux magnètic, al ser recorregut per un corrent elèctric.
- **Culata:** És la peça de substància ferromagnètica, no rodejada per debanats, i destinada a unir els pols de la màquina.
- **Peça polar:** És la part del circuit magnètic situada entre la culata i l'entreferro, incloent el nucli i l'expansió polar.
- **Nucli:** És la part del circuit magnètic rodejada pel debanat inductor.
- **Expansió polar:** És la part de la peça polar propera a l'induït i que bordeja l'entreferro.
- **Pol auxiliar o de commutació:** És el pol magnètic suplementari, proveït o no, de debanats i destinat a millorar la commutació. Solen emprar-s'hi en les màquines de mitjana i gran potència.

#### *4.4.1.1. Energia emmagatzemada*

La bobina emmagatzema energia elèctrica en forma de camp magnètic quan augmenta la intensitat de corrent i tornant-la quant aquesta disminueix.

Matemàticament es pot demostrar que l'energia $U$, emmagatzemada per una bobina amb inductància $L$, que és recorreguda per un corrent d'intensitat $I$, ve donada per:

$$U = \frac{1}{2} L \cdot I^2$$

**Equació 30. Energia emmagatzemada per una bobina.**

#### *4.4.1.2. Model matemàtic d'una bobina*

Una bobina de longitud $l$, secció $S$ i d'un nombre d'espires $N$, pel què circula un corrent elèctric $i(t)$.

La Llei de *Biot-Savart* relaciona la inducció magnètica, amb la causa que la produeix, és a dir, el corrent que circula per la bobina.

D'aquesta forma s'obté que el flux magnètic que abasta és igual a:

$$\Phi(t) = B(t) \cdot S = \mu_o \cdot \frac{N}{l} \cdot i(t) \cdot S = \mu_o \cdot \frac{N \cdot S}{l} \cdot i(t)$$

**Equació 31. Flux magnètic (Llei de Biot-Savart).**

Si el flux magnètic és variable en el temps, es genera en cada espira, segons la Llei de Faraday, una força electromotriu (f.e.m.) d'autoinducció, que segons la Llei de Lenz, tendeix a oposar-se a la causa que la produeix, és a dir, a la variació del corrent elèctric que genera dit flux magnètic. Per aquesta raó, sol anomenar-se força contraelectromotriu. Aquesta té el valor:

$$e(t) = -N \frac{d\Phi(t)}{dt} = -\mu_o \cdot \frac{N^2 \cdot S}{l} \cdot \frac{di(t)}{dt} = -L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

**Equació 32. Força electromotriu.**

A l'expressió $\mu_o \cdot \frac{N^2 S}{l}$ se la denomina coeficient d'autoinducció, $L$, que relaciona la variació de corrent amb la f.e.m. induïda, i com es pot veure, depèn únicament de la geometria. Es mesura en Henry (H).

Suposant una bobina ideal (figura 28), sense pèrdues de càrrega i aplicant la segona Llei de Kirchhoff, es té que:

$$v(t) + e(t) = 0$$

**Equació 33. Segona Llei de Kirchhoff.**

És a dir, en tota bobina elèctrica dins un circuit es produeix en ella una caiguda de tensió tal com:

$$v_L(t) = v(t) = -e(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

**Equació 34. Caiguda de tensió en una bobina.**

Aïllant la intensitat:

$$i(t) = t(0) + \frac{1}{L} \cdot \int_0^t v(t)dt$$

**Equació 35. Intensitat en la bobina.**

Si en l'instant $t = 0$, la bobina està descarregada amb un corrent $I$, aquesta es pot substituir per una bobina descarregada i una font d'intensitat de valor $i(0) = I$ en paral·lel.

El corrent per la bobina i per tant el flux no poden variar bruscament ja que sinó la tensió $v_L(t)$ hauria de fer-se infinita. Per això, a l'obrir un circuit on es troba connectada una bobina, sempre saltarà un arc de corrent entre els borns de l'interruptor que dóna sortida al corrent que descarrega la bobina.

Quan l'inductor no és ideal perquè té una resistència interna en sèrie, la tensió aplicada és igual a la suma de la caiguda de tensió sobre la resistència interna més la força contraelectromotriu auto induïda.

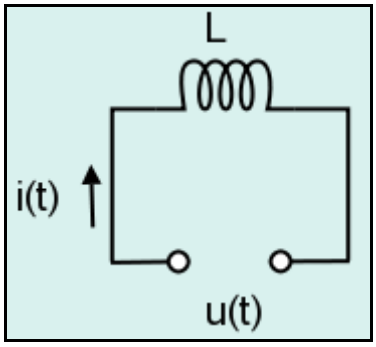



**Figura 28. Esquema bobina.**

*4.4.1.3. Comportaments ideals i reals*

4.4.1.3.1. COMPORTAMENTS EN CORRENT CONTINU

En corrent continu, una bobina ideal es comporta com un curtcircuit ja que al ser el corrent i(t) constant, és a dir, que no varia amb el temps, no hi ha autoinducció de cap f.e.m.

$$v_L(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} = 0$$

**Equació 36. Tensió d'una inductància.**

Una bobina real en règim permanent es comporta com una resistència on el seu valor $R_L$ serà el del seu debanat.

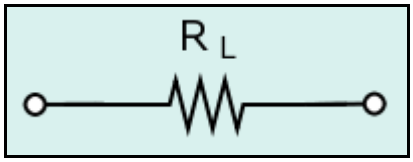



**Figura 29. Resistència debanat d'una bobina.**

En règim transitori, això és, al connectar o desconnectar un circuit amb bobina, succeeixen fenòmens electromagnètics que incideixen sobre el corrent.

#### 4.4.1.3.2. COMPORTAMENTS EN CORRENT ALTERN

En corrent altern, una bobina ideal ofereix una resistència al pas del corrent elèctrica que rep el nom de reactància inductiva, $X_L$, que el seu valor ve donat pel producte de la pulsació $(\omega = 2\pi \cdot f)$ per la inductància, $L$:

$$X_L = j\omega L$$

**Equació 37. Reactància.**

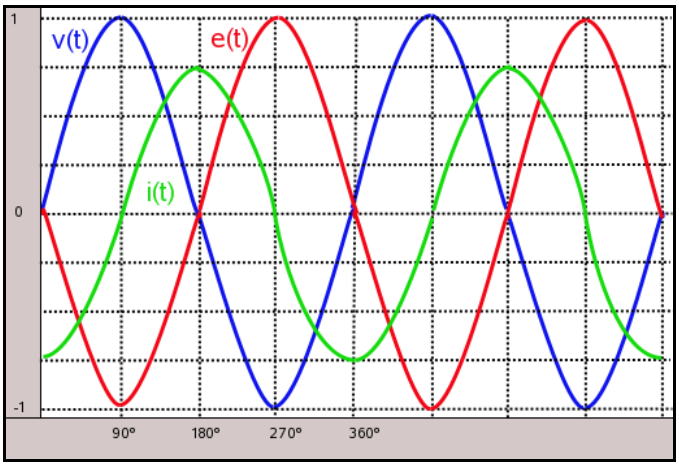



**Figura 30. Diagrama temporal de les tensions i corrents en una bobina.**

Al connectar un corrent altern sinusoïdal $v(t)$ a una bobina, apareixerà un corrent variable $i(t)$, també sinusoïdal, pel què apareixerà una força contraelectromotriu, $-e(t)$, que el seu valor absolut és igual al de $v(t)$. Per tant, quan el corrent $i(t)$ augmenta, $e(t)$ disminueix per dificultar dit augment. Anàlogament, quan $i(t)$ disminueix, $e(t)$ augmenta per oposar-se a dita disminució. Això pot apreciar-s'hi en la figura 30. Entre 0º i 90º la corba $i(t)$ és negativa, disminuint des del seu valor màxim negatiu fins a zero, conservant que $e(t)$ va augmentant fins arribar al seu màxim negatiu. Entre 90º i 180º, el corrent augmenta des de zero fins al seu valor màxim positiu, mentre $e(t)$ disminueix fins a ser zero. Des de 180º fins als 360º el raonament és similar a l'anterior.

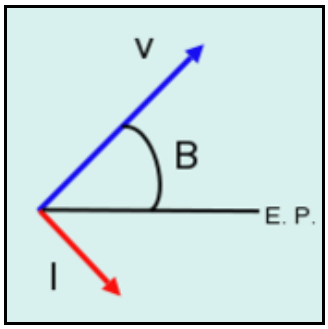



**Figura 31. Diagrama fasorial.**

Donat que la tensió aplicada, $v(t)$ és igual a $-e(t)$, o el que és el mateix, està desplaçada 180º respecte de $e(t)$, resulta que el corrent queda $i(t)$ enrederit 90º respecte de la tensió aplicada. Considerant per tant, una bobina com la de la figura 28, a la què se l'hi aplica una tensió alterna de valor:

$$u(t) = V_o \cdot \sin(\omega t + \beta)$$

**Equació 38. Tensió.**

D'acord amb la Llei d'Ohm circularà un corrent altern, enrederit 90º $\left(\frac{\pi}{2}\right)$ respecte a la tensió aplicada (figura 31), de valor:

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} = I_o \cdot \sin\left(\omega t + \beta - \frac{\pi}{2}\right),$$

**Equació 39. Intensitat bobina en corrent altern.**

Si es representa el valor eficaç del corrent obtingut en forma polar s'obté:

$$\vec{I} = I\angle(\beta - 90^{\circ})$$

**Equació 40. Valor eficaç corrent en forma polar.**

I per tant, en els circuits de corrent altern, una bobina ideal es pot assimilar a una magnitud complexa sense part real i part imaginaria positiva:

$$\overrightarrow{X_L} = 0 + jX_L = X_L\angle 90^{\circ}$$

**Equació 41. Reactància en forma polar.**

En la bobina real s'haurà de tenir en compte la resistència del seu bobinat $R_L$ ,connectada en sèrie o en derivació, podent ser el seu circuit equivalent, un dels dos models que apareixen a la figura 32, depenent del tipus de bobina o de freqüència de funcionament, tot i que per un anàlisi més precís es pot emprar models més complexes.

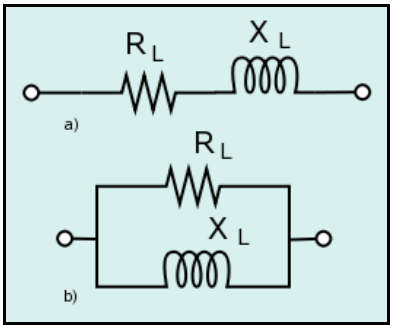



**Figura 32. Impedàncies en sèrie i paral·lel.**

## 4.5. Imants

Un imant és un cos o dispositiu amb un camp magnètic (que atrau o repel·leix) significatiu, de forma que tendeix a ajuntar-se amb altres imants com per exemple, amb el camp magnètic terrestre.

**Figura 33. Imants.**

### 4.5.1. Parts d'un imant

- **Línia neutral:** Línia de la superfície de la barra que separa les zones polaritzades.
- **Pols:** Els dos extrems de l'imant on les forces d'atracció són més intenses. Aquests pols són, el pol nord i el pol sud que no s'han de confondre amb positiu i negatiu. Els pols iguals es repel·leixen i els diferents s'atrauen.

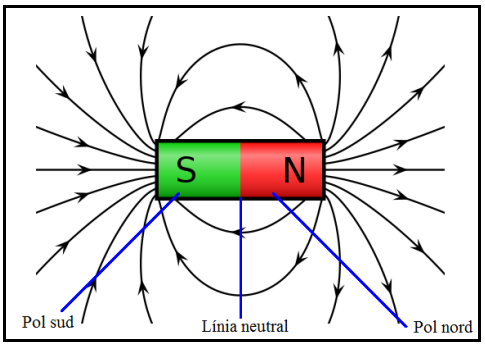



**Figura 34. Parts d'un imant.**

### 4.5.2. Magnetisme

El magnetisme és un fenomen físic pel què els materials exerceixen forces d'atracció o repulsió sobre altres materials. Hi ha materials coneguts que han presentat propietats magnètiques detectables fàcilment com el níquel, ferro, cobalt i els seus aliatges que comunament s'anomenen imants. No obstant això, tots els materials són influenciats, de major o menor forma, per la presència d'un camp magnètic.

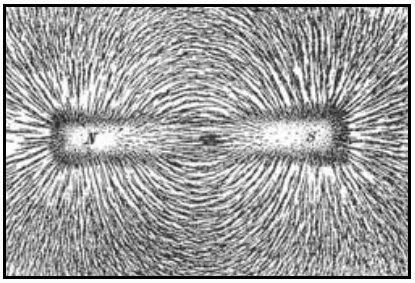


**Figura 35. Línies de forces magnètiques produïdes per un camp magnètic.**

Cada electró és, per la seva naturalesa, un petit imant. Ordinàriament, innumerables electrons del material estan orientats aleatòriament en diferents direccions, però en un imant, quasi tots els electrons tendeixen a orientar-se en la mateixa direcció, creant una força magnètica gran o petita, depenent del nombre d'electrons que estiguin orientats.

A més del camp magnètic intrínsec de l'electró, alguns cops s'ha de tenir en compte amb el camp magnètic degut al moviment orbital de l'electró al voltant del nucli. Aquest efecte és anàleg al camp generat per un corrent elèctric que circula per una bobina. De nou, en general, el moviment dels electrons no dóna lloc a un camp magnètic en el material, però en certes condicions, els moviments poden alinear-se i produir un camp magnètic total mesurable.

El comportament magnètic d'un material depèn de l'estructura del material i, particularment, de la configuració electrònica.

#### *4.5.2.1. Camps i forces magnètiques*

El fenomen del magnetisme és exercit per un camp magnètic. Per exemple, un corrent elèctric o un dipol magnètic crea un camp magnètic, aquest al girar, imparteix una força magnètica a altres partícules que estan en el camp.

Per a una aproximació excel·lent (però ignorant alguns efectes quàntics) les equacions de *Maxwell* (que simplifiquen la llei de Boit-Savart en el cas de corrent constant) descriuen l'origen i el comportament dels camps que governen aquestes forces. Per tant, el magnetisme s'observa sempre que partícules carregades elèctricament estan en moviment.

La mateixa situació que crea camps magnètics (càrrega en moviment en un corrent o en un àtom i dipols magnètics intrínsecs) són també situacions en què el camp magnètic causa els seus efectes creant una força. Quan una partícula carregada es mou a través d'un camp magnètic B, s'exerceix una força F donada pel producte vectorial:

$$\vec{F} = q\left(\vec{v_c} \; x \; \vec{B}\right)$$

**Equació 42. Força causada pels camps magnètics.**

Degut a què és un producte vectorial, la força és perpendicular al moviment de la partícula i al camp magnètic.

La força magnètica no realitza treball mecànic en la partícula, això canviaria la direcció del moviment d'aquesta, però no causaria el seu augment o disminució de la velocitat. La magnitud de la força és:

$$F = q \cdot v_c \cdot B \cdot \sin\left(\theta_{\vec{v}\vec{B}}\right)$$

**Equació 43. Força magnètica.**

### 4.5.3. Imant de terres rares: Imant de neodimi

Un imant de neodimi (també conegut com imant NdFeB, NIB, o Neo) és un tipus d'imant de terres rares. Es tracta d'un imant permanent fet d'un aliatge de neodimi, ferro i bor, combinats per formar un compost que cristal·litza en el sistema cristal·lí tetragonal amb la fórmula empírica Nd2Fe14B. Va ser desenvolupat en 1982 per *General Motors* i la divisió de metalls especials de la *Sumitomo Metal Industries*. Són els imants més poderosos fets per l'home. Han reemplaçat a altres tipus d'imants en moltes aplicacions de la indústria moderna que requereixen imants permanents de gran poder.

#### *4.5.3.1. Descripció*

L'estructura tetragonal dels cristalls de Nd2Fe14B posseeixen una excepcional anisotropia magnètica uniaxial (HA ~ 7 T). Això l'hi atorga al compost potencial de posseir una altíssima coercitivitat (resistència al ser desmagnetitzat). El compost també posseeix una alta saturació magnètica ($J_s$ ~1,6 T o 16 kG) que típicament és de 1,3 T. Per tant, com la màxima densitat d'energia és proporcional a $J_s^2$ , aquesta fase magnètica posseeix el potencial d'emmagatzemar grans quantitats d'energia magnètica ($BH_{max}$ ~ 512 kJ/m$^3$ or 64 MG·Oe), la qual és considerablement major que la dels imants de samari-cobalt (SmCo), que van ser els primers tipus d'imants de terres rares en ser comercialitzats. En la pràctica, les propietats magnètiques dels imants de neodimi depenen de la composició de l'aliatge, microestructura i tècnica de manufactura empleada.

#### *4.5.3.2. Producció*

Hi ha dues vies principals per la manufactura d'imants de neodimi:

- La metal·lúrgica clàssica de pols, també anomenada procés d'imants sintetitzats.
- La solidificació ràpida, també anomenada procés d'imants lligats.

Els imants de neodimi sintetitzats es preparen fonent les matèries primes en un forn, colant el material fos en motlles i refredant-ho per formar lingots. Després es produeix una pols extremadament fina a partir d'aquests lingots. Aquesta pols es sotmesa més tard a un procés de sintetitzat en fase líquida per mitjà de la qual les partícules s'alineen magnèticament i s'uneixen entre si per formar blocs densos, que són tractats tèrmicament, tallats amb forma desitjada, sotmesos a un tractament superficial per preveure la corrosió, i magnetitzat. Actualment es produeixen entre 45.000 i 50.000 tones d'imants de neodimi sintetitzats cada any.

Els imants de neodimi lligats es preparen a partir d'una fina línia d'aliatge de Nd-Fe-B obtinguda per mitjà de filat per fusió. Aquesta cinta conté grans de Nd2Fe14B d'escala nano-mètrica (nano-grams) aleatòriament orientats. La cinta es polvoritza per produir petites partícules, que són barrejades amb un polímer i la barreja resultant és modelada per injecció per formar imants. Els imants lligats ofereixen un flux magnètic menor que el dels imants sintetitzats, però presenten l'avantatge de què poden ser modelats en formes molt intricades i degut a què no són conductors de l'electricitat, no presenten pèrdues significatives degut a la formació de corrents de Foucault. Es produeixen aproximadament unes 5.500 tones d'imants de neodimi lligats cada any.

*4.5.3.3. Riscs*

La gran quantitat de força exercida pels imants de terres rares ha creat riscs que no s'havien vist per altres tipus d'imants. Inclòs els imants de neodimi poc grans són capaços de provocar lesions a qualsevol part del cos que pugui ser pessigada entre dos imants, o entre un imant i una superfície metàl·lica, podent provocar fractures. Si accidentalment una persona queda atrapada entre dos imants, o entre un imant i una superfície metàl·lica, la reacció natural d'aquesta persona es tractar d'alliberar el membre o la part corporal atrapada. No obstant això, degut a què en general fa que l'espai entre els dos magnètics es redueixi, la força d'atracció generada entre ells dos pot arribar a fer-se perillosament gran. D'ésser possible, la persona hauria de tractar de suportar el dolor i fer el que està al seu abast per augmentar la distància entre els dos imants (o com a mínim, prevenir que segueixin acostant-s'hi), i tot seguit, tractar de retirar el membre atrapat. Els professionals que treballen amb tals imants solen incloure cunyes de bronze com a part habitual en les seves eines.

*4.5.3.4. Magnetització*

La denominació N35, N40, N42, N45, N45H, etc. és una mesura de qualitat del material empleat per a la fabricació de l'imant. D'aquesta es poden deduir dues coses.

- "L'energia magnètica" per unitat de volum emmagatzemada en aquest material.
- La temperatura màxima a la què pot ser exposat l'imant.

El número (per exemple 35, 40, 42, 45) es correspon aproximadament amb el producte energètic màxim de l'imant (en MGOe).

La lletra N, M, H o les lletres SH, UH o EH contenen informació a prop de la temperatura màxima d'ús que pot ser 80, 100, 120, 150, 180 o 200 ºC.

Quan col·loquialment es parla de la "força" d'un imant, és referit quasi sempre a la força de subjecció en contacte directe amb la placa de metall o la força que atrau una peça de ferro (o un altre imant) des de certa distància.

Aquesta "força" no depèn només del material empleat, sinó que també dels factors següents:

- El volum de l'imant.
- La forma de l'imant.
- Les proporcions de l'imant (per exemple, la relació entre diàmetre i alçada en un disc magnètic).
- La combinació amb altres materials, per exemple, si l'imant està muntat sobre una peça metàl·lica o inclòs en un recipient metàl·lic o pel contrari es troba aïllat.

Alguna cosa semblant succeeix amb la temperatura d'ús. La temperatura màxima indicada pot ser empleada sense problema només quan les proporcions de l'imant són òptimes. Quan un imant, per exemple, és molt prim en relació amb el seu diàmetre (o longitud), assolirà abans la temperatura màxima.

El volum serà en la majoria dels casos el factor decisiu per la força, més que les diferències en la magnetització. Per això, l'imant més gran és quasi sempre el més fort, tot i que el codi de magnetització sigui una mica menor.

*4.5.3.5. Producte energètic màxim*

El producte energètic màxim defineix l'energia magnètica emmagatzemada en un imant. Es tracta del producte màxim assolible de densitat de flux B i intensitat del camp H.

Com a unitat, s'utilitza el $kJ/m^3$ o bé el MGOe (Mega-Gauss-Oersted).

Per a la mateixa aplicació es pot utilitzar un imant petit amb un elevat producte energètic o un imant gran amb producte energètic baix.

*4.5.3.6. Temperatura màxima*

La temperatura màxima dependrà de tres factors:

- El tipus de temperatura de l'imant.
- La forma de l'imant.
- La disposició dels imants en un grup.

Si es porta un imant de neodimi a una temperatura superior a la màxima d'operació, aquest perdrà part de la seva magnetització, s'adherirà amb menor força, fins i tot després de tornar-lo a refredar. En cas de què la temperatura superi la temperatura de Curie, no quedarà romanència magnètica alguna.

| Tipus de temperatura | Temperatura d'operació màxima | Temperatura de Curie |
|---|---|---|
| N | 80 ºC | 310 ºC |
| M | 100 ºC | 340 ºC |
| H | 120 ºC | 340 ºC |
| SH | 150 ºC | 340 ºC |
| UH | 180 ºC | 350 ºC |
| EH | 200 ºC | 350 ºC |

**Taula 4. Temperatura d'operació màxima dels imants de neodimi.**

Les temperatures d'aplicació màxima d'aquesta taula són merament orientatives. Si es requerissin imants més forts per temperatures d'aplicació majors, caldria optar per imants de samari i cobalt (SmCo).

*4.5.3.7. Tipus de pèrdues per temperatura*

El tipus de pèrdues per temperatura és el mateix que la pèrdua de magnetització degut a la temperatura elevada.

Hi ha tres tipus de pèrdues: reversibles, irreversibles i permanents.

- **Pèrdua reversible:** La magnetització de l'imant és més dèbil només quan està calent. Si es torna a refredar, recuperarà la seva força original independentment de la manera en què s'escalfi o es refredi l'imant.

- **Pèrdua irreversible:** Si es porta un imant a una temperatura d'operació superior a la màxima, i després es refreda, aquest imant queda debilitat per sempre. El fet d'escalfar-lo en múltiples ocasions a la mateixa temperatura no reforça les pèrdues irreversibles. A través d'un camp magnètic extern superficialment fort i d'una nova magnetització, es por recuperar la seva força original.

- **Pèrdua permanent:** Si la temperatura és superior a aproximadament 900 ºC, l'estructura granular dels imants de neodimi sintetitzats comença a modificar-se. En aquest cas, no és possible efectuar una nova magnetització.

#### *4.5.3.8. Duració de l'escalfament*

En el cas de pèrdues irreversibles, la duració de l'escalfament només té una influència mínima en la força de les pèrdues, sempre i quant la temperatura de l'interior de l'imant sigui la mateixa en totes parts durant l'escalfament. Al escalfar breument un imant gruixut, la temperatura externa pot ser molt major a la temperatura màxima interna d'aquest. En aquest cas, les pèrdues per temperatura depenen de la posició.

#### *4.5.3.9. Forma i disposicions dels imants en les pèrdues per temperatura*

El fet de què es produeixi pèrdues permanents depèn no només del tipus de temperatura d'un imant, sinó que també de la seva forma i la disposició en un grup d'imants i materials ferromagnètics. Depenent de la disposició i la forma, un imant d'un tipus de temperatura determinada pot patir pèrdues fins i tot a temperatures inferiors.

En les pèrdues per temperatura depenent de la forma de l'imant s'aplica la norma següent: un imant molt pla (pla = diàmetre dividit per alçada) polaritzat al llarg de la seva dimensió més curta, pateix pèrdues irreversibles a temperatures inferiors a la temperatura d'operació màxima. No obstant això, si la relació entre el diàmetre i l'alçada és menor a 4, l'imant es pot escalfar a temperatura d'operació màxima superior a la indicada sense que perdi magnetització.

Quant més exposat quedi un imant en una posició determinada a un camp contrari, menor serà la temperatura d'operació màxima real.

Les menors pèrdues per temperatura es donen en disposicions en les què un imant d'un circuit magnètic posa un "curtcircuit" de forma magnètica (en analogia a un circuit elèctric). En un curtcircuit magnètic, els dos pols estan units a través d'un material altament permeable, insaturat i ferromagnètic, com per exemple, ferro dolç. En aquesta disposició en curtcircuit, no hi ha cap camp contrari en els imants.

#### *4.5.3.10. Força de subjecció*

La força màxima que es donen en molts catàlegs solen ser valors teòrics, així doncs, cal tenir en compte que la força de subjecció real depèn dels factors següents:

- **Distància entre l'imant i el cos de subjecció:** En cas de no existir un contacte directe, la força de subjecció disminueix ràpidament a l'augmentar la distància. Un petit espai al voltant de mig mil·límetre pot en alguns casos, disminuir la força de subjecció a la meitat. També, una capa fina de pintura en el cos de subjecció, contribueix també a una reducció de la força.

- **Material del cos de subjecció:** La força de subjecció teòrica és vàlida quan el cos de subjecció està compost solament fer ferro tou. L'acer de construcció del tipus ST37 haurà de reduir el valor en aproximadament el 5 %. En el cas de ST70 la reducció serà aproximadament del 30 %.
- **Superfície del cos de subjecció:** Quant més llisa és la superfície del cos de subjecció, major serà la força. En superfícies aspres caldrà tenir en compte una reducció considerable de la força de subjecció.
- **Direcció de la força:** El valor teòric de la força de subjecció és vàlid quan la força exercida és perpendicular a la superfície de contacte, o sigui, quan el cos de subjecció, per exemple, s'atragui perpendicularment sota l'imant.
- **Ample del cos de subjecció:** El cos de subjecció no haurà de ser massa prim, ja que aquest podria arribar a un punt de saturació magnètica i una part del camp magnètic seria depreciat.

#### *4.5.3.11. Romanència*

La romanència magnètica o magnetització romanent és la capacitat d'un material per retenir el magnetisme que l'hi ha sigut induït, és a dir, la magnetització persisteix en un imant després de què es retirés el camp magnètic extern. També és la mesura de la magnetització d'un material amb propietats magnètiques. Col·loquialment, quan un imant està "magnetitzat", posseeix una romanència. És també la memòria magnètica d'un medi d'emmagatzemament magnètic i la font d'informació sobre el camp magnètic de la Terra en el paleomagnetisme.

El terme magnetització residual s'utilitza generalment en aplicacions d'enginyeria. En els transformadors, motors elèctrics i generadors és desitjable una magnetització gran. En moltes altres aplicacions és una contaminació no desitjada, com per exemple, una magnetització romanent en un electroimant després de què se li talli el corrent en la bobina. En el cas de què no sigui desitjada, la romanència pot ser remoguda per desmagnetització.

Com unitat de mesurament per la inducció magnètica o densitat de flux és utilitzat el Tesla (T). Tot i que en el passat, la unitat utilitzada era el Gauss (G), essent 1 Tesla = 10.000 Gauss.

##### 4.5.3.11.1. ROMANÈNCIA DE SATURACIÓ

La definició per defecte de romanència és la magnetització que roman en un material, en un camp magnètic nul, després d'haver aplicat un camp magnètic gran (el suficient per arribar a la saturació). Un cicle d'histèresis magnètica es mesura amb instruments, com un magnetòmetre de mostra vibrant, i la intersecció en el camp zero és una mesura de la romanència. En física, aquesta mesura es converteix en una magnetització mitjana (el moment magnètic total dividit pel volum de la mostra) i es denota en les equacions com $M_r$. Si cal diferenciar d'altres tipus de romanència se l'anomena romanència de saturació o romanència de saturació isotèrmica (SIRM) i es denota per $M_{rs}$.

En aplicacions d'enginyeria, la magnetització residual es sol mesurar amb un Analitzador B-H, que mesura la resposta a un camp magnètic AC. Això es representa com una densitat de flux BR. Aquest valor de romanència és un dels paràmetres més importants que caracteritzen els imants permanents, i es mesura el camp magnètic més fort que pot produir.

#### *4.5.3.12. Coercitivitat*

La coercitivitat $H_c$ defineix la intensitat del camp que és necessària per tornar a desmagnetitzar completament un imant. Quant major sigui aquest nombre, millor mantindrà un imant la seva magnetització al ser exposat a un camp magnètic oposat.

Es diferencia entre la coercitivitat $bH_c$ de densitat de flux i la coercitivitat $jH_c$ de polarització. Si un imant queda exposat a un camp desmagnetitzant d'intensitat $bH_c$, la densitat de flux en l'imant desapareix. L'imant, no obstant això, continua essent magnètic, però el flux generat per ell queda neutralitzat pel flux oposat del camp desmagnetitzant. Solament quan la intensitat del camp desmagnetitzant arriba al valor $jH_c$, l'imant perd la seva polarització i amb ella la seva desmagnetització completament.

La unitat del Sistema Internacional per la intensitat del camp magnètic és A/m (Amper per metre). No obstant això, també és possible trobar la unitat Oe (Oersted).

#### *4.5.3.13. Inducció magnètica*

La inducció magnètica o densitat de flux magnètic, el qual el seu símbol és B, és el flux magnètic per unitat d'àrea d'una secció normal a la direcció del flux. També és anomenada intensitat de camp magnètic, ja que és el camp real. La unitat de la inducció magnètica en el Sistema Internacional és el tesla. Està donada per:

$$\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{\left(q\vec{v_c}\right) \times \hat{u}_r}{d_i^2}$$

**Equació 44. Inducció magnètica.**

### 4.5.4. Corba de desmagnetització

La corba de desmagnetització mostrada determina la densitat de flux magnètic (o inducció magnètica) B que genera l'imant d'acord al valor de la intensitat de camp H. A mesura que H s'apropa al valor de revisió $-H_c$, la densitat de flux disminueix fins que cau ràpidament al passar pel colze de la vora. Això significa que en les aplicacions pràctiques s'ha de mantenir l'imant per sobre del colze per obtenir un flux magnètic útil.

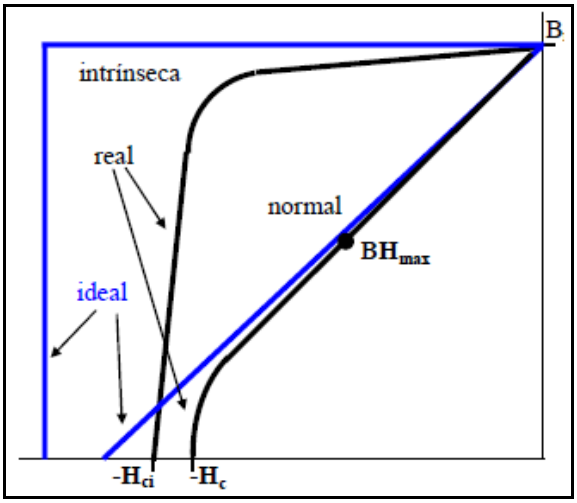



**Figura 36. Corba de desmagnetització.**

# 5. DISSENY DEL GENERADOR

## 5.1. Introducció al disseny del generador

En el present apartat es detallarà les diferents peces que constitueixen el disseny del prototip del generador. El bon disseny dels diferents elements que el formen dictaminarà el resultat, amb el que és fa imprescindible prestar una gran atenció alhora de dissenyar i/o escollir les peces per tal d'optimitzar el funcionament i poder a obtenir uns resultats satisfactoris.

Es mostrarà els diferents elements escollits, uns dissenyats mitjançant un *software* en 3D i altres mostrats a partir de fotografies reals. Es mencionaran les seves característiques més importants. Serà representat el conjunt complet (a partir del disseny en 3D), és a dir, el generador amb les diferents peces adjuntades per poder fer-nos una idea de com seria en la realitat.

## 5.2. Disseny del rotor

El rotor gira solidari amb les pales mogudes pel vent. S'ha escollit emprar com a rotor un disc de fre de cotxe d'acer de 13,2 cm de radi. En ell es s'ubicaran els 10 imants formant una corona circular. La distància mínima a la qual es poden ubicar els imants és a partir de 6,7 cm de l'eix de simetria del rotor fins al seu màxim extrem, és a dir, el radi. Cal tenir en compte però, que caldria polir la part on s'ubicarien els imants per tal de deixar la superfície uniforme.

El material del disc de fre és ferro es desconeix si està format d'algun aliatge. No obstant això, pels càlculs i pel disseny en general, s'ha considerat un ferro quasi pur.

### 5.2.1. Fotografies i disseny del disc de fre

Tot seguit, es mostren un seguit de fotografies del disc de fre escollit pel generador, essent aquest simulat per un *software* de disseny 3D, procurant representar-lo amb la màxima semblança al real, i amb el màxim detall possible.

**Figura 37. Vista superior del disc de fre (rotor).**

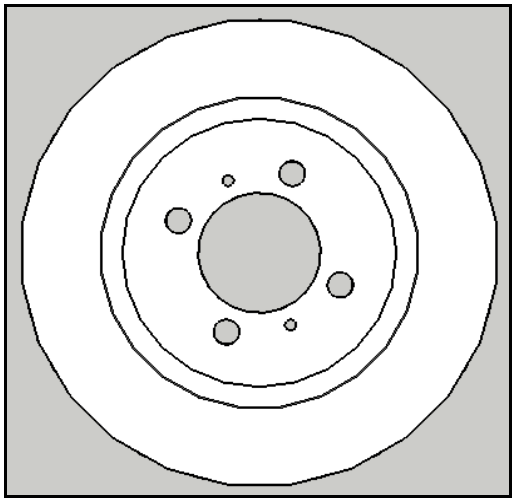


**Figura 38. Vista superior del rotor dissenyat.**

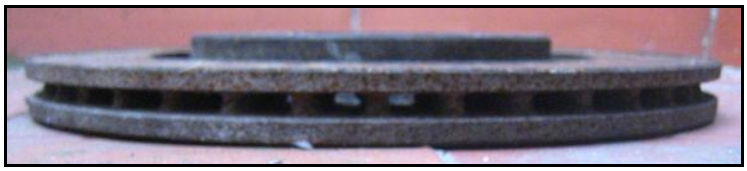


**Figura 39. Vista frontal del disc de fre (rotor).**

**Figura 40. Vista frontal del rotor dissenyat.**

**Figura 41. Vista inferior del disc de fre (rotor).**

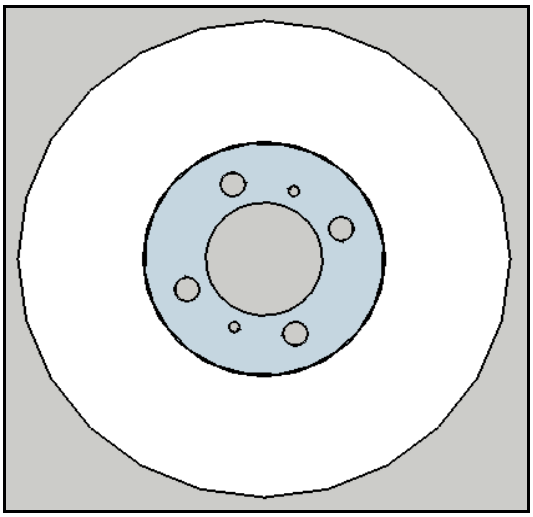


**Figura 42. Vista inferior del rotor dissenyat.**

**Figura 43. Vista isomètrica del disc de fre (rotor).**

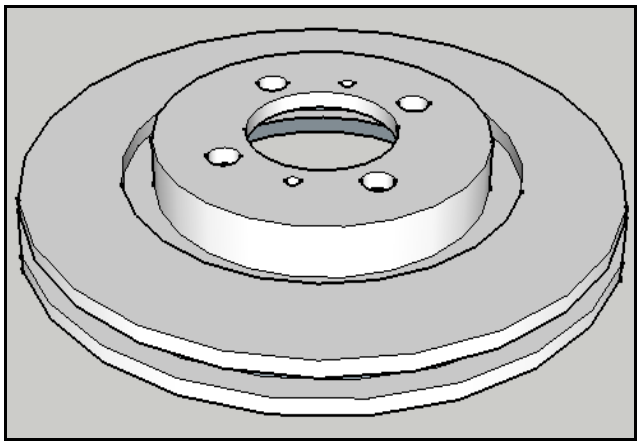


**Figura 44. Vista isomètrica del rotor dissenyat.**

## 5.3. Disseny de l'estator

L'estator dissenyat és bastant simbòlic, i no s'ha procurat prestar-hi gaire atenció pel fet de què és una peça on només hi reposaran les bobines. Aquest ha sigut representat en l'apartat 5.6.3 juntament amb les bobines. No obstant, s'ha pensat de què el material podria ser xapa magnètica pel fet de tancar el flux.

| Dimensions de l'estator | |
|---|---|
| Diàmetre | $13{,}2 \cdot 10^{-2}$ m |
| Alçada | $1 \cdot 10^{-2}$ m |

**Taula 5. Dimensions de l'estator**

## 5.4. Disseny bobines

Tot seguit es mostren els dissenys i les característiques més significatives dels debanats.

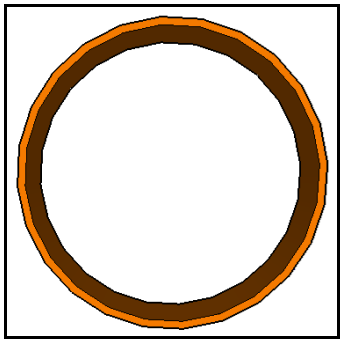


**Figura 45. Vista superior de la bobina dissenyada.**

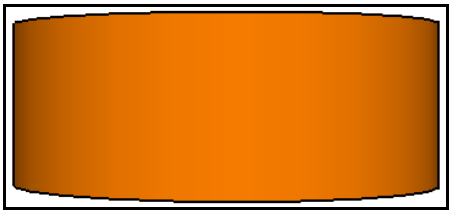


**Figura 46. Vista frontal de la bobina dissenyada.**

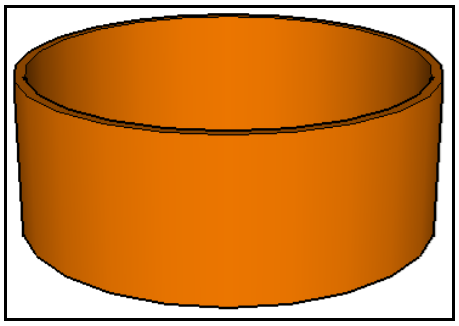


**Figura 47. Vista isomètrica de la bobina dissenyada.**

### 5.4.1. Material del cable

En el fil de coure esmaltat, el coure és trefilat en fred i té una puresa del 99 % (coure electrolític, norma UNE 20 003) i l'esmalt és resinós, el que l'hi dóna a l'aïllament elèctric possibilitats de millorar algunes característiques (norma UNE EN 60317-20, -38, -35, -13, -8).

Existeixen varis tipus de cobertures pel filferro, algunes d'elles donen resistències altes a la temperatura, altres donen alta flexibilitat sense trencar-se en curvatures amb diàmetres petits, altres són dotades de cues que a l'escalfar-se uneixen un filferro amb un altre sense perdre l'aïllament i formen un paquet rígid tot i que les bobines quedin exposades a la vista.

### 5.4.2. Dimensions del cable

| Dimensions cable | |
|---|---|
| Diàmetre | $1 \cdot 10^{-3}$ m |
| Secció | $0{,}79 \cdot 10^{-6}$ m$^2$ |

**Taula 6. Dimensions del cable.**

### 5.4.3. Dimensions del debanat

La primera part del dimensionat de les bobines ha recaigut en calcular la distància que tindran per tal de què hi càpiguen totes en l'estator i estiguin decalades entre elles 24º.

S'ha procurat que el centre de cada bobina coincideixi amb l'eix de simetria de cada imant, per tal de què un cop aquest passi per sobre de la bobina, abraci la màxima àrea possible.

Per fer possible uns càlculs acurats s'ha optat per donar a les bobines una forma cilíndrica, de diàmetre 0,02 m.

| Dimensions bobina | |
|---|---|
| Radi | $2 \cdot 10^{-2}$ m |
| Nombre de capes | 1 |
| Nombre de voltes | 15 |
| Alçada | $1{,}5 \cdot 10^{-2}$ m |

**Taula 7. Dimensions de la bobina.**

## 5.5. Disseny imants

S'ha escollit utilitzar imants ja que les màquines amb imants presenten una sèrie d'avantatges com són:

- Absència d'anells lliscants i escombretes, és a dir, de totes les peces mòbils necessàries per transmetre la potència d'excitació. Els problemes de revisió i manteniment es redueixen substancialment.

- Al no existir debanat d'excitació, s'eliminaran les pèrdues Joule en el rotor, millorant així el rendiment i simplificant notablement els problemes de refrigeració. L'energia tèrmica més difícil d'evacuar a l'exterior és la produïda en el rotor.

Davant els avantatges anomenats, els seus principals inconvenients són:

- La tendència a la desmagnetització dels imants a conseqüència de grans corrents en l'induït i/o temperatures assolides durant el funcionament del motor.
- L'excitació és fixa i per tant no es pot actuar sobre ella per modificar característiques de funcionament de la màquina.

### 5.5.1. Imant escollit pel disseny

L'imant escollit és un disc magnètic de 45 mm de diàmetre i 10 mm de gruix. La seva magnetització (qualitat) és N35, i presenta una força de subjecció màxima aproximada de 38 kg. La romanència que presenta és entre 1,17 T i 1,21 T, la qual, s'ha escollit com a romanència a utilitzar en els càlculs la mitja entre els dos valors anteriors: 1,19 T.

**Figura 48. Imatge de l'imant escollit pel disseny.**

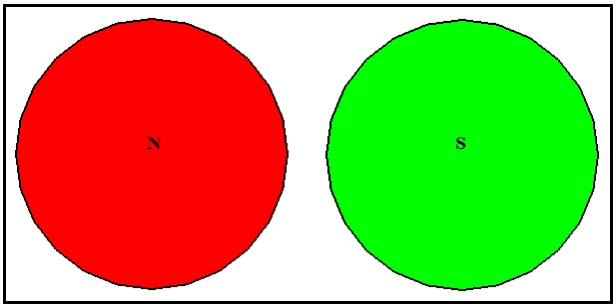



**Figura 49. Vista superior de l'imant dissenyat.**

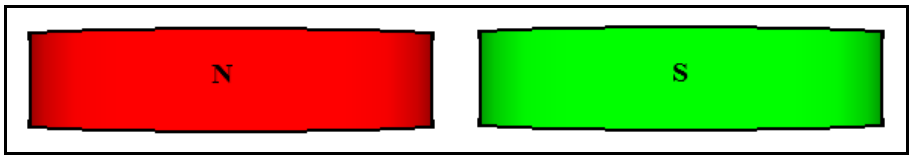



**Figura 50. Vista frontal de l'imant dissenyat.**

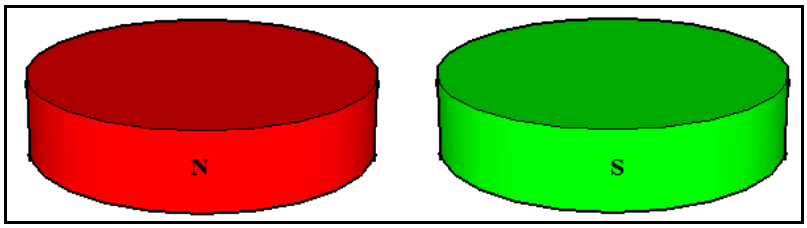



**Figura 51. Vista isomètrica de l'imant dissenyat.**

### *5.5.1.1. Característiques tècniques*

| Característiques tècniques | |
|---|---|
| Forma | Disc |
| Diàmetre | $4{,}5 \cdot 10^{-2}$ m |
| Alçada | $1 \cdot 10^{-2}$ m |
| Tolerància de la longitud | +/- $0{,}1 \cdot 10^{-3}$ m |
| Sentit de la magnetització | Axial (paral·lel a l'altura) |
| Material | NdFeB (Neodimi-Ferro-Bor) |
| Tipus de recobriment | Níquel (Ni-Cu-Ni) |
| Força de subjecció | Aprox. 38 kg aprox. 377 N |
| Pes | $116{,}431 \cdot 10^{-3}$ kg |
| Tipus de fabricació | Sintetitzat |
| Magnetització (Qualitat) | N35 |
| Temperatura màxim d'ús | 80 ºC |
| Temperatura de Curie | 310 ºC |
| Romanència $B_r$ | 11700 – 12100 G 1,17 – 1,21 T |
| Coercitivitat bHc | 10,8 – 11,3 kOe 860 – 899 kA/m |
| Coercitivitat iHc | ≥ 12 kOe ≥ 955 kOe |
| Producte energètic $(BxH)_{màx}$ | 33– 35 MGOe 263 – 279 kJ/m$^3$ |

**Taula 8. Característiques tècniques del disc magnètic S-45-10-N.**

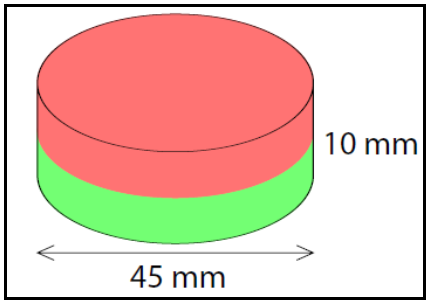



**Figura 52. Dimensions del disc magnètic S-45-10-N.**

### *5.5.1.2. Corba de desmagnetització*

A continuació es pot observar la corba de desmagnetització específica de l'imant escollit.

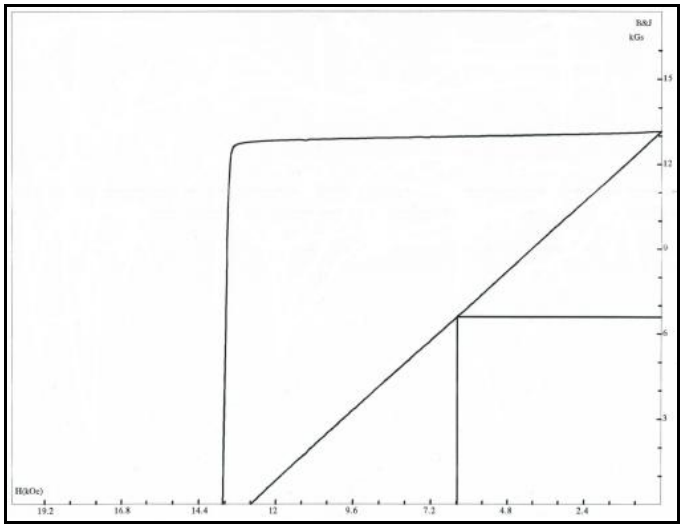



**Figura 53. Corba de desmagnetització del imant.**

### *5.5.1.3. Corba de la força de subjecció*

La figura 54 ens mosta la corba de subjecció que és la força que crea l'imant al subjectar-se (o intentar subjectar-se) a una superfície.

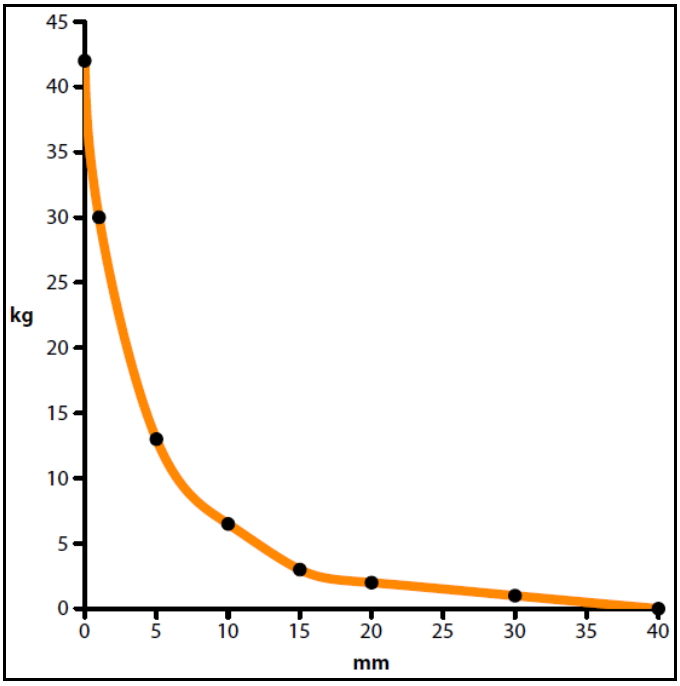



**Figura 54. Corba de la força de subjecció.**

## 5.6. Disseny del generador

Per al disseny del prototip, s'ha ignorat dissenyar un seguit de peces importants per tal de poder assemblar-ho, com són els coixinets, l'eix, cargols, rosques, etc. Aquesta absència és deguda a que el disseny d'aquestes responen a un disseny on entren termes més mecànics. No obstant això, s'ha procurat ajuntar el seguit de peces que formen el generador per tal de mostrar-lo i fer-nos una idea de com quedaria el disseny del generador tot assemblat.

### 5.6.1. Vista de planta dels imants solapant les bobines

En la figura 55 s'observa el conjunt de 10 imants (vermell nord i verd sud) com solapen les 15 bobines (de color coure). Hi ha bobines que no estan representades al dibuix ja que queden completament solapades pels imants.

El conjunt de bobines estan decalades entre elles 24º, mentre que els imants estan decalats 36º.

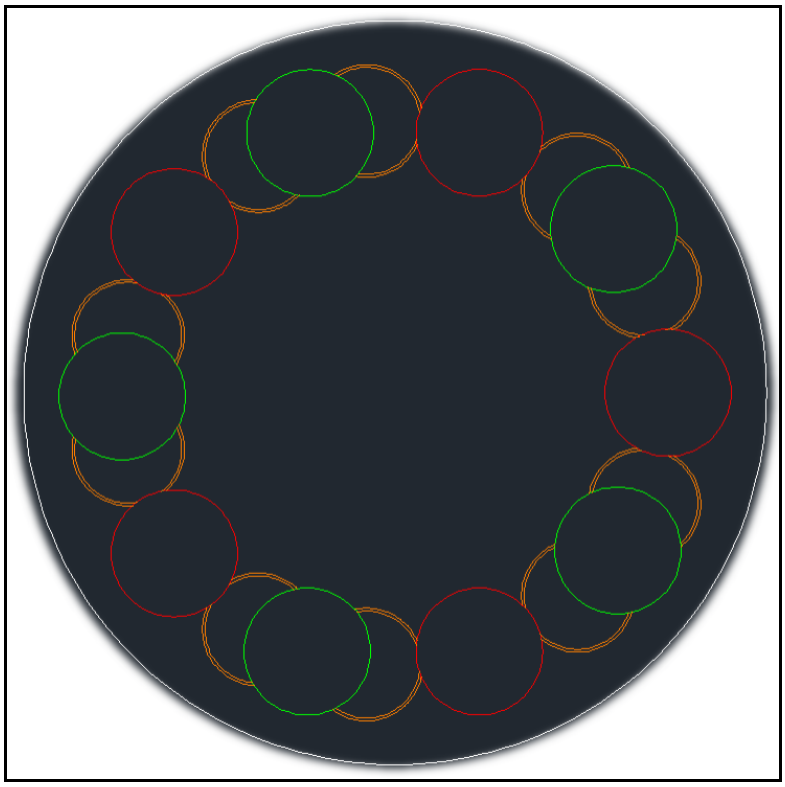


**Figura 55. Vista planta dels imants solapant les bobines.**

### 5.6.2. Rotor amb els imants

S'ha volgut mostrar com quedaria el rotor dissenyat amb els imants fixats en ell sense cap tipus de fixació més que la magnètica, quedant així solidaris al rotor.

S'observa com hi ha un decalatge entre ells i com estan posicionats amb nord (vermell) i sud (verd).

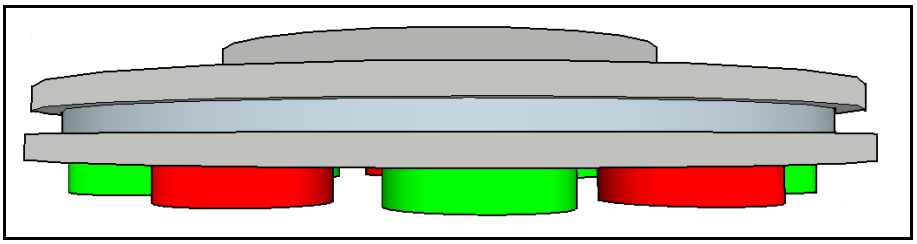


**Figura 56. Vista frontal del rotor amb imants.**

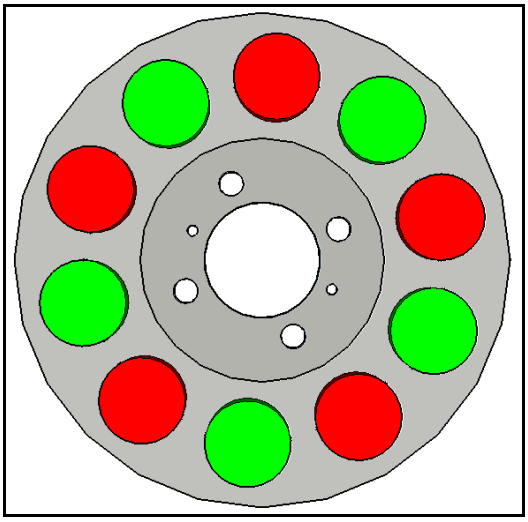


**Figura 57. Vista inferior del rotor amb imants.**

### 5.6.3. Estator amb els debanats

S'ha representat el disseny dels debanats resinats entre ells juntament amb l'estator.

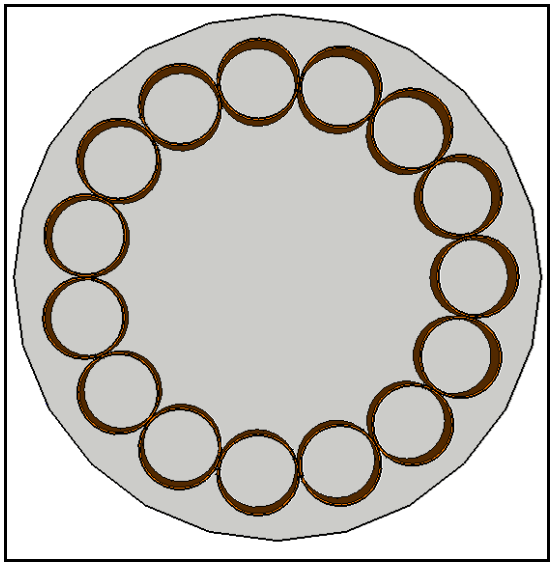


**Figura 58. Vista superior de l'estator amb debanats.**

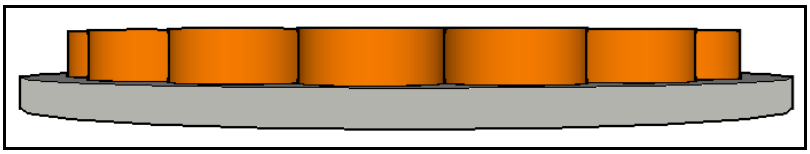


**Figura 59. Vista frontal de l'estator amb debanats.**

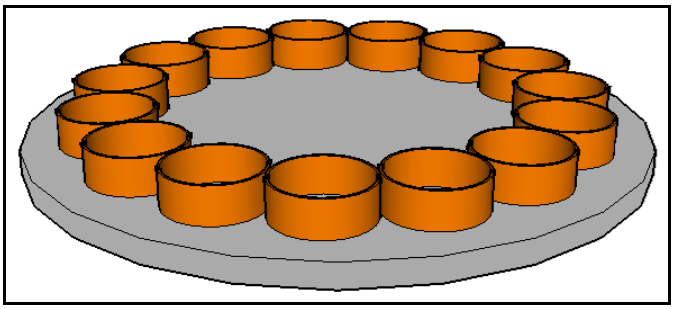


**Figura 60. Vista isomètrica de l'estator amb debanats.**

### 5.6.4. Generador assemblat

En la figura següent s'ha volgut representar com quedaria el conjunt de peces dissenyades totes assemblades. Cal dir que s'ha afegit un eix per tal d'aproximar-ho més a la realitat. Aquest faria la funció de rodament i coixinets, no especificats degut a què seria un tema més de l'àmbit mecànic.

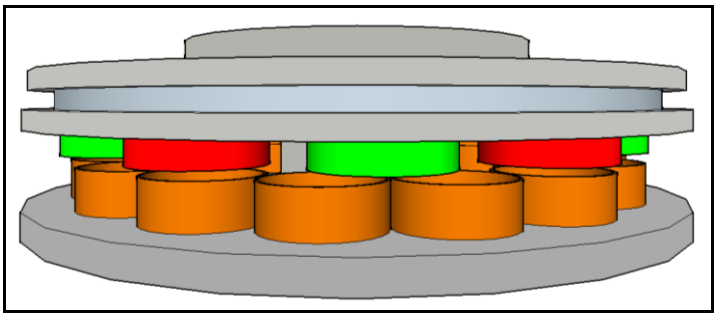


**Figura 61. Vista frontal del generador.**

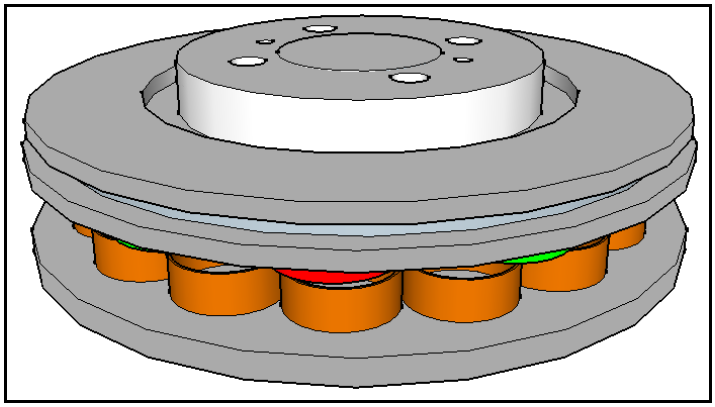


**Figura 62. Vista isomètrica del generador.**

# 6. CONNEXIÓ DEL BOBINAT

## 6.1. Introducció a la connexió del bobinat

En el present apartat es vol donar a conèixer quina és la connexió del bobinat que s'ha optat pel disseny del prototip del generador. En ell són mostrats l'esquema de connexió i els circuits per fase i equivalents que hi ha en l'estator.

## 6.2. Connexió dels debanats

En la figura següent es pot observar la connexió de les bobines reposades en l'estator.

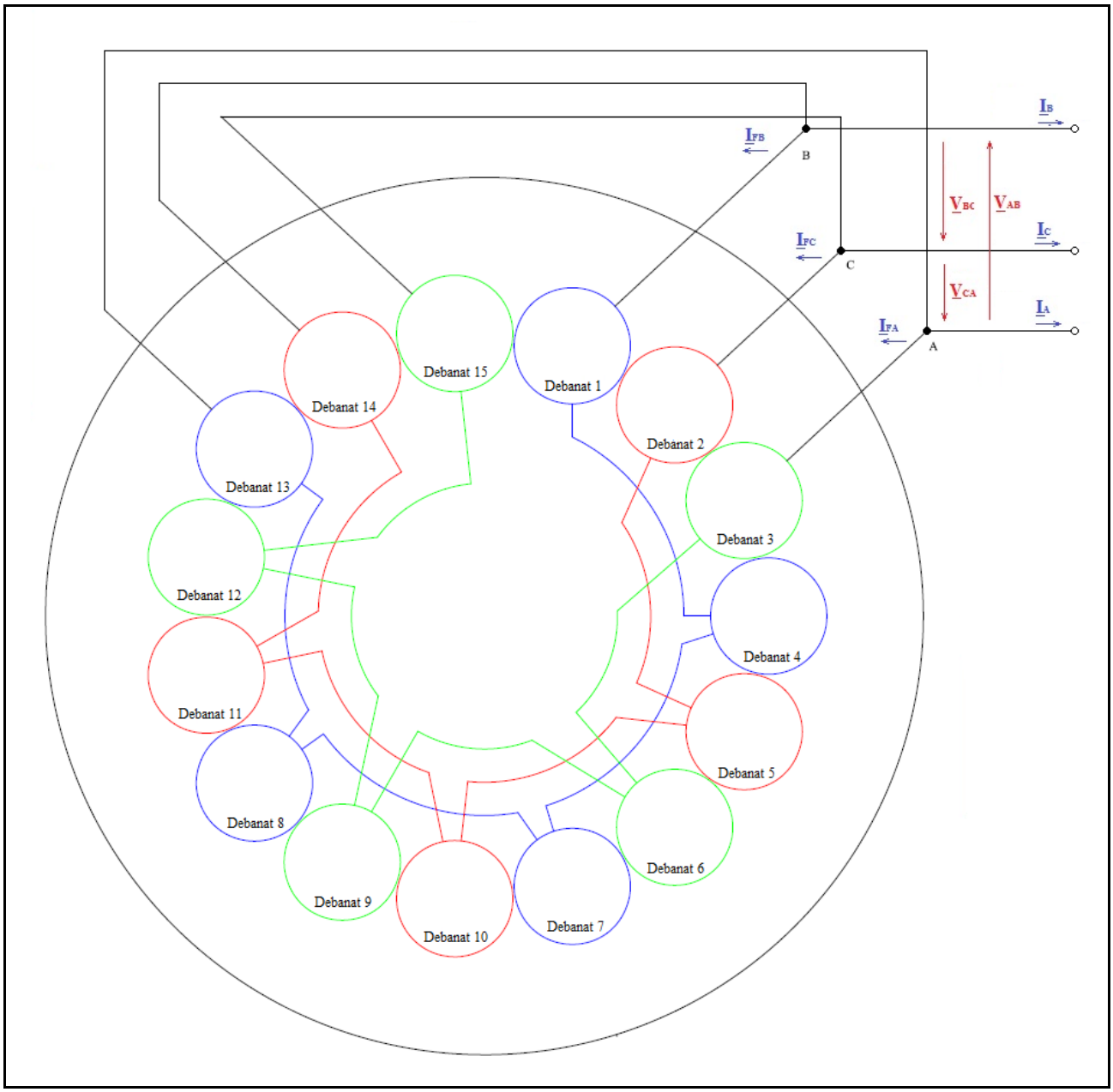



**Figura 63. Connexió dels debanats.**

En les figures següents podem observar la connexió dels debanats connectats en sèrie per fases:

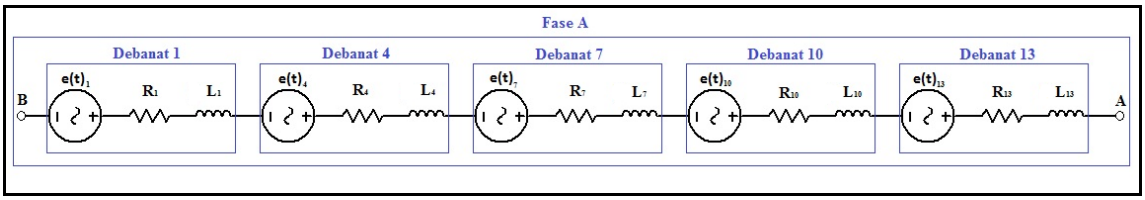



**Figura 64. Circuit de la fase A.**

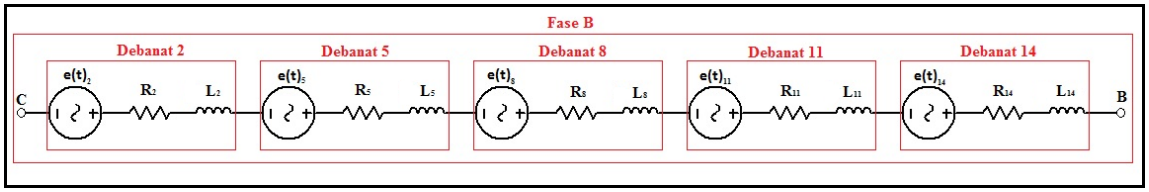



**Figura 65. Circuit de la fase B.**

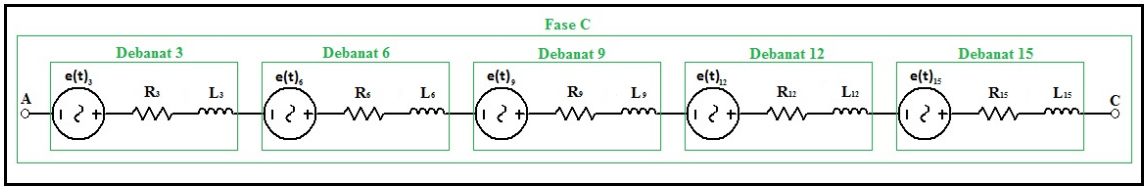



**Figura 66. Circuit de la fase C.**

## 6.3. Circuit equivalent per fase

Normalment, el fet de què les tres fases d'un generador síncron siguin simètriques i equilibrades en tots els aspectes menys en l'angle de fase, comporta la utilització d'un circuit equivalent per fase.

El circuit equivalent de les fases del generador es pot apreciar en les figures següents.

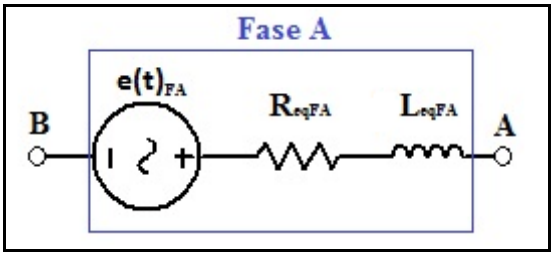



**Figura 67. Circuit equivalent de la fase A.**

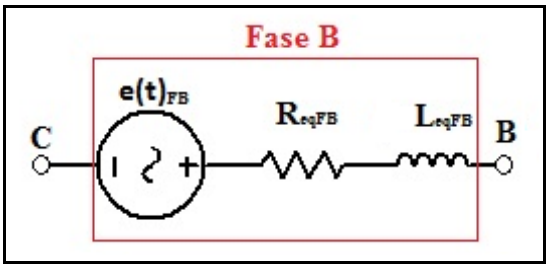



**Figura 68. Circuit equivalent de la fase B.**

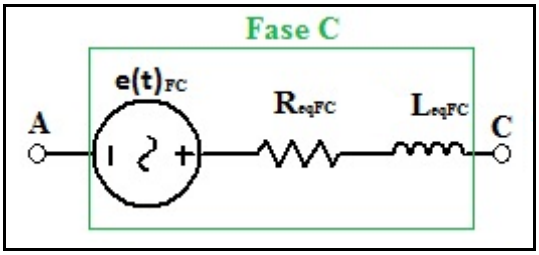



**Figura 69. Circuit equivalent de la fase C.**

## 6.4. Circuit equivalent del generador

En la figura següent es pot observar la connexió del generador en triangle.

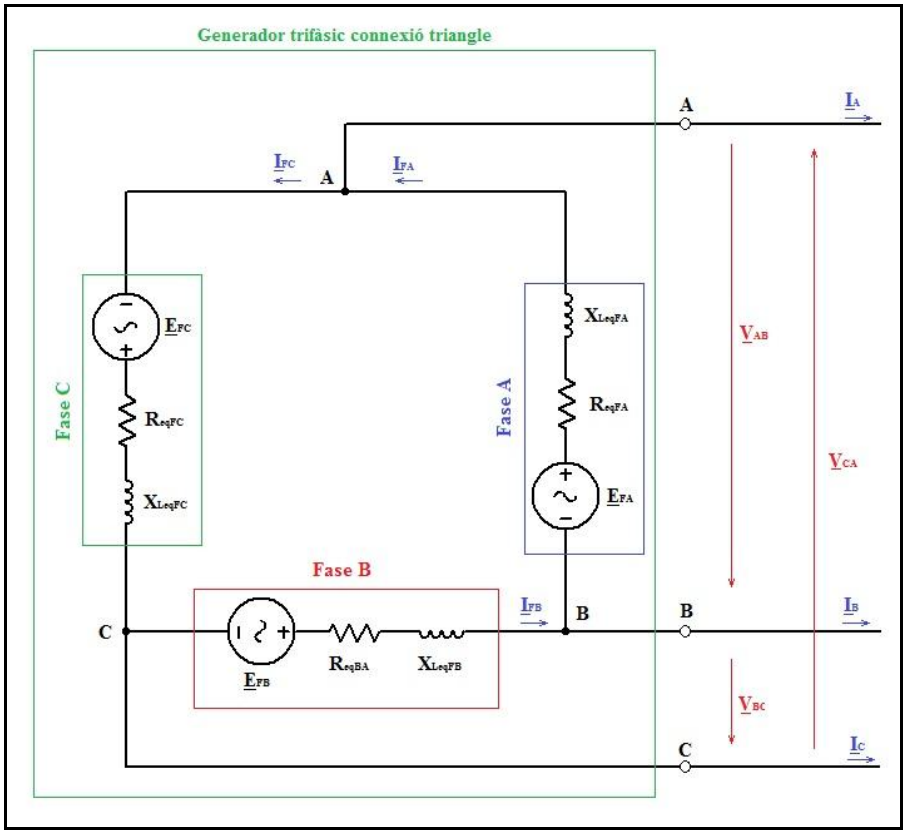



**Figura 70. Circuit equivalent del generador connectat en triangle.**

# 7. CÀLCULS PARAMÈTRICS

## 7.1. Introducció als càlculs paramètrics

En el present apartat es calculen certs paràmetres importants del generador, per tal de poder realitzar les pertinents simulacions i també per obtenir resultats a valorar.

## 7.2. Velocitat de sincronisme

La velocitat de sincronisme és la velocitat a la què gira el camp magnètic rotant. Depèn de la polaritat i de la freqüència de la xarxa de subministrament elèctric.

Per a conèixer la velocitat de sincronisme del prototip de la màquina, caldrà aplicar la fórmula següent:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$$

**Equació 45. Velocitat de sincronisme.**

S'ha procurat, després de diversos estudis, que per motius d'espai i optimitzar el funcionament, el nombre de pols ha de ser de 5. A més, per a què la màquina pugui girar a la velocitat de sincronisme, caldrà que la freqüència sigui de 50 Hz.

Substituint els valors en l'anterior equació s'obté que la velocitat de sincronisme és de 600 rpm.

## 7.3. Decalatge dels imants

Les 600 voltes són realitzades en 1 minut, és a dir, en 60 segons. Per tant, 1 volta la realitzarà en 0,1 segons, que és el mateix que 100 ms.

Si una volta ho realitza en 100 ms, el desplaçament (en graus) caldrà que sigui complert en 20 ms.

Per tant, s'obtindrà el desplaçament a partir de la següent expressió:

$$Desplaçament = \frac{20\,ms \cdot 360^{o}}{100\,ms} = 72^{o}$$

**Equació 46. Desplaçament imants.**

Els 72º són el desplaçament que realitzaran dos imants (imant nord i imant sud) al passar per sobre d'una bobina i completar així un període.

Així doncs, el decalatge entre els dos imants haurà de ser:

$$Decalatge\ entre\ imants = \frac{72^{o}}{2} = 36^{o}$$

**Equació 47. Decalatge entre els imants.**

## 7.4. Decalatge de les bobines

Les bobines hauran d'estar decalades també per a què el generador vagi a la velocitat de sincronisme i pugui haver-hi una connexió trifàsica. Així doncs, podrem conèixer el decalatge adient a partir d'igualar les dues següents equacions:

$$p = \frac{f \cdot 60}{N_s} = \frac{graus\ elèctrics}{graus\ mecànics}$$

**Equació 48. Parell de pols.**

Igualant les dues equacions ens queda:

$$\frac{f \cdot 60}{N_s} = \frac{graus\ elèctrics}{graus\ mecànics}$$

**Equació 49. Igualació de les equacions de parell de pols.**

El decalatge de graus entre fases trifàsiques és de 120º. Per tant, hem d'aïllar el decalatge de graus mecànics:

$$graus\ mecànics = \frac{N_s \cdot graus\ elèctrics}{f \cdot 60}$$

**Equació 50. Graus mecànics.**

I substituint els valors s'obté un resultat de 24 º.

## 7.5. Inducció magnètica

Per a calcular la inducció magnètica en l'imant circular escollit, el fabricant ens facilita la següent fórmula:

$$B = \frac{B_r}{2}\left(\frac{h_i + z}{\sqrt{r_i^2 + (h_i + z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{r_i^2 + z^2}}\right)$$

**Equació 51. Càlcul de la inducció magnètica per un imant cilíndric.**

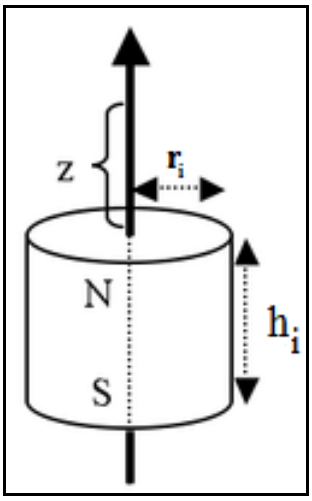



**Figura 71. Paràmetres d'un imant cilíndric pel càlcul de la seva inducció magnètica.**

Havent substituït els valors en l'equació, s'obté que l'imant escollit pel nostre disseny crea una inducció de 0,219 T.

Cal dir que el valor de la inducció que s'ha calculat per l'imant és el que està referit en el seu eix de simetria. És doncs, que el valor de la inducció creat per l'imant que influirà en la bobina no serà el mateix en tota posició de solapament. No obstant això, per la impossibilitat d'obtenir un valor d'inducció a qualsevol punt de l'imant, aquest valor, alhora de realitzar els càlculs, s'ha pres com a constant, independentment de la posició de l'eix de simetria, estigui solapant o no superfície de la bobina.

## 7.6. Impedància del generador

Per a poder calcular la impedància del generador, abans caldrà calcular la inductància de la bobina, així com la seva reactància, i la resistència de la bobina.

### 7.6.1. Inductància de la bobina

Es pot conèixer el valor de la inductància a partir de la fórmula següent, sempre i quant el nucli de la bobina sigui d'aire i només hi hagi una capa.

$$L = \frac{0{,}0359 \cdot N_v^{\ 2} \cdot r_b^{\ 2}}{l_{bobina}}$$

**Equació 52. Inductància.**

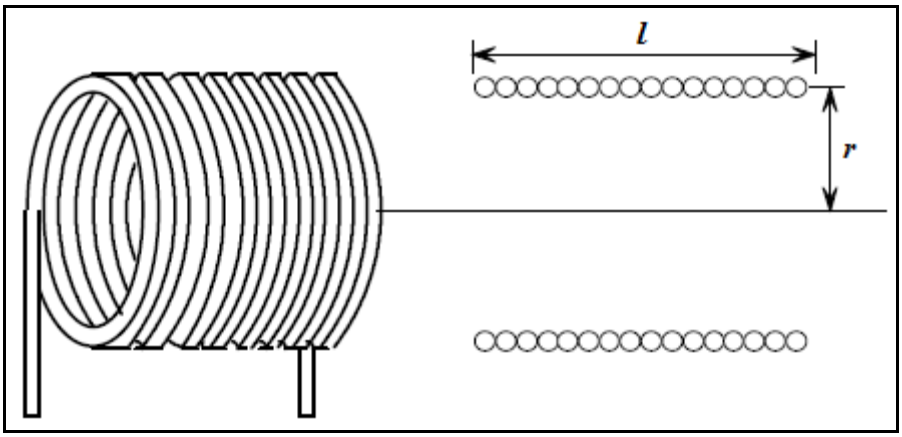



**Figura 72. Esquema d'una inductància d'una sola capa.**

Així doncs, el valor de la inductància és de 1,7 mH.

### 7.6.2. Reactància de la bobina

La bobina ofereix una resistència al pas del corrent, anomenada reactància inductiva. El seu valor dependrà de la pulsació, i el seu resultat serà en Ohm (Ω).

$$X_L = j\omega L$$

**Equació 53. Reactància de la bobina.**

La pulsació dependrà de la freqüència:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

**Equació 54. Pulsació.**

Cal tenir en compte que al connectar els debanats en sèrie tindrà un valor diferent a si es connectessin en derivació.

A l'estar els 5 debanats per fase connectats en sèrie, essent el valor de la inductància de 0,534 H, la reactància equivalent per fase, a una freqüència de 50 Hz, serà de:

$$X_{Leq} = \sum_{i=1}^{i=n} X_{Li}$$

**Equació 55. Reactància equivalent de les bobines.**

Operant les fórmules, s'obté que la reactància del cable és de 2,67 Ω.

### 7.6.3. Resistència de la bobina

El fet de què el material de la bobina sigui de coure, aquest oposa una resistència al pas del corrent. Aquesta resistència s'ha de tenir en compte alhora de conèixer el corrent i la tensió que podrà lliurar el generador.

La resistència del cable es pot calcular a partir de la fórmula següent:

$$R_{cable} = \rho_{cu} \cdot \frac{l}{s \cdot 10^{-6}}$$

**Equació 56. Resistència del cable.**

Al tenir 1,885 m de cable i la secció d'aquest és de 1 $mm^2$, el valor de la resistència és de 0,043 Ω.

Al haver-hi connectades les inductàncies en sèrie caldrà tenir en compte la resistència equivalent que hi haurà. Així doncs, la resistència es podrà calcular a partir de l'equació següent:

$$R_{eq} = \sum_{i=1}^{i=n} R_{cable}$$

**Equació 57. Resistència equivalent.**

A l'haver 5 bobines connectades en sèrie, la resistència equivalent per fase serà de 0,21 Ω.

Degut a què pot haver-hi un escalfament, el valor de la resistència de coure augmenta. Així doncs, caldrà tenir-lo en compte alhora de preveure la resistència a diferent temperatura de 20 ºC.

$$R_T = R_{eqT_o} \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_o))$$

**Equació 58. Resistència conductor elèctric a qualsevol temperatura.**

S'ha procurat donar diferents valor de temperatura per a conèixer la variació de la resistència (equivalent per fase) que adquirirà la màquina. S'ha partit de la temperatura base de 20 ºC i s'ha augmentat de 10 en 10 els graus centígrads fins als 100 ºC.

| Temperatura | Resistència |
|---|---|
| 30 ºC | 0,218 Ω |
| 40 ºC | 0,226 Ω |
| 50 ºC | 0,235 Ω |
| 60 ºC | 0,243 Ω |
| 70 ºC | 0,251 Ω |
| 80 ºC | 0,259 Ω |
| 90 ºC | 0,267 Ω |
| 100 ºC | 0,276 Ω |

**Taula 9. Valors de temperatura i resistències.**

### 7.6.4. Impedància

Per a calcular el mòdul de la impedància estatòrica s'ha emprat la fórmula següent:

$$|z| = \sqrt{R_{eq}^{\ 2} + X_{Leq}^{\ 2}}$$

**Equació 59. Impedància estatòrica.**

Tant mateix, s'ha calculat l'angle de desfasament a través de la fórmula següent:

$$\beta = arctg\left(\frac{X_{Leq}}{R}\right)$$

**Equació 60. Desfasament impedància estatòrica.**

Un cop substituïts els valors a les fórmules anteriors s'ha obtingut una impedància de 2,68 Ω amb un angle de desfasament de 85,52 º.

Cal tenir en compte que al connectar les bobines en sèrie, la impedància variarà.

## 7.7. Pèrdues

No tota la potència mecànica que entra en el generador es converteix en potència elèctrica que surt de la màquina. La diferència entre la potència d'entrada i la potència de sortida presenta les pèrdues de la màquina.

$$p_{totals} = P_{entrada} - P_{sortida}$$

**Equació 61. Pèrdues.**

El flux de l'energia es mostra en la figura següent:

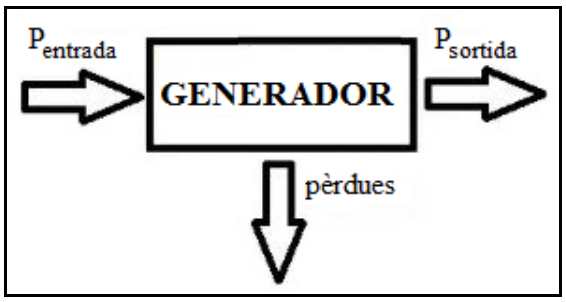



**Figura 73. Esquema de potències i pèrdues en el generador.**

Les pèrdues que ocorren en les màquines de corrent altern es poden diferenciar en quatre:

- Pèrdues al coure o elèctriques.
- Pèrdues elèctriques en el nucli.
- Pèrdues mecàniques.
- Pèrdues disperses o addicionals.

### 7.7.1. Pèrdues per efecte Joule

Les màquines elèctriques estan formades per circuits elèctrics i/o magnètics. Els circuits elèctrics són realitzats per conductors de coure els quals presenten una resistència elèctrica que depèn del material i de la seva secció d'acord a l'expressió següent:

$$R_{cable} = \rho_{cu} \cdot \frac{l}{s \cdot 10^{-6}}$$

**Equació 62. Resistència del cable.**

La densitat de corrent s'incrementa cap a la superfície del conductor, degut a què les línies d'inducció magnètica en l'interior del conductor causen una força electromotriu induïda, la qual fa circular un corrent que s'oposa a la causa que l'origina.

Aquest augment de la resistència depèn de la freqüència de treball, essent el seu augment menyspreable per a freqüències industrials (50Hz).

Al circular corrent pels conductors que conformen els circuits elèctrics de les màquines, sobre la resistència òhmica dels mateixos, es desenvolupa una potència que es converteix en calor per l'efecte Joule. Donat a què aquestes potències no es poden aprofitar, se les considera com a pèrdues en el coure i el seu valor es pot obtenir com:

$$p_{cu} = \sum_{i=1}^{i=n} R_{cable} \cdot i^2$$

**Equació 63. Pèrdues al coure de l'estator per fase.**

Per a conèixer el valor de les pèrdues al coure caldrà substituir els valors en l'anterior equació obtenint unes pèrdues de 1,56 W considerant el màxim valor del corrent i suposant que la temperatura d'operació és de 70 ºC.

### 7.7.2. Pèrdues en el nucli

Les pèrdues magnètiques són degudes als corrents paràsits o de Focault i els d'histèresis.

Tant unes com les altres es troben afectades com a suplement per la concentració auto inductiva del flux i per la distribució irregular de la inducció sobre cada secció plana del circuit magnètic degut a les necessitats constructives de la màquina.

Aquestes venen determinades per les expressions següents:

$$p_F = k_F \cdot f^2 \cdot B_{màx}^2$$

**Equació 64. Pèrdues per Focault.**

$$p_H = k_H \cdot f \cdot B_{màx}^2$$

**Equació 65. Pèrdues per histèresis.**

La suma d'aquestes pèrdues se les coneix com a pèrdues en el ferro o pèrdues en el nucli, essent les mateixes proporcionals a la inducció màxima o també al flux magnètic màxim, per una màquina ja construïda, ja que la freqüència i les dimensions geomètriques estan definides.

Per tant, si la tensió i la freqüència de treball de la màquina en qüestió estan determinades, aquestes pèrdues són constants, no depenen de la potència que estigui lliurant la mateixa.

Per a conèixer el valor de les pèrdues, caldrà saber el pes del nucli. Així doncs, es coneixerà el valor a partir de les expressions següents:

$$p_{FT} = p_F \cdot m_{nucli}$$

**Equació 66. Pèrdues totals per Focault.**

$$p_{HT} = p_H \cdot m_{nucli}$$

**Equació 67. Pèrdues totals per histèresi.**

Cal tenir en compte que en el disseny de la màquina s'ha optat per un nucli buit, és a dir, que no hi ha cap material que faci de nucli i per tant, només hi ha aire. Així doncs, el valor de les pèrdues en el nucli serà pràcticament de 0 W i per tant es consideren negligibles.

### 7.7.3. Pèrdues mecàniques.

Són aquelles pèrdues associades als efectes mecànics. Existeixen dos tipus bàsics de pèrdues mecàniques:

- **Per fregament mecànic:** Són causades per fricció en els coixinets de les màquines.
- **Per fregament amb l'aire:** Es deuen a la fricció entre les parts mòbils de la màquina i l'aire tancat en la carcassa del motor.

$$p_{mec} = k_{mec} \cdot P_{entrada}$$

**Equació 68. Pèrdues mecàniques.**

Al no poder comprovar quines són les pèrdues mecàniques, s'ha fet una estimació al nostre criteri i és per aquest motiu que s'ha utilitzat un coeficient per poder quantificar aquestes. Així doncs, s'ha estimat un rendiment del generador del 85 % i per tant, el valor del coeficient mecànic és del 14 % respecte la potència d'entrada, produint unes pèrdues mecàniques de 30,31 W.

### 7.7.4. Pèrdues addicionals

Són aquelles que no es poden encabir dintre de les categories anteriors. Sense importar amb quina cura es consideren pèrdues, algunes sempre s'escapen de les categories anteriors i per això s'agrupen com a pèrdues disperses o addicionals. En la majoria de les màquines, aquestes pèrdues es prenen convencionalment com l'1 % de la plena càrrega.

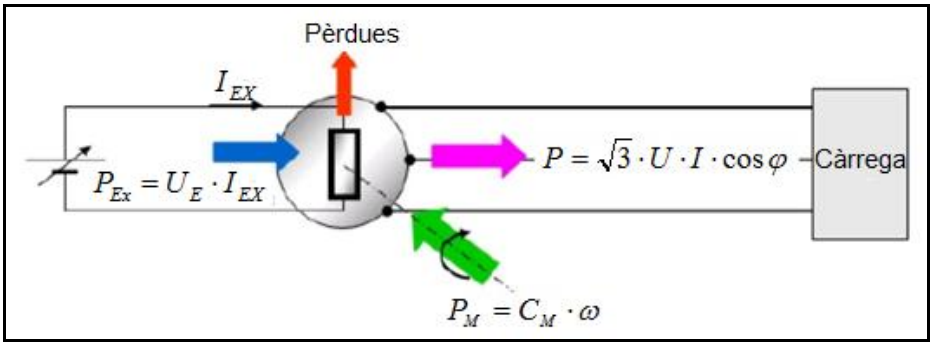
$$p_{add} = P_{entrada} \cdot 1\%$$

**Equació 69. Pèrdues addicionals.**

Al ser la potència que entra de 216,47 W, llavors les pèrdues addicionals són de 2,16 W.

### 7.7.5. Pèrdues totals

Una de les tècniques més convenients de considerar les pèrdues de potència en una màquina és el diagrama de flux de potència:



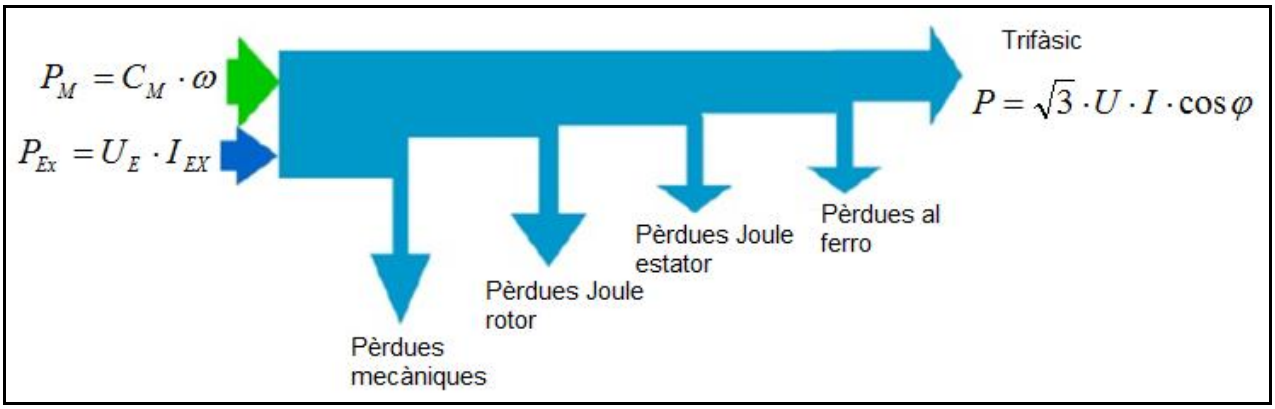



**Figura 74. Diagrama de flux de potència d'un generador trifàsic.**

El conjunt de pèrdues analitzades són les pèrdues totals de la màquina. Així doncs, podem obtenir el valor de les pèrdues totals a partir de l'expressió següent:

$$p_{totals} = p_{cu} + p_{nucli} + p_{mec} + p_{add} \quad \Rightarrow \quad p_{totals} = p_{cu} + (p_{FT} + p_{HT}) + p_{mec} + p_{add}$$

**Equació 70. Pèrdues totals.**

Substituint els valors trobats anteriorment, s'obté que el valor de les pèrdues totals és de 34,03 W.

## 7.8. Potència

El generador síncron és una màquina síncrona que s'utilitza com a generador. Aquest converteix la potència mecànica en potència elèctrica trifàsica.

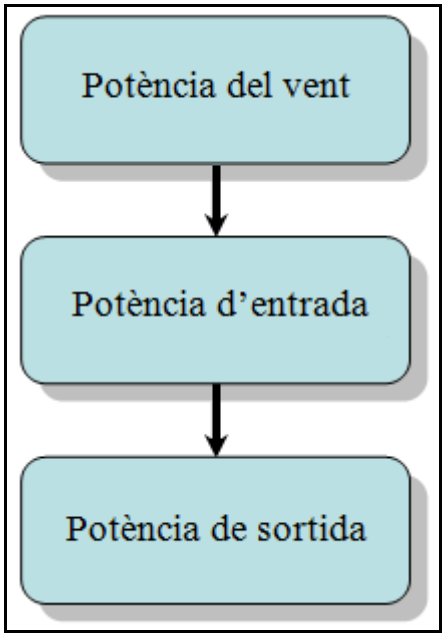



**Figura 75. Mapa conceptual de les potències.**

### 7.8.1. Potencia del vent

Les aspes de la turbina aprofiten el vent per poder generar potència. Cal però, suposar un radi de pala de la turbina ja que podrem conèixer el valor de l'àrea d'escombrada. A més, en el present apartat, es suposarà una velocitat de vent determinada per a conèixer el valor de la potència del vent.

Aquesta potència es pot calcular a partir de l' equació següent:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot \pi \cdot r^2$$

**Equació 71. Potència del vent.**

La potència del vent, si el radi de la pala és de 1,5 m i suposant una velocitat del vent de 5 m/s, la potència del vent és de 541,20 W.

### 7.8.2. Potencia d'entrada del generador

La potència d'entrada, anomenada també en el present projecte potència de la turbina, que genera la turbina és la potència del vent, que depèn del coeficient de potència d'aquesta. Per a fer un càlcul aproximat hipotètic, s'ha optat per donar un valor de rendiment de la turbina de 40 %, ja la majoria solen estar entre un 35 i un 45 %.

Així doncs, el valor de la potència de la turbina és de:

$$P_{entrada} = P_{vent} \cdot c_p$$

**Equació 72. Potència de la turbina.**

La potència d'entrada del generador, suposant que un coeficient de rendiment de la turbina de 0,4 és de 216,47 W.

### 7.8.3. Potència de sortida del generador

La potència de sortida del generador és la potència d'entrada del generador menys les pèrdues ocasionades en ell. Així doncs, es pot calcular el seu valor a partir de l'equació següent:

$$P_{sortida} = P_{entrada} - p_{totals}$$

**Equació 73. Potència de sortida del generador.**

Així doncs, la potència de sortida és de 182,44 W.

## 7.9. Rendiment

En el present apartat, es pretén calcular el rendiment del generador. Els generadors de corrent altern agafen potència mecànica per produir potència elèctrica, mentre que els motors de corrent altern prenen potència elèctrica i produeixen potència mecànica. En tot cas, no tota la potència que entra a la màquina es transforma en potència útil en l'altre extrem ja que en tot procés s'originen pèrdues.

L'eficiència d'una màquina de corrent altern ve donada per la diferència entre la potència d'entrada i la potència de sortida d'una màquina són les pèrdues que es presenten dins d'ella. Per tant:

$$\eta = \frac{P_{sortida}}{P_{entrada}} \cdot 100\,(\%) \quad \Rightarrow \quad \eta = \frac{p_{sortida}}{P_{entrada} - pèrdues} \cdot 100\,(\%)$$

**Equació 74. Eficiència de la màquina de corrent altern.**

Així doncs, si la potència d'entrada és de 216,47 W i la potència de sortida és de 182,44 W (o el conjunt de pèrdues són de 34,03 W), el rendiment obtingut del generador és de 85 %.

## 7.10. Analogia elèctrica del circuit magnètic

Els elements del circuit magnètic poden ser representats per analogia amb un circuit elèctric. A partir de l'equació:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

**Equació 75. Inducció magnètica.**

Deduïm que:

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r}$$

**Equació 76. Intensitat de camp magnètic.**

I per tant:

$$H \cdot l = \phi \cdot \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot s}$$

**Equació 77. Força magnetomotriu.**

Cal saber que $H \cdot l$ equival a la força magnetomotriu (f.m.m.) expressada en Ampers-volta (Av).

L'equació anterior és anàloga a la del circuit elèctric sent:

$$cdt = I \cdot R$$

**Equació 78. Caiguda de tensió.**

En el circuit magnètic s'expressa així:

$$f.m.m. = \phi \cdot \Re$$

**Equació 79. Força magnetomotriu.**

Finalment s'obté que la reluctància ve expressada per l'equació següent:

$$\Re = \frac{l}{\mu \cdot s}$$

**Equació 80. Reluctància.**

Aquesta reluctància manté la mateixa relació amb la longitud i la secció del circuit magnètic, que la resistència elèctrica amb la longitud i la secció del conductor. El valor de la reluctància són $Av/Wb$.

Per a una major aproximació s'ha considerat varies reluctàncies en paral·lel dels diferents circuits de dispersió, sent cadascuna d'elles la corresponent a un circuit que, sense travessar l'entreferro, anés d'un pol a un altre abastant només una porció de les forces magnetomotrius (f.m.m.) polars.

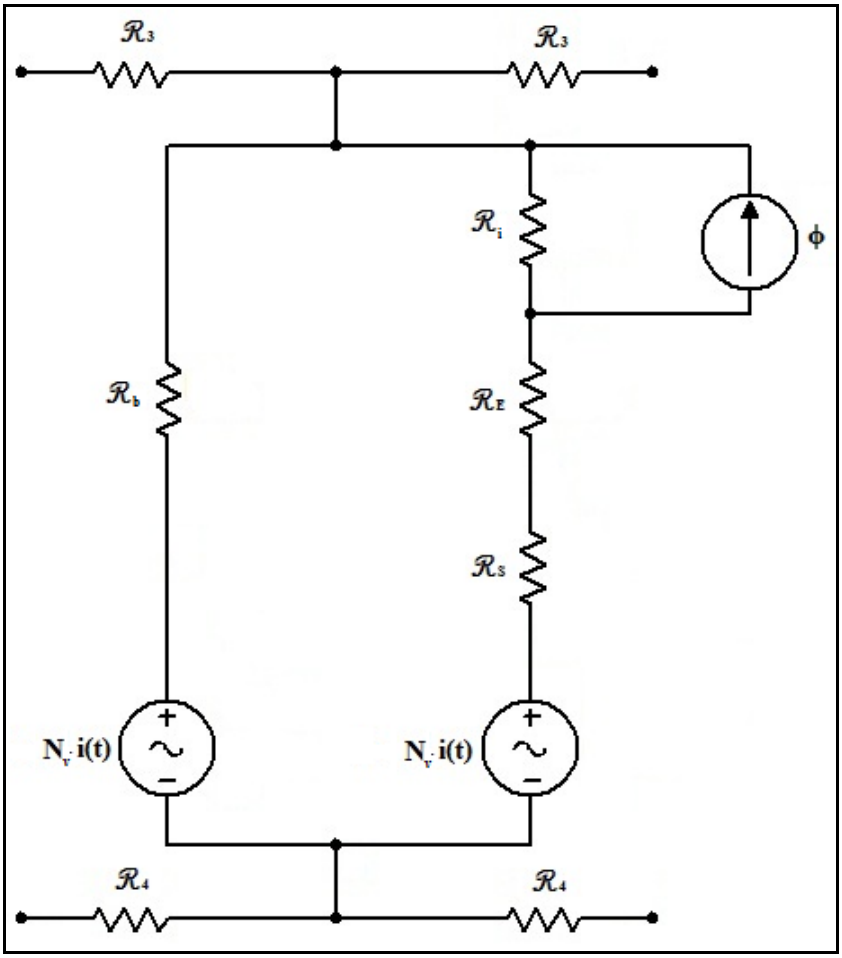



**Figura 76. Circuit magnètic de la bobina sobreposada per un imant.**

### 7.10.1. Paràmetres del circuit magnètic

En el present apartat es vol explicar els paràmetres que formen el circuit magnètic. Tots els paràmetres són variables en el temps i per tant, també dependran de la posició del rotor, excepte el valor de la inducció de l'imant, considerada constat, que com s'ha explicat és considera constant.

#### *7.10.1.1. Força magnetomotriu*

La força magnetomotriu és aquella capaç de produir un flux magnètic entre dos punts d'un circuit magnètic. En el nostre circuit magnètic podem distingir dos fonts de força magnetomotriu, però d'igual valor. Aquesta es calcularà a partir de la següent equació:

$$f.m.m. = N_v \cdot i(\theta)$$

**Equació 81. Força magnetomotriu.**

#### *7.10.1.2. Flux magnètic*

El flux és l'ocasiona't per la inducció de l'imant, depenent de la posició del rotor, aquest variarà. Es pot observar la variació del seu valor en l'apartat 9.2.3.

#### *7.10.1.3. Reluctàncies*

En el circuit magnètic del prototip del generador hem destacat varies reluctàncies, cada una d'elles de valor variable respecte la posició del rotor, és a dir, variable respecte l'angle θ.

Per calcular la reluctància cal conèixer la permeabilitat magnètica del material (o de l'aire). En taula 10, tenim exposats els valors de les permeabilitats.

Per a conèixer el valor de la permeabilitat magnètica, cal emprar la fórmula següent:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

**Equació 82. Permeabilitat magnètica.**

| **Permeabilitats** | | |
|---|---|---|
| MATERIAL | PERMEABILITAT RELATIVA (H/m) | PERMEABILITAT MAGNÈTICA (H/m) |
| Aire | 1 | $1{,}26 \cdot 10^{-6}$ |
| Coure | 0,99999991 | $1{,}26 \cdot 10^{-6}$ |
| Ferro (99,8 %) | 5000 | $6{,}28 \cdot 10^{-3}$ |
| Neodimi | $8{,}25 \cdot 10^{-5}$ | 1,05 |

**Taula 10. Permeabilitats**

### 7.10.1.3.1. RELUCTÀNCIA DE L'IMANT

L'imant presenta una reluctància, al mateix temps que presenta un flux. Cal doncs, poder conèixer el valor que tindrà en funció de l'angle θ.

La permeabilitat que s'ha adoptat per l'imant és la del neodimi, material majoritari de l'imant.

$$\Re_i = \frac{h_i}{\mu_{Nd} \cdot A_{\text{intersecció un imant}}(\theta)}$$

**Equació 83. Reluctància de l'imant.**

El valor de la reluctància és variable, i es pot observar la seva variació en la figura següent:

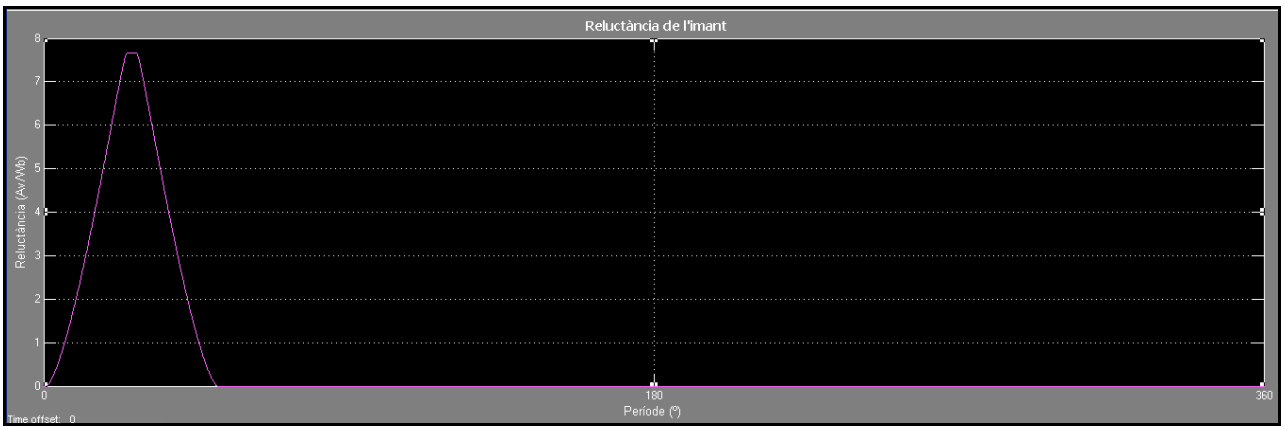



**Figura 77. Reluctància de l'imant.**

### 7.10.1.3.2. RELUCTÀNCIA DE L'ENTREFERRO

Aquesta reluctància és la que apareix en l'espai que hi ha entre el rotor i l'estator. Més concretament el que hi ha entre els imants, solidaris al rotor i els debanats, solidaris a l'estator. Ha calgut considerar aquesta reluctància ja que hi ha un pas de flux, en aquest cas, influenciat pel què crea l'imant.

La permeabilitat que hi ha en l'entreferro és la de l'aire.

$$\Re_E = \frac{h_E}{\mu_{aire} \cdot A_{\text{intersecció un imant}}(\theta)}$$

**Equació 84. Reluctància de l'entreferro.**

A l'igual que la reluctància de l'imant, aquesta variarà també amb la posició. Així doncs, s'obté una gràfica amb valors de la reluctància en funció del període.

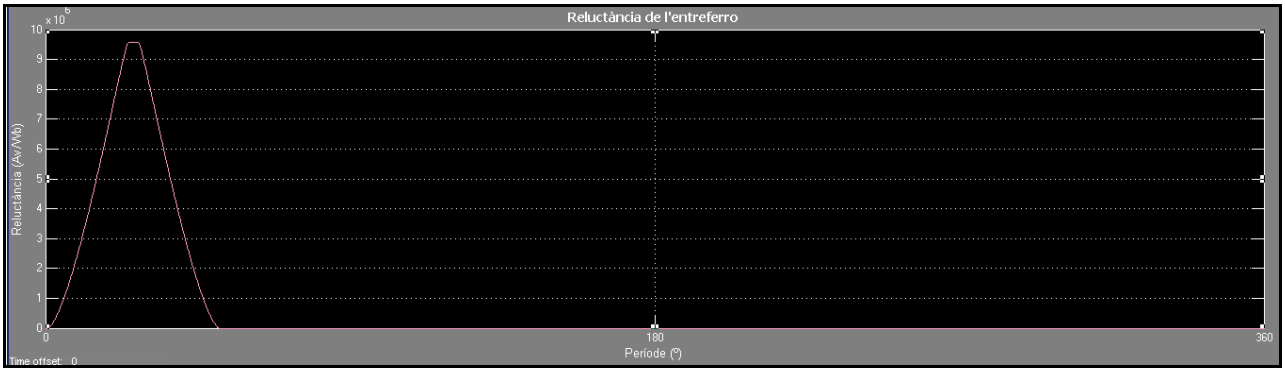



**Figura 78. Reluctància en l'entreferro.**

7.10.1.3.3. RELUCTÀNCIA DE LA BOBINA SOLAPADA PER UN IMANT

Aquesta reluctància és la que fa referència a la part de la bobina que està essent sobreposada per l'imant en el pas de translació d'aquest quan és desplaçat solidàriament amb el rotor. Aquesta reluctància és funció de l'angle θ, i per tant, aquesta variarà de valor si l'imant sobreposa més o menys la bobina.

La permeabilitat que s'ha considerat adient pel càlcul de la reluctància és la del coure, material del qual està construït el debanat.

$$\Re_S = \frac{h_{bs}}{\mu_{cu} \cdot A_{\text{intersecció un imant}}(\theta)}$$

**Equació 85. Reluctància de la bobina sobreposada per l'imant.**

El pas de l'imant ens varia el valor de la reluctància. En la figura següent s'observa aquest valor.

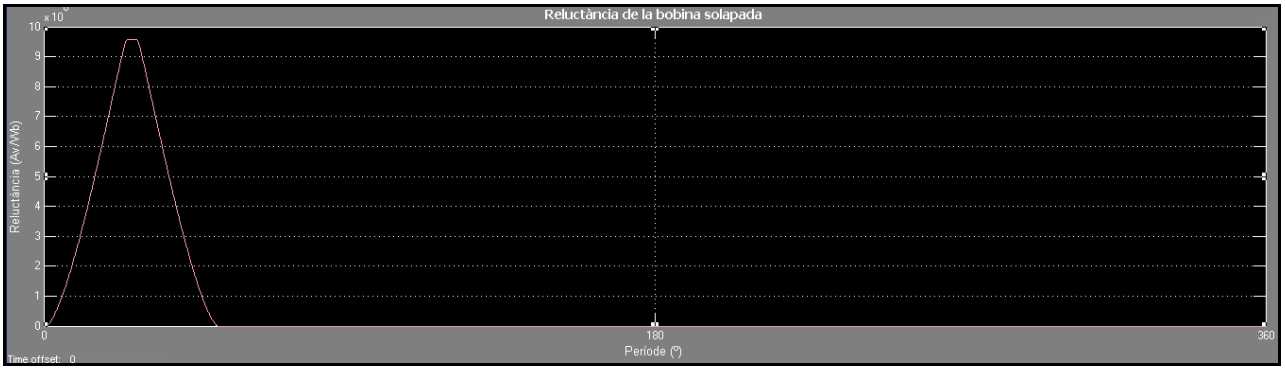



**Figura 79. Reluctància de la bobina sobreposada per l'imant.**

#### 7.10.1.3.4. RELUCTÀNCIA DE LA BOBINA NO SOLAPADA

La reluctància que es planteja en el present apartat és la que apareix quan hi ha una part de la bobina no sobreposada per l'imant. Aquesta depèn de la superfície d'intersecció que l'imant sobreposa la resta de bobina. La permeabilitat considerada serà la del coure, ja que el material del debanat és coure esmaltat.

$$\Re_B = \frac{h_b}{\mu_{cu} \cdot \left(s_b - A_{\text{intersecció un imant}}(\theta)\right)}$$

**Equació 86. Reluctància de la bobina no sobreposada per l'imant.**

La reluctància de la bobina no sobreposada per l'imant també és variable, ja que depenent de si l'imant abraça superfície o no de la bobina, tindrà un valor o un altre.

#### 7.10.1.3.5. RELUCTÀNCIA DEL ROTOR

S'ha considerat la reluctància al rotor pel fet de què hi ha una circulació de flux.

Al ser el rotor de ferro, s'ha considerat que la permeabilitat serà la del ferro al 99,8 %, suposant que el rotor és de ferro quasi pur i no està format per cap aliatge.

$$\Re_3 = \frac{h_r}{\mu_{Fe} \cdot s_3}$$

**Equació 87. Reluctància del rotor.**

La reluctància del rotor pren per valor 0,000455 Av/Wb.

#### 7.10.1.3.6. RELUCTÀNCIA DE L'ESTATOR

La reluctància de l'estator és considerada pel fet de què hi ha una circulació de flux procedent dels debanats.

Al no disposar d'un estator físicament, ha calgut realitzar un disseny, i per tant, s'ha considerat la possibilitat de què sigui xapa magnètica. No obstant això, es considerarà el mateix valor de permeabilitat que la reluctància del rotor, és a dir, el valor de la permeabilitat suposant que el material és ferro amb una puresa del 99,8 %.

$$\Re_4 = \frac{h_e}{\mu_{Fe} \cdot s_4}$$

**Equació 88. Reluctància de l'estator.**

La reluctància de l'estator pren per valor 0,00132 Av/Wb.

# 8. EQUACIONS DE LA MÀQUINA DISSENYADA

## 8.1. Introducció a les equacions de la màquina

És de gran importància conèixer com està regit el funcionament de la màquina, així com els paràmetres influeixen alhora de voler obtenir energia elèctrica.

En el present apartat es detallaran el seguit d'equacions que ens permeten conèixer l'àrea d'abraçada per tal de conèixer quin és el valor del flux i quines són les equacions per l'obtenció de la tensió o del corrent.

## 8.2. Àrees d'intersecció

En el present apartat es vol explicar el càlcul de l'àrea d'abraçada que crea un imant sobreposant una bobina.

### 8.2.1. Àrea d'intersecció d'un imant solapant una bobina

Per a calcular el flux generat, primer caldrà saber la superfície de la bobina que cobreix l'imant en el seu pas alhora que gira el rotor. Així doncs, es pot conèixer aquesta àrea d'intersecció que crea un imant al sobrepassar per un debanat a partir d'un seguit d'equacions mostrades a continuació.

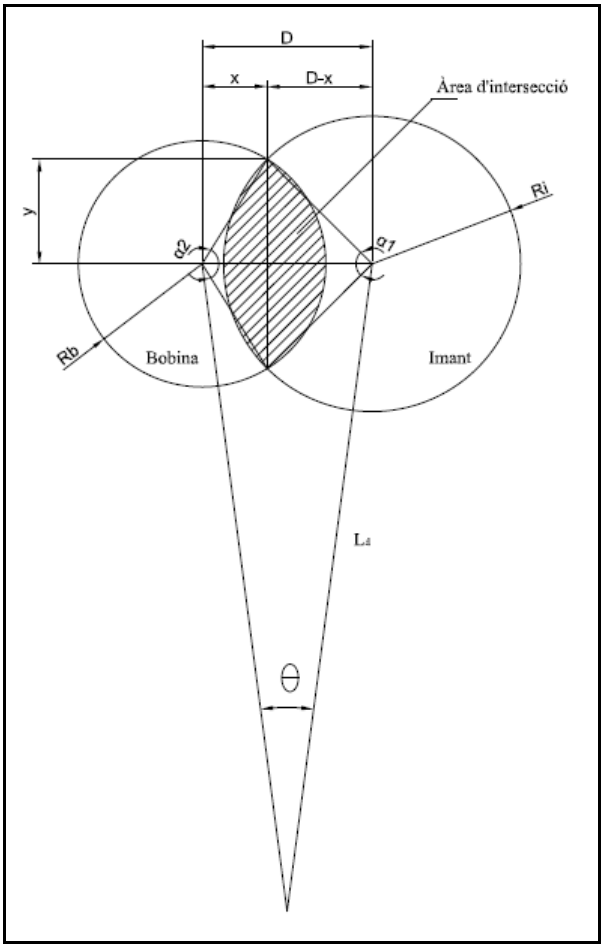



**Figura 80. Àrea d'intersecció entre un imant i una bobina.**

Primer de tot caldrà deixar l'equació en funció de l'angle cita ( $\theta$ ), ja que és l'angle el que varia inicialment. L'angle cita ( $\theta$ ) variarà en funció del gir del rotor.

$$D(\theta) = 2 \cdot L \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

**Equació 89. Distància entre dos radis.**

Tot seguit es deixa l'equació següent en funció de la distància entre radis ( $D$ ).

$$x(\theta) = \frac{D^2(\theta) - R_i^2 + R_b^2}{2 \cdot D(\theta)}$$

**Equació 90. Càlcul de la incògnita x(θ).**

Al tenir aïllada en l'equació anterior la distància de la longitud del centre de la bobina al punt d'intersecció que forma l'imant amb la bobina ( $x$ ), s'aïlla la distància de l'alçada del centre de la bobina al punt d'intersecció que forma l'imant amb la bobina ( $y$ ).

$$y(\theta) = \pm\sqrt{R_b^2 - x^2(\theta)}$$

**Equació 91. Càlcul de la incògnita y(θ).**

Així doncs, es pot obtenir l'angle que forma el sector amb els punts d'intersecció amb el centre de l'imant i també es pot obtenir l'angle que forma el sector amb els punts d'intersecció amb el centre de la bobina.

$$\alpha_i(\theta) = 2 \cdot \cos^{-1}\left(\frac{(D(\theta) - x(\theta))}{R_i}\right)$$

**Equació 92. Càlcul de la incògnita $\alpha_i(\theta)$.**

Per a obtenir el valor de la incògnita $\alpha_b(\theta)$ cal abans conèixer en quin rang es troba $x(\theta)$. Posteriorment s'aplicarà una de les equacions següents:

Si $x(\theta) > 0$:

$$\alpha_b(\theta) = 2 \cdot \cos^{-1}\left(\frac{x(\theta)}{R_b}\right)$$

**Equació 93. Càlcul de la incògnita $\alpha_b(\theta)$ si x(θ) > 0.**

Si $x(\theta) < 0$:

$$\alpha_b(\theta) = 2 \cdot \pi - 2 \cdot \cos^{-1}\left(\frac{x(\theta)}{R_b}\right)$$

**Equació 94. Càlcul de la incògnita $\alpha_b(\theta)$ si $x(\theta) < 0$.**

L'expressió següent permet trobar l'àrea d'intersecció que forma l'imant amb una capa.

$$A_{\text{intersecció_capa}}(\theta) = \pi \cdot R_i^{\,2} \cdot \frac{\alpha_i(\theta)}{2 \cdot \pi} + \pi \cdot R_b^{\,2} \cdot \frac{\alpha_b(\theta)}{2 \cdot \pi} - y(\theta) \cdot [D(\theta) - x(\theta)] - y(\theta) \cdot x(\theta)$$

**Equació 95. Càlcul de l'àrea d'intersecció d'una capa.**

L'àrea d'intersecció que forma l'imant amb la bobina es calcula a partir de l'expressió següent. Cal tenir en compte que primer de tot cal sumar totes les àrees d'una mateixa capa en funció del nombre de voltes que contingui aquesta. Un cop realitzat el sumatori, cal realitzar un altre sumatori en funció del nombre total de capes.

$$A_{\text{intersecció un imant}}(\theta) = \sum_{j=1}^{j=m} \sum_{i=1}^{i=n} A_{\text{intersecció_capa}}(\theta)$$

**Equació 96. Càlcul de l'àrea d'intersecció de vàries capes.**

### 8.2.2. Àrea d'intersecció de dos imants solapant una bobina.

Com que hi ha 10 imants i 15 bobines no en tot moment les bobines estaran sobreposades pels imants, i per tant, i haurà posicions en què les bobines estaran sense sobreposar. Així doncs, caldrà conèixer l'àrea que en una certa posició, en funció de l'angle θ, estarà sobreposada per imants.

Els imants, posicionats sobre el rotor, per tal de què puguin crear una ona sinusoïdal, estan posicionats consecutivament, però polaritzats inversament. És a dir, que a darrere d'un nord hi haurà un imant sud. És per això que ha en l'equació següent cal diferenciar la polaritat dels imants, tot i que per calcular l'àrea d'aquests (sigui nord o sud), es calcularan de la mateixa manera com s'ha especificat en l'apartat anterior.

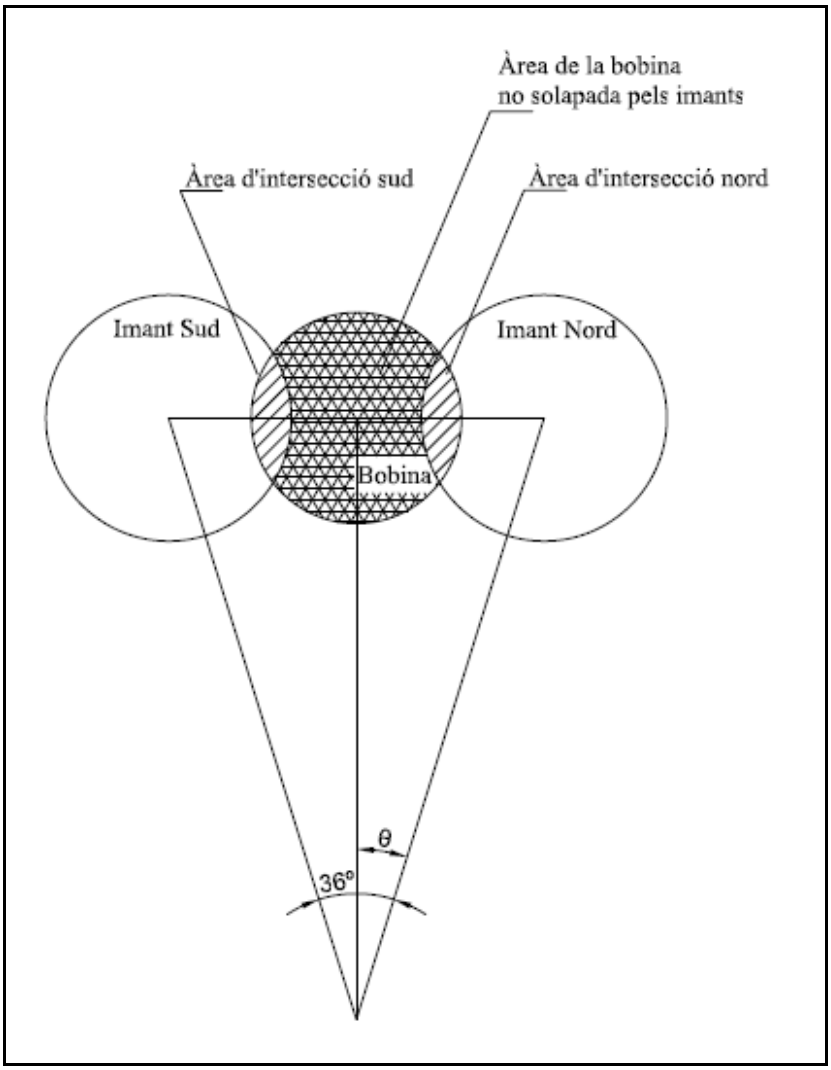



**Figura 81. Àrea d'intersecció de dos imants solapant una bobina.**

Així doncs, es pot calcular a partir de l'equació següent:

$$A_{\text{intersecció total}}(\theta) = A_{\text{intersecció Nord}}(\theta) + A_{\text{intersecció Sud}}(\theta + 36)$$

**Equació 97. Àrea d'intersecció del solapament de dos imants sobre una bobina.**

També és convenient conèixer la superfície que no estarà solapada pels imants, és a dir, la que hi haurà entre la separació entre imant i imant.

L'equació següent ens permet saber aquesta àrea:

$$A_{\text{no solapament}}(\theta) = s_b - A_{\text{intersecció total}}(\theta)$$

**Equació 98. Àrea d'intersecció de no solapament de dos imants sobre una bobina.**

## 8.3. Flux generat

Per a calcular el flux generat en la màquina dissenyada s'ha considerat per tal de simplificar molts càlculs que la inducció calculada de l'imant és constant independentment del lloc on es trobi. Aquest flux variarà d'acord amb la posició del rotor.

$$\phi = B \cdot A_{\text{intersecció un imantl}}(\theta)$$

**Equació 99. Flux generat.**

## 8.4. Intensitat

La intensitat es pot obtenir a partir del flux magnètic. Cal però conèixer també el coeficient d'autoinducció que produeix la bobina. La fórmula següent ens permet obtenir el valor de la intensitat, en aquest cas, variable i influenciada per l'angle θ.

$$i(\theta) = \frac{\phi(\theta)}{L}$$

**Equació 100. Intensitat a partir del flux.**

No obstant això, aquesta fórmula només ens permet conèixer el valor que hi ha si fos la bobina d'una capa. Però al haver-hi més d'una, caldrà multiplicar el valor del flux pel nombre de voltes. Així doncs, l'equació final per a obtenir el valor de la intensitat a partir del flux és la següent.

$$i(\theta) = \frac{\phi(\theta)}{L} \cdot N_v$$

**Equació 101. Intensitat a partir del flux tenint en compte el nombre de voltes.**

## 8.5. Força electromotriu generada

Es pot calcular la f.e.m. derivant el flux que s'obté, respecte de l'angle θ.

$$e(\theta) = \frac{d\phi}{d\theta}$$

**Equació 102. Força electromotriu.**

En el nostre cas, per a conèixer el valor de la tensió generada, hem derivat el flux generat respecte l'angle que forma el centre de l'imant amb el centre de la bobina.

Són les equacions següents les que ens permeten conèixer el valor de la tensió respecte de l'angle. Aquestes també depenen del rang de $x(\theta)$ i segons el valor que tingui, s'aplicarà una o altra.

Si $x(\theta) < 0$:

$$e(\theta) = \frac{\frac{1}{2} \cdot B \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \left( -8 \cdot R_b^2 \cdot L^2 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)^2 + 16 \cdot L^4 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)^4 - 8 \cdot L^2 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)^2 \cdot R_i^2 + R_i^4 - 2 \cdot R_i^2 \cdot R_b^2 + R_b^4 \right)}{\sqrt{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \left( 8 \cdot R_b^2 \cdot L^2 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)^2 - 16 \cdot L^4 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)^4 + 8 \cdot L^2 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)^2 \cdot R_i^2 - R_i^4 + 2 \cdot R_i^2 \cdot R_b^2 - R_b^4 \right)}}$$

**Equació 103. Derivada del flux respecte l'angle θ si x(θ) > 0.**

Si $x(\theta) > 0$:

$$e(\theta) = \frac{\frac{1}{2} \cdot B \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \left( -8 \cdot L^2 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)^2 \cdot R1^2 + R1^4 - R2^4 + 16 \cdot L^4 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)^4 \right)}{\sqrt{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \left( 8 \cdot R2^2 \cdot L^2 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)^2 - 16 \cdot L^4 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)^4 + 8 \cdot L^2 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)^2 \cdot R1^2 - R1^4 + 2 \cdot R1^2 \cdot R2^2 - R2^4 \right)}}$$

**Equació 104. Derivada del flux respecte l'angle θ si x(θ) < 0.**

# 9. RESULTATS OBTINGUTS DE LES EQUACIONS

## 9.1. Introducció als resultats obtinguts

En el present apartat es donen a conèixer els resultats obtinguts en la simulació respecte les equacions, essent mostrades les gràfiques i comentades. Es mostraran els següents resultats:

- Àrea d'intersecció.
- Flux generat en la primera volta de bobina.
- Flux generat en la bobina.
- Corrent en una bobina.
- Corrent produït pels 10 imants sobre una bobina.
- Corrents de les tres fases.

## 9.2. Resultats obtinguts en la simulació

### 9.2.1. Àrea d'intersecció

En la figura següent es pot observar l'àrea d'intersecció que és causada per un imant nord i un imant sud en una bobina quan el rotor dóna una volta sencera.

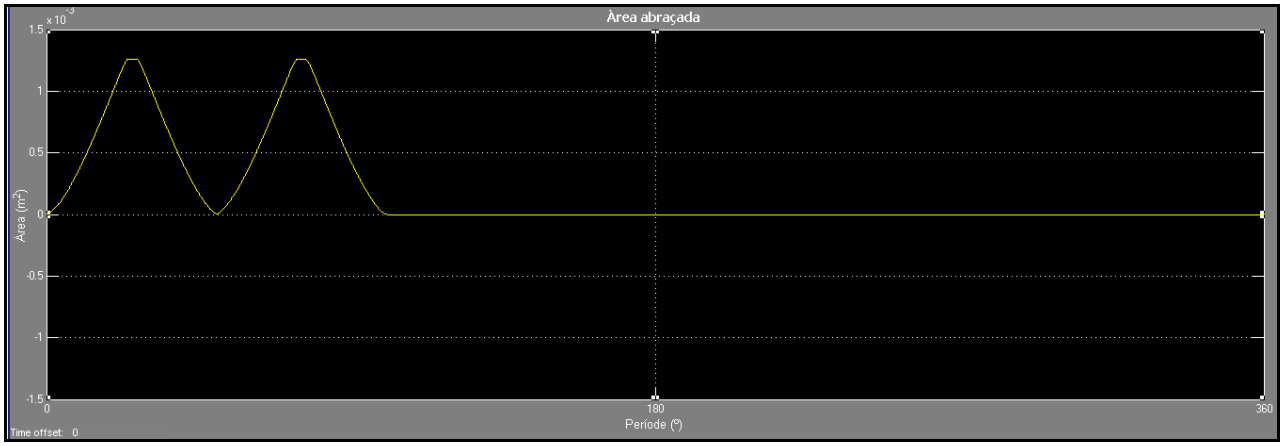



**Figura 82. Àrea abraçada.**

L'imant nord entra en el debanat i causa, en el gràfic, un pendent ascendent. Quan la bobina està completament solapada per l'imant, en el gràfic es pot observar un aplanament en el seu màxim. Al començar a desplaçar-se seguint la trajectòria del rotor en un sentit, el pendent disminueix ja que l'àrea d'intersecció va disminuint.

L'imant sud, entra amb un retard de 36º (condició perquè la velocitat estigui sincronitzada amb la freqüència) i crea un pendent ascendent, completament idèntic al que ha creat anteriorment l'imant nord. L'àrea és completament la mateixa, ja que els imants, siguin nord o sud, són de la mateixa dimensió i característiques.

### 9.2.2. Flux generat en la primera volta de bobina

Es pot observar, en la figura següent, el flux que genera un imant nord i un imant sud al passar sobre un debanat. Aquest flux representat només és a la primera volta de la bobina.

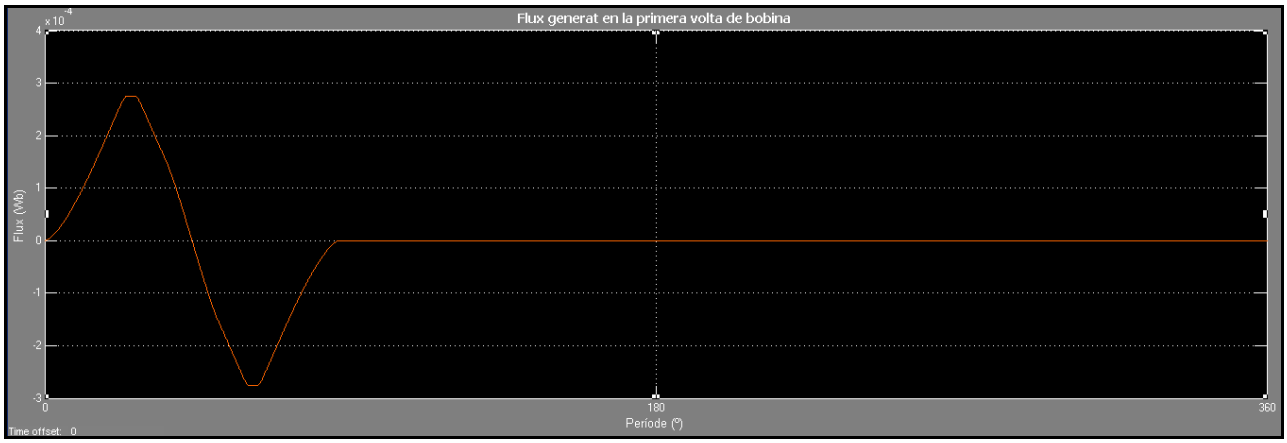



**Figura 83. Flux generat en la primera volta de bobina.**

L'àrea d'intersecció per la inducció dóna lloc a un flux magnètic.

L'imant nord, al sobreposar-se, solapant la bobina, causa un flux degut a la inducció. És per això que el gràfic (figura 84) té el mateix pendent que el gràfic de l'àrea (figura 83) sempre i quan sigui l'imant nord.

En el cas de l'imant sud, crea un pendent descendent. A l'arribar al seu màxim de descens, aquesta s'aplana, moment en què és solapada la bobina completament per l'imant. Seguint la trajectòria, es va creant una vall en el gràfic al sortir l'imant del debanat. Aquest imant, és a dir, el sud, causa aquest descens ja que està posicionat en el rotor com a sud, el qual causa un flux invertit al què causa l'imant nord.

### 9.2.3. Flux generat en la bobina

En la figura següent, se'ns mostra el flux que genera un imant nord i un sud sobre un debanat, tenint en compte el nombre de voltes que té aquest.

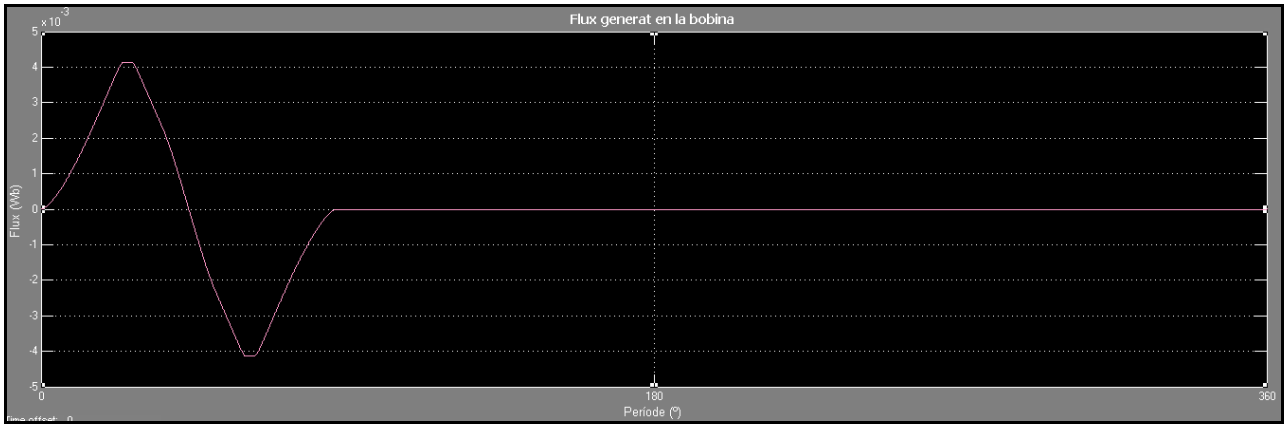



**Figura 84. Flux generat en la bobina**

És pràcticament el mateix gràfic que el mostrat en la figura 84, només que simplement canvia el valor del flux, ja que aquest ha sigut influenciat pel nombre de voltes que conté el debanat.

No s'ha tingut en compte la possible dispersió de flux degut a l'alçada de les bobines, i per tant, s'ha considerat el mateix valor d'inducció que penetra tant sobre la primera volta com a l'última.

### 9.2.4. Corrent en una bobina

En el gràfic mostrat, s'observa el corrent que és ocasionat en un debanat.

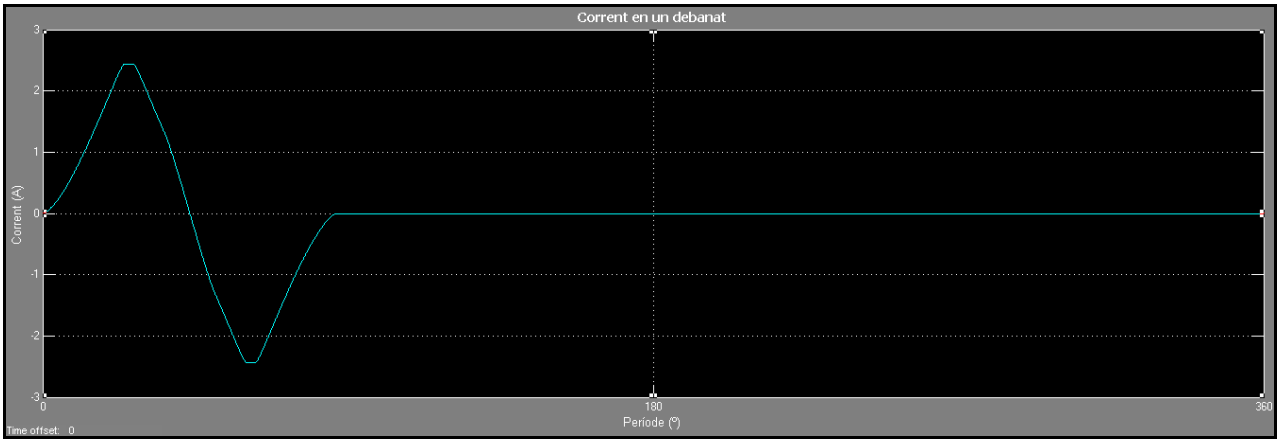



**Figura 85. Corrent en una bobina.**

El corrent s'ha pogut obtenir gràcies al valor del flux i de la inductància del debanat. S'observa que té el mateix pendent que la figura del flux. Això és degut a què el valor de la inductància ha sigut constant al pas de temps, és a dir, a la trajectòria del rotor. Només ha influenciat en canviar el valor i així obtenir el valor resultant del corrent.

### 9.2.5. Corrent produït pels 10 imants sobre una bobina

En la figura següent s'ha representat el corrent que produeix un debanat quan el rotor completa una volta, és a dir, 360º.

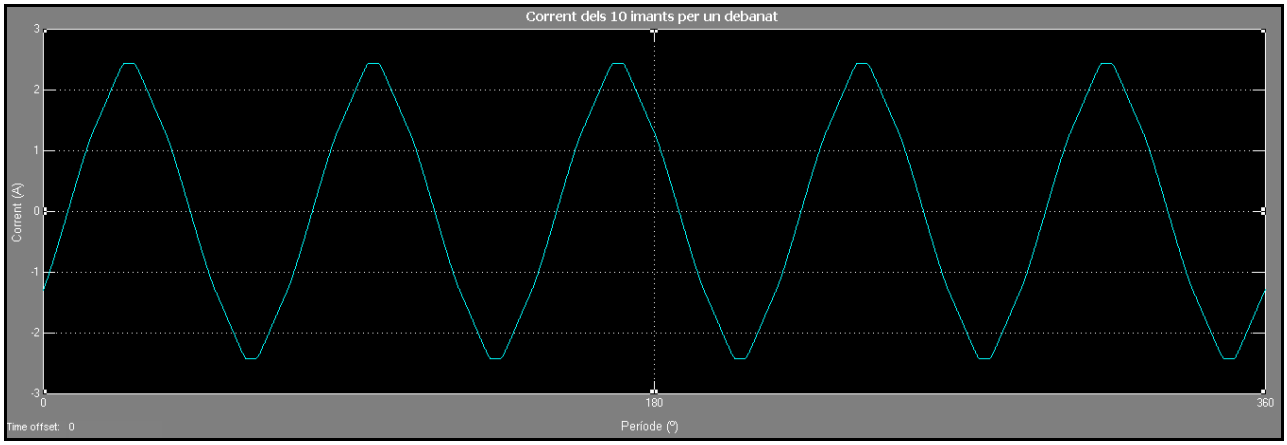



**Figura 86. Corrent produït per 10 imants sobre una bobina.**

Al donar una volta el rotor, és a dir, al girar aquests 360º, crea 5 pics positius i 5 pics negatius de corrent. Aquests són fruit de la polaritat dels imants. La seqüència és repetirà exactament igual a llarg del temps quan el rotor estigui en moviment girant sempre al mateix sentit (i a velocitat síncrona).

Aquest corrent és només el d'un debanat, amb el què és el d'una fase. En cas de què es volgués visualitzar els corrents d'altres fases, caldrà intercalar-los 120º elèctrics, però el desfasament és produeix en el decalatge (de 24º) entre bobines.

### 9.2.6. Corrents de les tres fases

En la figura següent es pot observar els corrents que hi circulen per tres debanats en quant el rotor completa una volta.

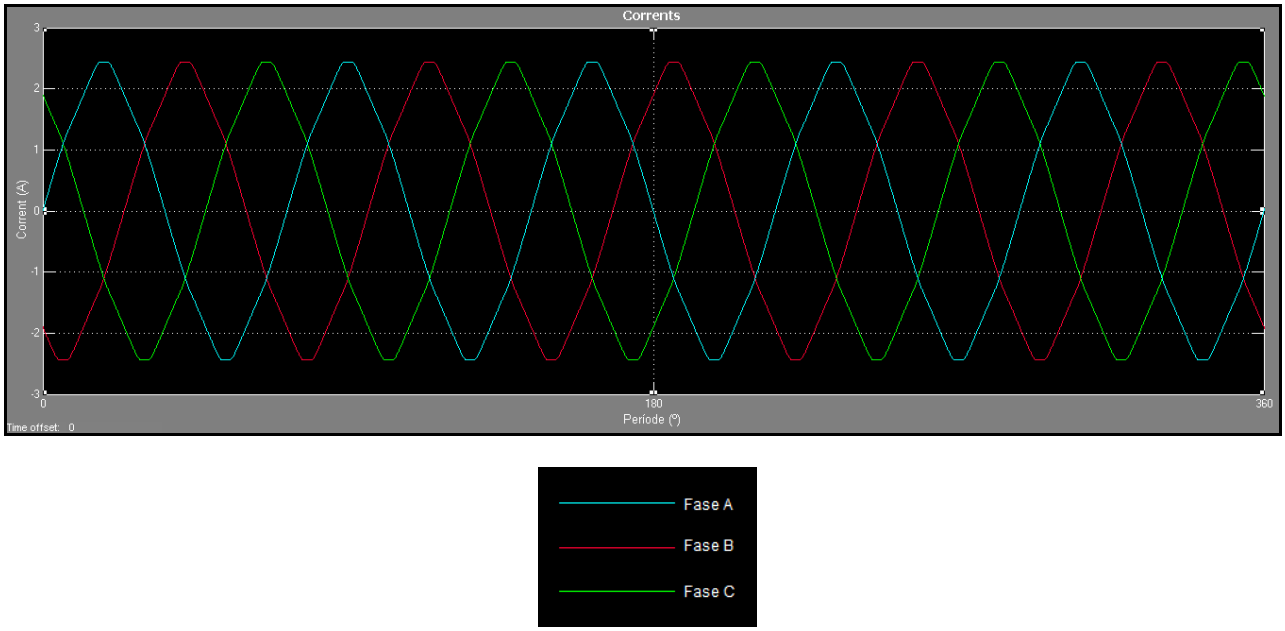



**Figura 87. Corrents per fase d'una bobina.**

En el gràfic anterior es troben representats els corrents per fase, desfasats entre ells 120º. Aquests graus de desfasament són ocasionats pel decalatge de les bobines (els 24º graus que hi ha entre elles).

Han sigut representats els corrents que hi circulen en una volta de rotor, i com s'observa, en aquests 360º de gir rotòric, hi ha els 5 màxims positius produïts pels imants nord i els 5 màxims negatius produïts pels imants sud.

# 10. SIMULACIÓ

## 10.1. Introducció al software de simulació

Per a poder estudiar el comportament de la màquina dissenyada s'ha utilitzat el *software SIMULINK*, pertanyent a l'entorn del *software* matemàtic MATLAB.

**Figura 88. Logotip del *software* MATLAB – SIMULINK.**

Amb l'ajuda d'aquest software hem pogut realitzar càlculs i simulacions per entendre el funcionament de la màquina i poder, a partir d'aquí, reajustar certs paràmetres per a obtenir uns resultats i per posteriorment poder extreure valoracions i conclusions.

Per a procedir a la simulació s'ha emprat blocs propis que ofereix el software i altres blocs que ens han permès poder introduir funcions per després visualitzar els resultats.

## 10.2. Simulació amb SIMULINK

### 10.2.1. Construcció de blocs per la simulació

Per a poder visualitzar el resultat de la trajectòria del rotor amb els imants al passar sobre els debanats, s'ha hagut d'emprar diversos blocs.

#### *10.2.1.1. Bloc de decalatge*

Tots els imants parteixen de l'instant 0, però no tots es troben en la mateixa posició, ja que tots estan distribuïts a llarg del rotor.

Per a poder declarar el decalatge d'aquests imants entre ells s'ha emprat un bloc dissenyat per SIMULINK que ens ho ha permès.

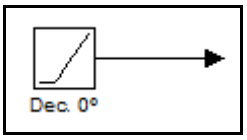



**Figura 89. Bloc de posicionament de l'imant pel SIMULINK.**

El valor que ens dóna aquest bloc és en graus. Cal tenir-ho en compte alhora d'inicialitzar la simulació i també alhora de voler realitzar les iteracions.

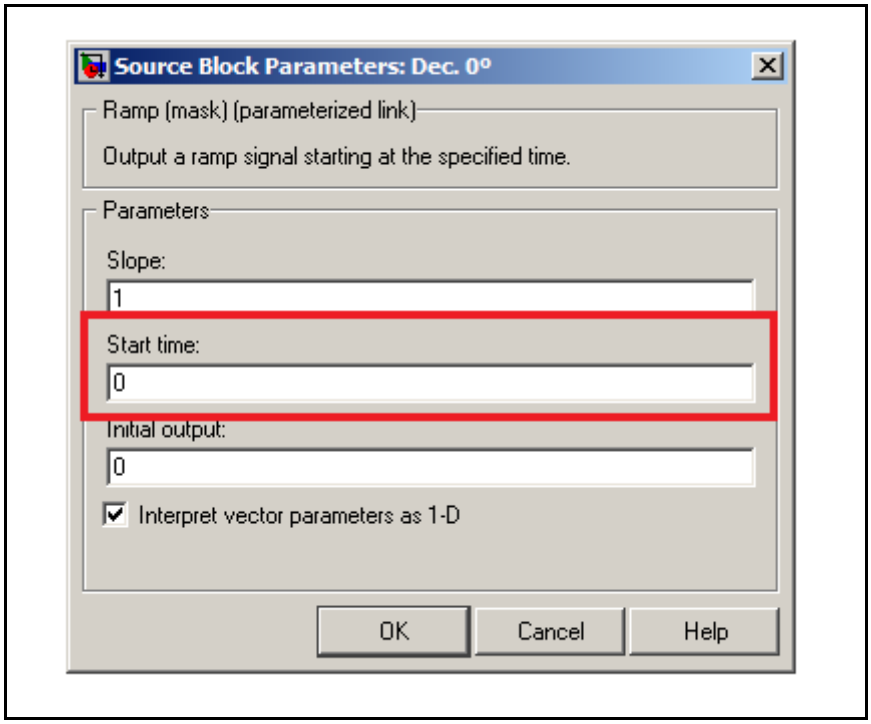



**Figura 90. Paràmetres del bloc de decalatge en SIMULNK.**

Cal tenir present el decalatge corresponent de cada imant. Cada imant ha sigut decalat del seu antecedent 36º, essent indicat aquest decalatge en el "*Start time*" de la finestra d'introducció dels paràmetres del bloc.

### *10.2.1.2. Bloc de conversió d'unitats de grau a radiants*

El present bloc és necessari per a poder efectuar el canvi d'unitats, doncs el "temps" de simulació són en graus, però les funcions internes del SIMULINK és realitzen en radiants. Així doncs, aquest bloc només emmagatzema una petita iteració de conversió de graus a radiants.

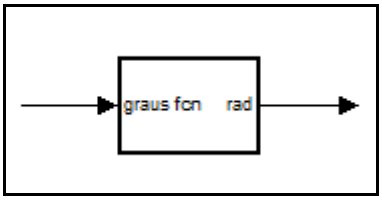



**Figura 91. Bloc de conversió de graus a radiants en SIMULINK.**

La iteració que ha realitzar és la següent.

```
function rad  = fcn(graus)

rad=graus*2*pi/360    ;
```

- Paràmetre variable d'entrada:
  - Graus: Entra el valor de l'angle en graus produït pel bloc antecedent per aquests per tal d'efectuar un canvi d'unitats a radiants.
- Paràmetre variable de sortida:
  - rad: És el resultat de la conversió dels graus a radiants, necessàries aquestes unitats per a poder processar les funcions posteriors.

### *10.2.1.3. Blocs d'imants*

S'ha volgut simular els imants al passar sobre un debanat i així poder extreure els valors del resultat de l'àrea d'intersecció que causen aquests.

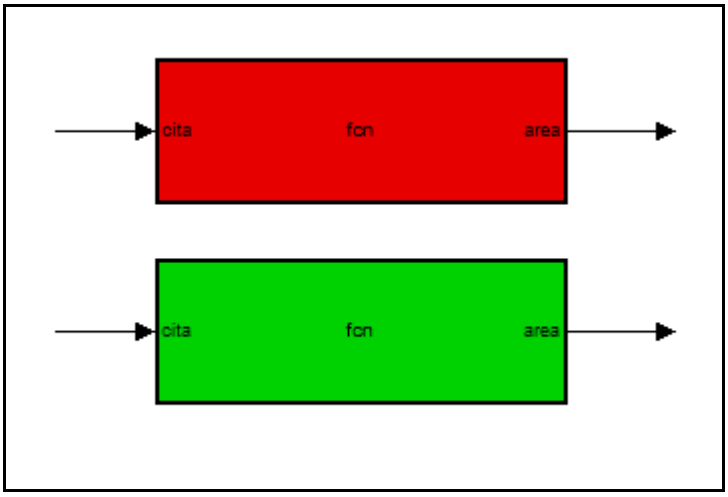



**Figura 92. Blocs d'imants per l'obtenció de l'àrea pel SIMULINK.**

Per a poder representar l'àrea d'intersecció causada per un imant nord i un imant sud, s'han optat per distribuir-los per pols, és a dir, s'han posat dos imants (un que representés un nord i un altre que representés un sud) per tal de poder visualitzar-los en un mateix lloc. S'ha volgut distingir el color dels imants per identificar la seva polaritat (vermell – nord, verd – sud). No obstant això, emmagatzemen el mateix procés iteratiu ja que l'àrea d'intersecció és sempre de valor positiu, és a dir, la polaritat dels imants afecta quan es vol calcular el flux i no l'àrea.

El bloc ha permès introduir un seguit de fórmules, entrar-l'hi un paràmetre extern, i declarar dins seu diversos paràmetres interns constants.

Dins ells amaguen la programació següent:

```
function area =fcn(cita)

Ld=0.097;
Ri=0.0225;
Rb=0.02;

D=2*Ld*(sin(cita/2)) ;
    if D>(Ri+Rb)
    area=0;
    else
    x=(D^2-Ri^2+Rb^2)/(2*D);
        if D>(Ri-Rb)
           y=(Rb^2-x^2)^0.5 ;
           a1=2*acos((D-x)/Ri);
                if x>0
                   a2=2*acos(x/Rb);
                   area=(Ri^2*a1/2+Rb^2*a2/2-(y*(D-x))-(y*x));
                else
                   a2=2*pi-2*acos(x/Rb);
                   area=(Ri^2*a1/2+Rb^2*a2/2-(y*(D-x))-(y*x));
                end
        else
           area=pi*Rb^2;
     end
end
```

- Paràmetres variables d'entrada:
  - cita: És declarada com a variable ja que depèn de la trajectòria angular del rotor. Aquesta no és la mateixa per a cada bloc d'imant, ja que ha de respectar el decalatge entre imants.

- Paràmetres constants d'entrada:
  - Ld: És la distància de l'eix de simetria del rotor als eixos de simetria dels imants o de les bobines. Sempre és constant ja que aquesta distància no varia en cap moment de la trajectòria del rotor ni tampoc en el pas del temps.
  - Ri: És el radi de l'imant.
  - Rb: És el radi de la bobina.

- Paràmetres de sortida:
  - àrea: És el paràmetre de sortida. Aquest ens dóna ja el valor final després d'haver obtingut tot el procés iteratiu emmagatzemat en el bloc.

### *10.2.1.4. Bloc per a declarar la inducció*

Ha sigut necessari crear un bloc per introduir el valor de la inducció que crea l'imant. Aquest permet obtenir el flux (sobre la primera volta de la bobina), al ser multiplicat pel bloc d'obtenció de l'àrea.

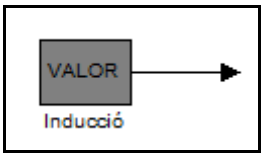



**Figura 93. Bloc per declarar la inducció.**

### *10.2.1.5. Bloc per a invertir el valor del flux en l'imant negatiu*

Degut a què el flux és negatiu en l'imant sud, el valor del flux s'ha de passar a positiu, amb el que s'ha invertit el valor multiplicant el valor del flux per -1.

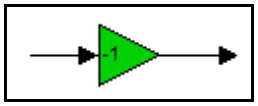



**Figura 94. Bloc d'inversió de flux.**

### *10.2.1.6. Bloc per a declarar el nombre de voltes*

Bloc necessari per tenir present quin és el nombre de voltes i multiplicar-les pel valor de la inducció per tal d'aconseguir el valor del flux que hi haurà en la bobina.

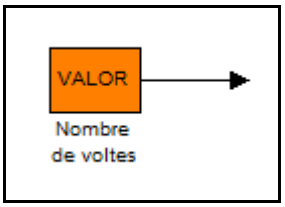



**Figura 95. Bloc per declarar el nombre de voltes.**

### *10.2.1.7. Bloc per a declarar la inductància*

Aquest bloc ens permetrà obtenir el valor de la inductància.

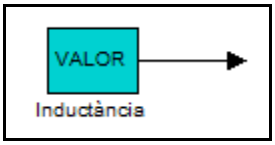



**Figura 96. Bloc per declarar la inductància.**

### 10.2.2. Blocs auxiliars per la simulació

#### *10.2.2.1. Sumatori*

El present bloc ens permet sumar tantes entrades com es vulgui. En el nostre cas, s'ha emprat per sumar el valor resultant del flux generat per dos imants i també s'ha emprat per obtenir el resultat total del corrent en una fase.

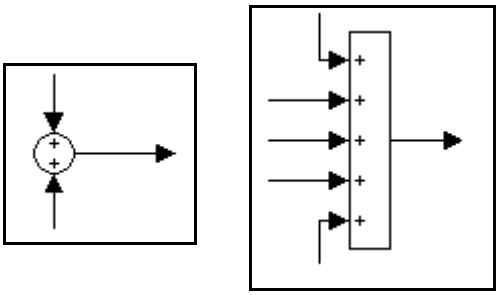


**Figura 97. Blocs sumatoris.**

#### *10.2.2.2. Bloc multiplicador*

Aquest bloc permet multiplicar dos blocs. Així, si es vol fer entrar blocs i multiplicar-los entre ells, sense haver de crear una funció dins un bloc que permet fer iteracions, aquest bloc és l'idoni per a poder-ho fer.

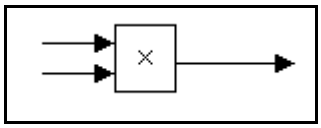


**Figura 98. Bloc multiplicador.**

#### *10.2.2.3. Bloc divisor*

Ens permet dividir blocs entre ells.

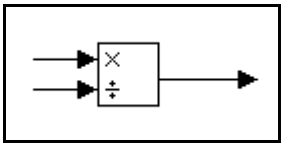


**Figura 99. Bloc divisor.**

*10.2.2.4. Bloc d'unió*

Aquest bloc és el que ha permès obtenir la seqüència total de fases en una mateixa sortida. Permet entrar diversos paràmetres i unir-los tots a la vegada, sense realitzar cap operació matemàtica.

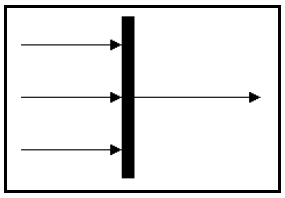


**Figura 100. Bloc d'unió.**

### 10.2.3. Construcció de la simulació a partir dels blocs

Per a poder simular-ho correctament ha calgut interpretar les tres fases, on cada bobina està decalada 24º. Els imants, en canvi, estan decalats 36 º.

La taula següent mostra els decalatges introduïts en el *start time* del bloc de decalatge (apartat 10.2.1.1.).

| Imant | Fase A | Fase B | Fase C |
|---|---|---|---|
| 1 | 0 º | 24 º | 48 º |
| 2 | 36 º | 60 º | 84 º |
| 3 | 72 º | 96 º | 120 º |
| 4 | 108 º | 132 º | 156 º |
| 5 | 144 º | 168 º | 192 º |
| 6 | 180 º | 204 º | 228 º |
| 7 | 216 º | 240 º | 264 º |
| 8 | 252 º | 276 º | 300 º |
| 9 | 288 º | 312 º | 336 º |
| 10 | 324 º | 348 º | 372 º |

**Taula 11. Decalatge entre imants en el *start time* per a la simulació al SIMULINK.**

### 10.2.3.1. Representació de la fase A en blocs

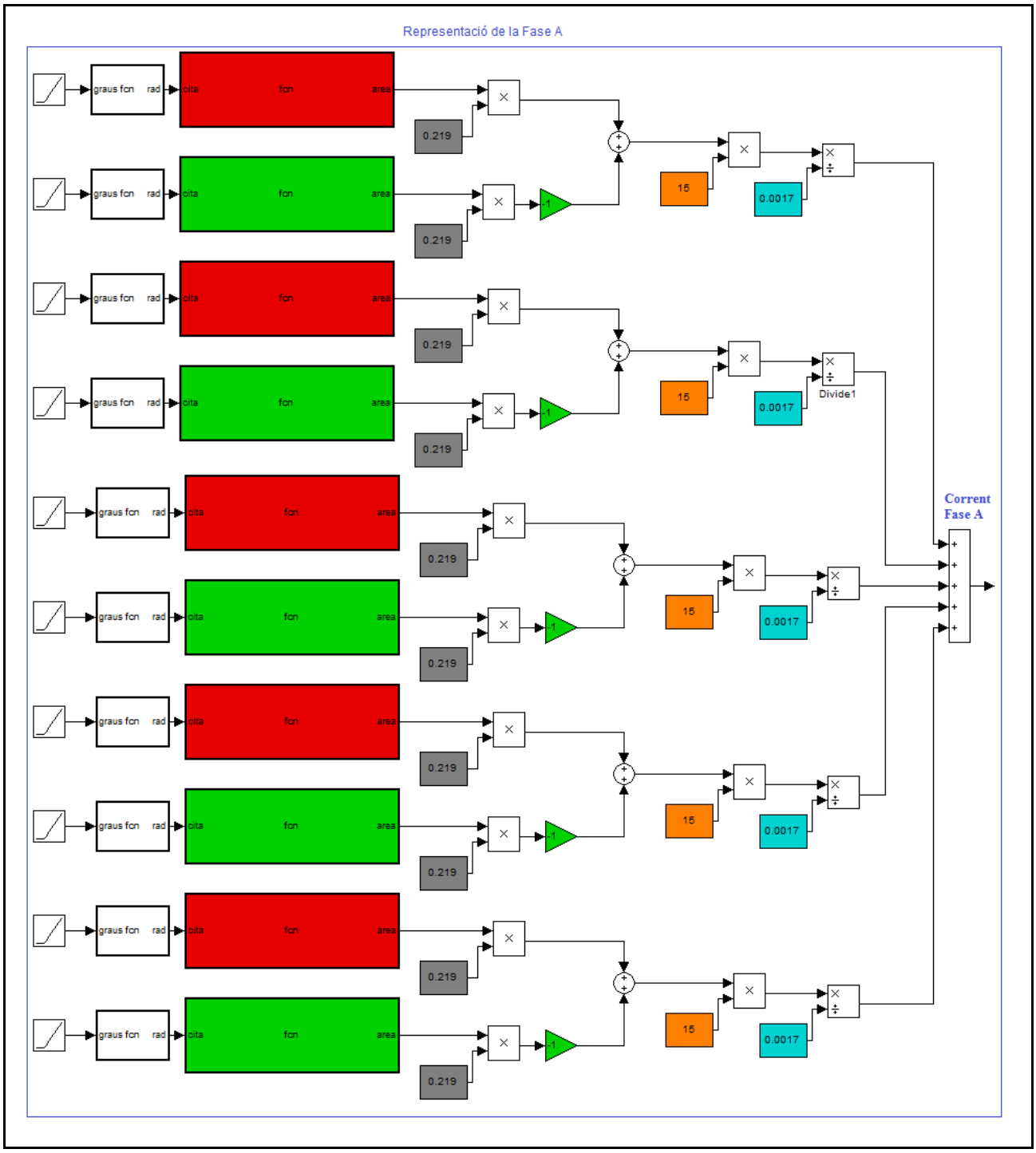



**Figura 101. Simulació de la fase A pel SIMULINK.**

### 10.2.3.2. Representació de la fase B en blocs

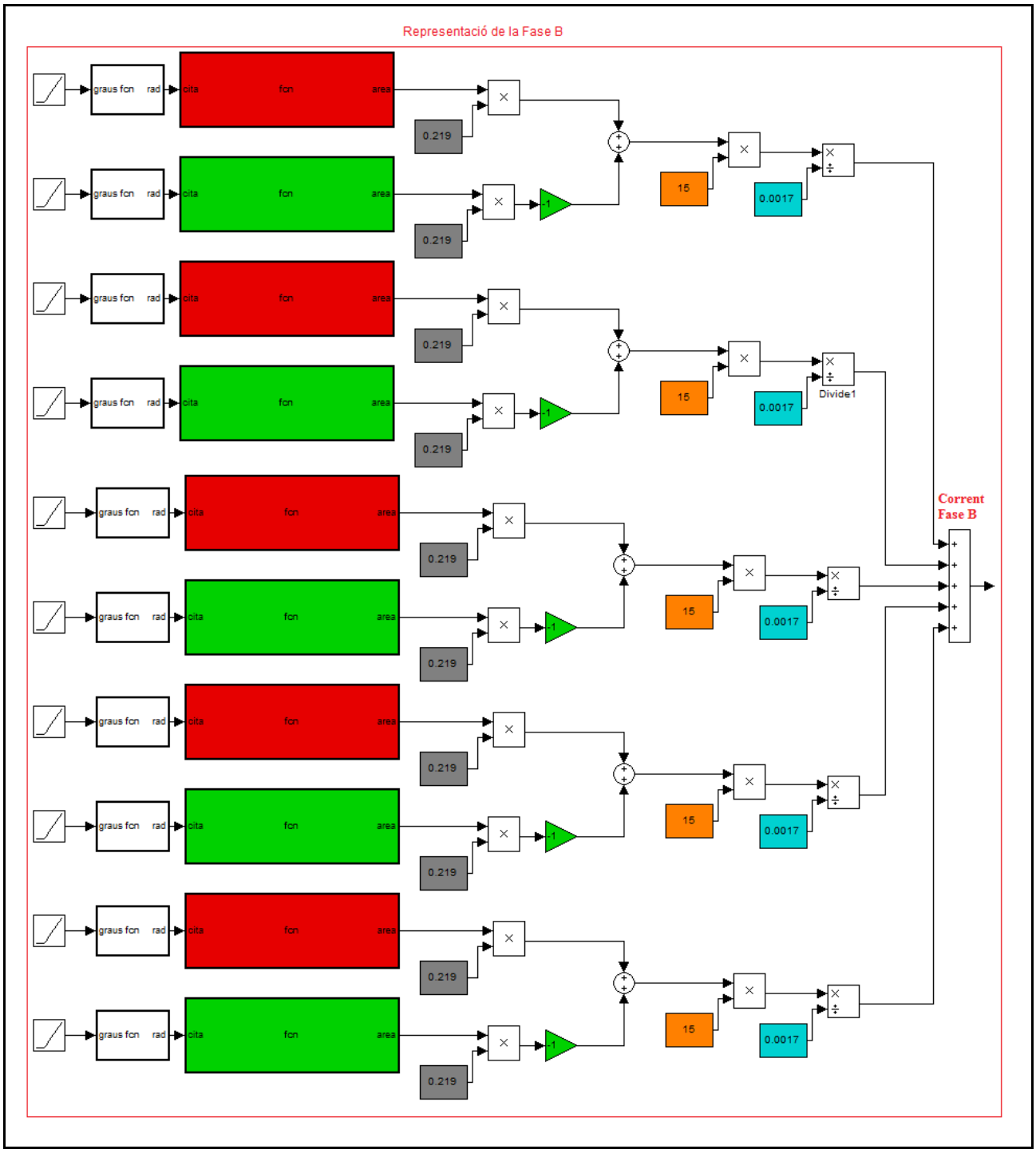



**Figura 102. Simulació de la fase B pel SIMULINK.**

### 10.2.3.3. Representació de la fase C en blocs

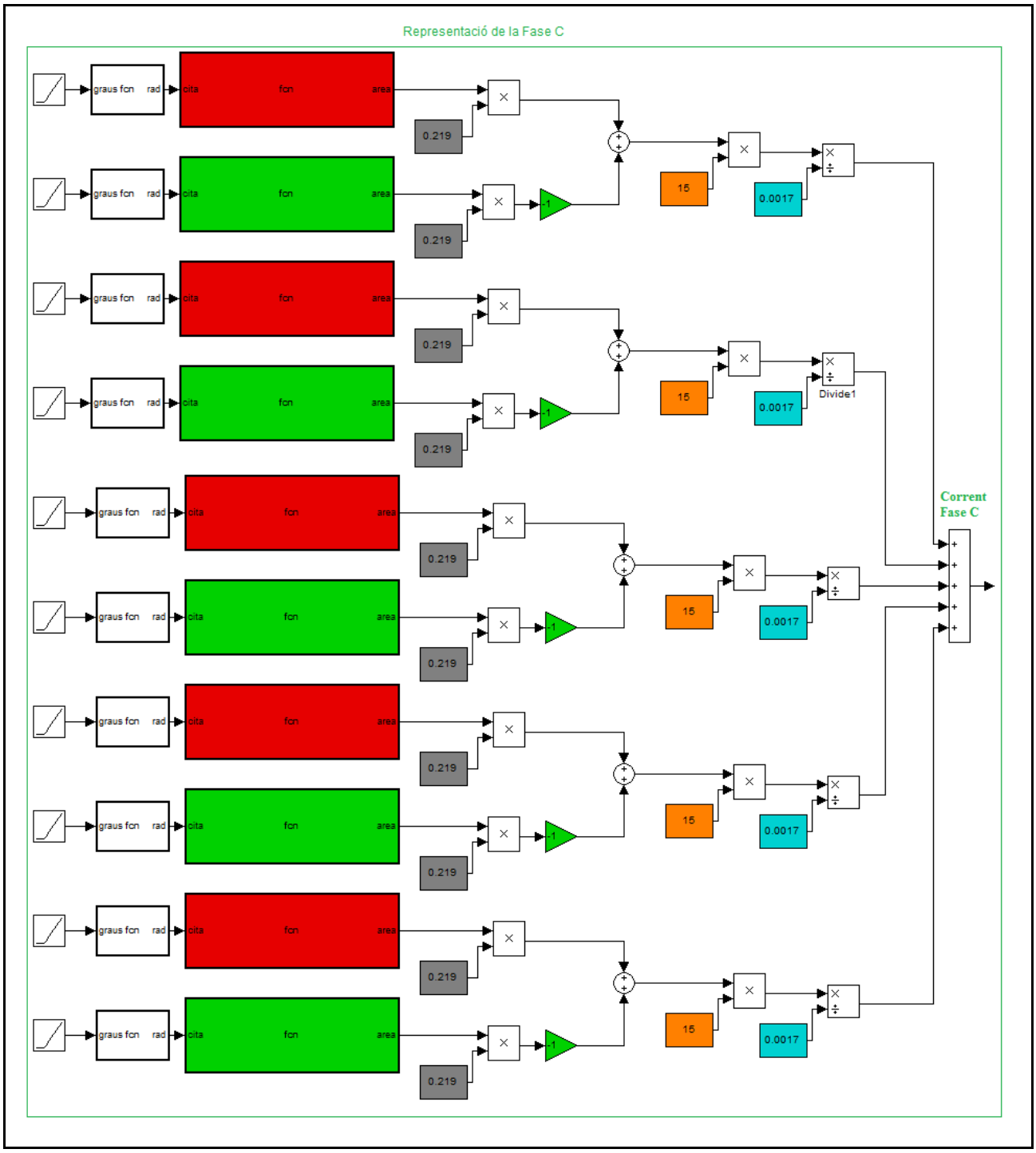



**Figura 103. Simulació de la fase C pel SIMULINK.**

*10.2.3.4. Unió de fases per a la visualització de resultats*

Per a realitzar la visualització dels resultats, ha calgut unir les fases en una mateixa sortida per a poder veure totes elles juntes, quin són els resultats, les formes d'ona creades i els seus valors. En la figura 105 es mostra con s'han unit les fases en la simulació.

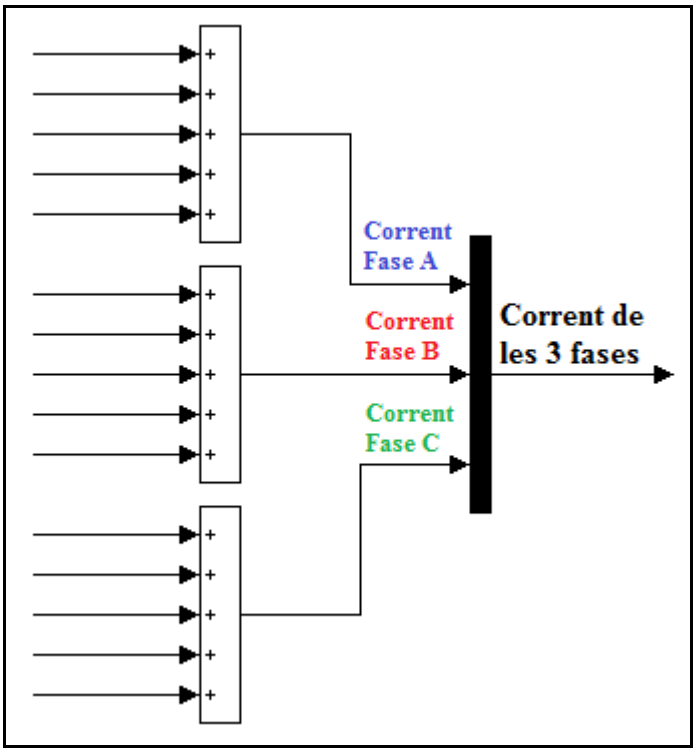



**Figura 104. Unió de les fases.**

### 10.2.4. Visualització dels resultats

Per a observar els resultats obtinguts s'ha utilitzat un element propi del SIMULINK que permet realitzar visualitzacions de tot el que s'està calculant.

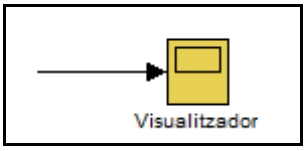



**Figura 105. Visualitzador.**

# 11. APROFITAMENT DE L'ENERGIA

## 11.1. Opcions de consum

### 11.1.1. Connexió al consum

La connexió a la xarxa és una opció que s'ha de valorar per donar utilitat al generador. És una bona opció si el que es vol aconseguir és reduir l'impacte ambiental i contribuir a generar energia elèctrica a partir d'una font d'origen renovable. A més, pot presentar un estalvi econòmic si es comercialitza l'energia generada. No obstant això, caldria tenir en compte un seguit de requisits per poder realitzar aquesta connexió i valorar una sèrie d'inconvenients.

La principal aportació de connectar-ho a la xarxa seria la contribució en poder generar energia elèctrica d'origen renovable, reduint les emissions de $CO_2$. També cal esmentar que al ser una font de generació distribuïda, es fomenta la independència energètica.

Per a connectar a la xarxa, és imprescindible que assoleixi una ondulació perfecte creada per un inversor. No obstant això, cal que a l'inversor l'hi entri corrent continu. Així doncs, a la sortida del generador, caldrà rectificar l'ona ondulada a continua i aquesta passar per un condensador electrolític que millori el rissat.

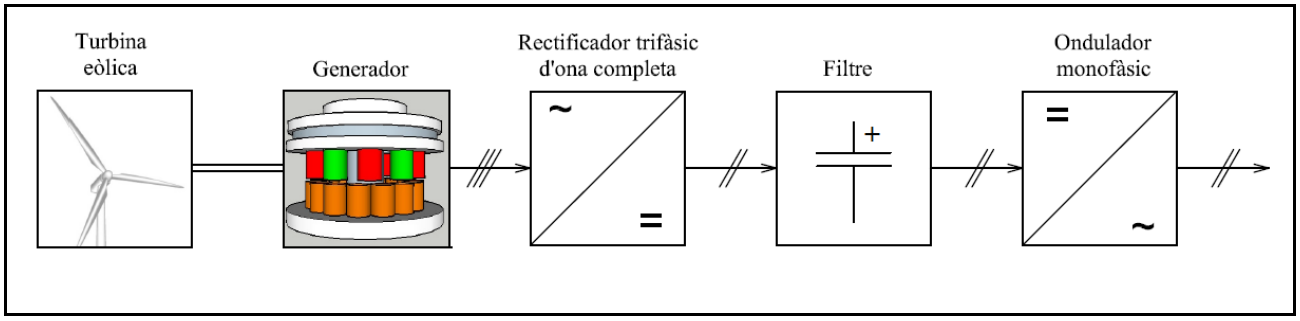



**Figura 106. Esquema de connexió al consum.**

#### *11.1.1.1. Avantatges*

- Energia elèctrica generada a partir d'una font d'origen renovable, reduint l'impacte ambiental.
- Comercialitzar l'energia generada, la qual representaria un estalvi econòmic (un cop la màquina hagués estat amortitzada).

#### *11.1.1.2. Inconvenients*

- Cal que el vent es mantingui constant i aquest provoqui que el generador assoleixi la velocitat de sincronisme, sent aquesta de 600 rpm.
- Cal disposar d'un seguit d'electrònica per tal d'efectuar la càrrega d'energia elèctrica i posteriorment aprofitar-la.
- S'injecten una sèrie d'harmònics a l'electrònica de potència que precedeix el circuit del generador cap a la xarxa que no han sigut possibles d'eliminar.

### 11.1.2. Càrrega de bateria

L'opció més adient que s'ha escollit ha sigut la de carregar les bateries a partir de l'energia elèctrica generada per l'aerogenerador. L'objectiu de poder carregar unes bateries és que aquesta energia elèctrica pugui ser aprofitada (durant un cert temps) en un altre instant.

La contribució al medi ambient és present, ja que l'energia aprofitada de la bateria ha sigut generada per una font d'origen renovable.

És imprescindible utilitzar un seguit d'electrònica per tal de carregar la bateria. La bateria requereix corrent continu, el qual ha sigut rectificat a la sortida del generador. És absent la utilització d'un filtre, ja que el mateix rectificador crea un rissat menyspreable. No obstant això, caldrà utilitzar un regulador de càrrega.

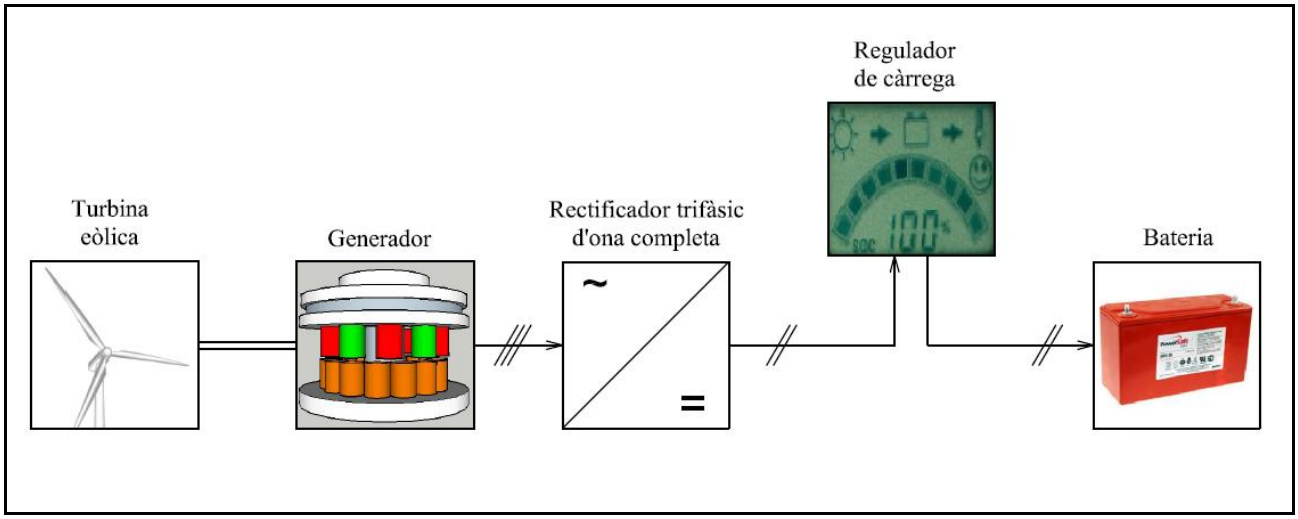



**Figura 107. Esquema de connexió a bateria.**

#### *11.1.2.1. Avantatges*

- Possibilitat d'utilitzar energia elèctrica en un altre emplaçament (transportant la bateria).
- Contribució al medi ambient generant energia elèctrica a partir d'una font d'origen renovable.
- Possibilitat de connectar a la bateria un inversor per generar corrent altern.

#### *11.1.2.2. Inconvenients*

- Cal disposar d'un seguit d'electrònica per tal d'efectuar la càrrega d'energia elèctrica i posteriorment aprofitar-la.
- El preu és elevat.
- És recomanable conèixer la profunditat de descàrrega de la bateria per no fer-la malbé.

# 12. MANTENIMENT

## 12.1. Introducció al manteniment

El manteniment és un conjunt d'accions que permeten mantenir o restablir un bé en un estat específic o en la mesura possible d'assegurar un servei determinat. Sense descuidar l'aspecte econòmic, mantenir és assegurar les operacions al cost global òptim.

Hi ha varis tipus de manteniment i cada un d'aquests podria ser eficaç per procurar mantenir el prototip d'aerogenerador en estat de servei. No obstant això, l'aspecte econòmic influencia molt alhora de voler aplicar un determinat manteniment, i és per aquest motiu que no tots els manteniments són adequats per segons quines màquines o instal·lacions.

Dintre de les tasques de manteniment s'han de realitzar inspeccions anuals de:

- Inspecció i ajustament de femelles.
- Inspecció de les pales.
- Inspecció dels eixos.
- Inspecció de l'alternador.
- Inspecció de les connexions elèctriques.
- Greixar els rodaments del suport de la gòndola.

## 12.2. Preventiu

Aquest tipus de manteniment es basa en la substitució dels elements de les màquines, de manera periòdica, abans d'arribar a la fi de la seva vida útil. La periodicitat de les intervencions de manteniment es basa en càlculs teòrics o estimacions de la duració dels components que fallen, segons patrons basats en el temps de funcionament.

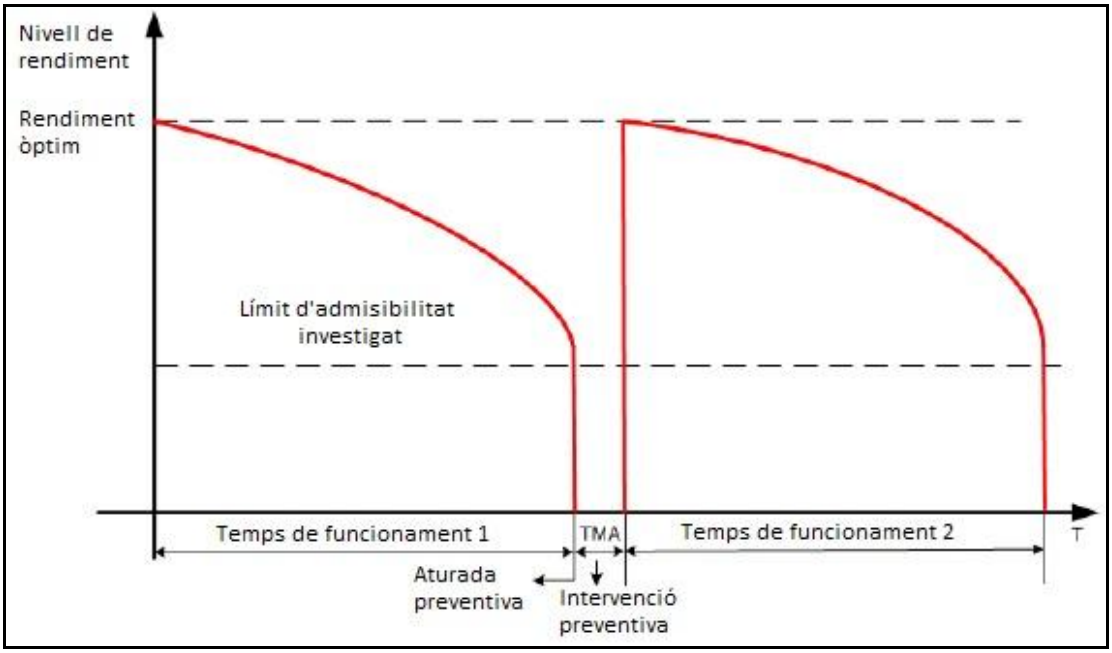



**Figura 108. Gràfica dels temps de funcionament amb manteniment preventiu.**

### 12.2.1. Avantatges

- Es redueixen les despeses de fallada.
- Es millora la disponibilitat.
- Augmenta la duració de la vida eficaç de l'equip.
- Garanteix la seguretat, realitzant menys actuacions imprevistes i perilloses.

### 12.2.2. Inconvenients

- No té en compte l'envelliment del material.
- No té en compte el desgast que es produeix amb les intervencions.
- Cost elevat.

## 12.3. Predictiu

Aquest tipus de manteniment es basa en prevenir les fallades de forma esperada reduint els costos que podrien ocasionar aquestes.

Si hi ha una evidència especial de fallada imminent o alguna peça s'aproxima a un nivell de degradació predeterminat, llavors és quan s'actua.

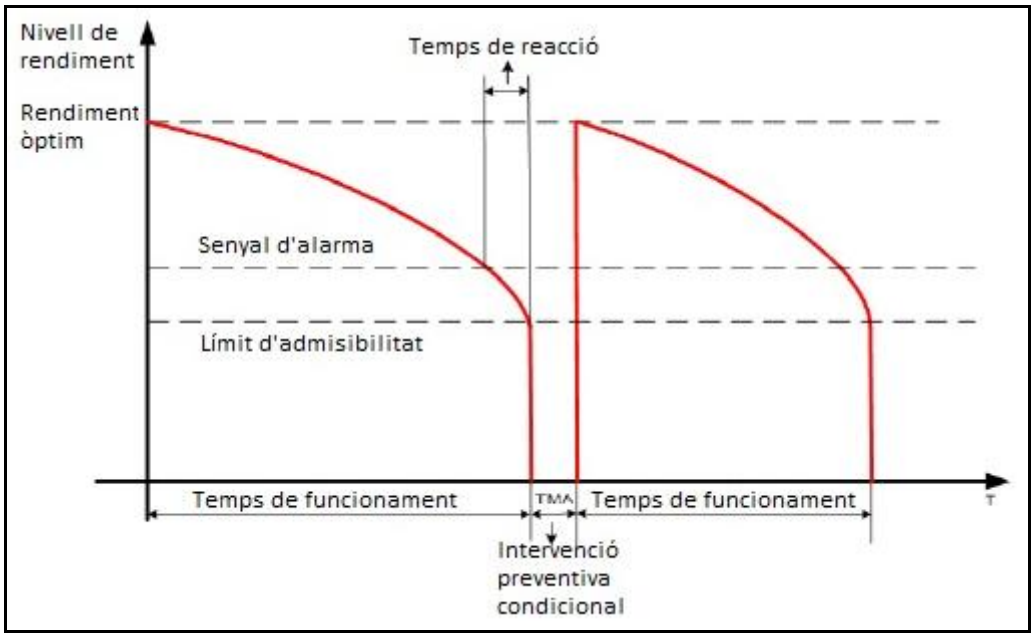



**Figura 109. Gràfica dels temps de funcionament amb manteniment predictiu.**

Per a dur a terme aquest manteniment, cal fer un seguiment continu o unes vigilàncies periòdiques. També hi ha la possibilitat d'instal·lar testimonis que ens indiquin.

### 12.3.1. Avantatges

- Es canvien les peces quan hi ha una evidència de fallada.
- Garanteix la seguretat.

### 12.3.2. Inconvenients

- Cal disposar d'equips de mesures per fer revisions en el material.
- Cal tenir coneixements dels equips de mesures.

## 12.4. Correctiu

Aquest tipus de manteniment es basa en dos tipus d'intervencions:

- **Arranjament:** Consisteix en pal·liar una avaria de manera que es torni a garantir el funcionament a la màquina.
- **Reparacions:** Consisteix en solucionar tot tipus d'avaria amb la finalitat de tornar a fer funcionar la màquina.

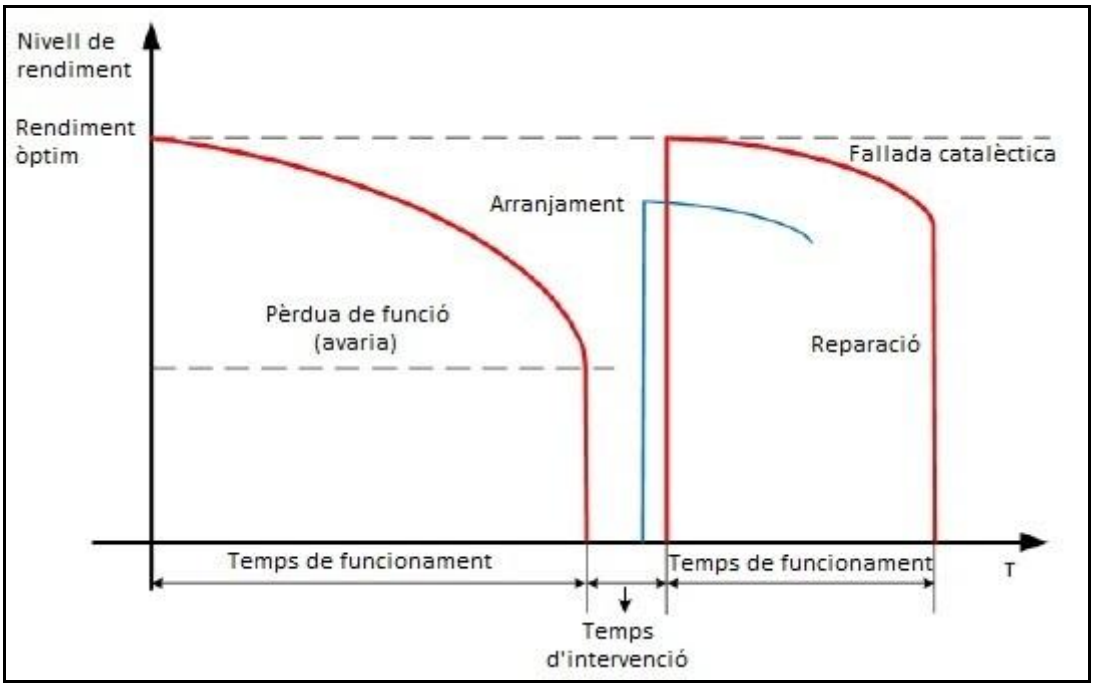



**Figura 110. Gràfica dels temps de funcionament amb manteniment correctiu.**

### 12.4.1. Avantatges

- Només s'actua en cas de fallada.

### 12.4.2. Inconvenients

- Aturada total de funcionament de l'aerogenerador en cas de fallada.

# 13. IMPACTE AMBIENTAL

## 13.1. Introducció l'anàlisi d'impacte ambiental

En el present apartat es pretén donar a conèixer quins són els impactes ambientals que originen els aerogeneradors i quins aspectes s'han a tenir en compte alhora d'implementar-los.

Degut a què el projecte tracta del disseny del prototip d'un aerogenerador, s'ha comentat quin és l'impacte ambiental que causaria aquest.

Així doncs, s'ha separat en sot apartats:

- Impacte ambiental d'un aerogenerador.
- Impacte ambiental del prototip.

## 13.2. Impacte ambiental d'un aerogenerador

### 13.2.1. Objecte

L'objecte d'aquest estudi és conèixer quins són els efectes que ocasiona un aerogenerador i el prototip dissenyat sobre el medi ambient.

### 13.2.2. Impacte sonor

#### *13.2.2.1. Contaminació acústica*

S'anomena a l'excés de soroll que altera les condicions normals de l'ambient en una determinada zona. Si el soroll no s'acumula, no es trasllada o no es manté en el temps com les altres contaminacions, pot causar grans danys en la qualitat de vida de les persones si no es controla bé o adequadament.

El terme de contaminació acústica fa referència al soroll provocat per les activitats humanes (en aquest cas, aerogeneradors destinats a la producció d'energia elèctrica), que produeix efectes negatius sobre la salut auditiva, física i mental de les persones.

S'entén per soroll la unió estadísticament desendreçada de sons que poden provocar una pèrdua d'audició o ésser nociu per a la salut.

#### *13.2.2.2. Efectes del soroll sobre la salut*

##### 13.2.2.2.1. EFECTES AUDITIUS

El sistema auditiu es ressent davant una exposició prolongada a la font de soroll, tot i que aquesta sigui de baix nivell. Pot provocar un dèficit auditiu.

#### 13.2.2.2.2. EFECTES NO AUDITIUS

La contaminació acústica, a més d'afectar l'oïda, pot provocar efectes psicològics negatius i altres efectes fisiopatològics. El soroll i els seus efectes negatius no auditius sobre el comportament i la salut mental i física, depenen de les característiques personals.

Alguns efectes no auditius provocats pel soroll són:

- Efectes psicopatològics.
- Efectes psicològics.
- Efectes sobre el somni.
- Efectes sobre la conducta.
- Efectes en la memòria.
- Efectes en l'atenció.
- Efectes en l'embaràs.
- Efectes sobre els nens.

#### 13.2.2.2.3. MESURES ADOPTADES A ESPANYA

- Directiva 2003/10/CE del Parlament Europeu i del Consell, del 6 de febrer de 2003, sobre les disposicions mínimes de seguretat i de salut relatives a l'exposició dels treballadors als riscos derivats dels agents físics (soroll).
- Llei 37/2003, de 17 de novembre, del soroll.
- Real Decret 286/2006, de 10 de març, sobre la protecció de la salut i la seguretat dels treballadors contra els riscos relacionats amb l'exposició al soroll.

### 13.2.3. Mesures i càlculs dels nivells de so

Les autoritats públiques en tot el món utilitzen la denominada escala dB, o decibels, per a quantificar les mesures de so. El decibel és la unitat relativa emprada en acústica per a mesurar dues magnituds: la magnitud que s'estudia i la magnitud de referència.

El decibel és una unitat logarítmica, adimensional i matemàticament escalar. És la unitat de mesura utilitzada per al nivell de potència i pel nivell d'intensitat del soroll. S'utilitza una escala logarítmica perquè la sensibilitat que presenta l'oïda humana a les variacions d'intensitat sonora segueixen una escala aproximadament logarítmica, no lineal.

El nivell de pressió sonora determina la intensitat del què genera una pressió sonora instantània. Es mesura en dB i varia entre 0 dB i 140 dB.

Per a calcular el nivell de pressió, cal utilitzar la fórmula següent:

$$L_P = 20 \times \log \frac{P_{son}}{P_{ref}} \ (dB)$$

**Equació 105. Nivell de pressió.**

| Nivells sonors i resposta humana | | |
|---|---|---|
| SOROLLS CARACTERÍSTICS | NIVELL DE PRESSIÓ SONORA (dB) | EFECTE |
| Zona de llançament de coets (sense protecció auditiva) | 180 | Pèrdua auditiva irreversible |
| Operació en pistes de jets Sirena antiaèria | 140 | Dolorosament fort |
| Tro | 130 | |
| Enlairament de jets Clàxon d'automòbil | 120 | Màxim esforç vocal |
| Martell pneumàtic Concert de Rock | 110 | Extremadament fort |
| Camió recol·lector Petards | 100 | Molt fort |
| Camió pesat Trànsit urbà | 90 | Molt molest Dany auditiu (8 h) |
| Rellotge despertador Assecador de cabell | 80 | Molest |
| Restaurant sorollós Trànsit per autopista Oficina de negocis | 70 | Difícil ús del telèfon |
| Aire condicionat Conversació normal | 60 | Intrusiu |
| Trànsit de vehicles lleugers | 50 | Silenci |
| Dormitori Oficina tranquil·la | 40 | -- |
| Biblioteca Murmuri a 5 m | 30 | Molt silenciós |
| Estudi de radiodifusió | 20 | -- |
| -- | 10 | Quasi audible |
| -- | 0 | Umbral auditiu |

**Taula 12. Nivells sonors i resposta humana.**

### 13.2.4. Soroll dels aerogeneradors

Cap paisatge està mai en silenci absolut. Això fa que sigui difícil mesurar de forma precisa el so produït només pels aerogeneradors.

El so depèn de la seva reflexió per part de les superfícies del terreny i dels edificis. Això pot fer que el mapa del so sigui diferent en cada localització. També, en augmentar la velocitat del vent, augmenta la velocitat de rotació i per tant el soroll s'intensifica, per la qual cosa es recomana dissenys en què la velocitat del rotor no sigui excessiva.

Malgrat aquestes recomanacions amb vista a disminuir aquest efecte, és important assegurar que l'aerogenerador no superi els límits permissibles de soroll.

Les turbines dels aerogeneradors produeixen dos tipus de soroll: el mecànic i l'aerodinàmic.

#### *13.2.4.1. Soroll mecànic*

El soroll mecànic, és a dir, components metàl·lics movent-se o xocant uns contra uns altres, pot originar-se en la transmissió (els eixos) i en el generador d'una turbina eòlica.

Les multiplicadores dels aerogeneradors han sigut específicament adaptades per un funcionament silenciós en l'aerogenerador. Una forma d'aconseguir-ho és que les rodes d'acer de la multiplicadora tinguin un nucli flexible semi tou, tot i que tenen una superfície dura per assegurar resistència i llarga duració enfront al desgast.

L'aïllament acústic juga un paper secundari en la majoria d'aerogeneradors moderns que existeixen en el mercat, tot i que pot ser útil minimitzar alguns dels sorolls a mitges i altes freqüències. No obstant això, sembla ser que en general és més eficient solucionar el problema del soroll des de la pròpia estructura de la màquina.

#### *13.2.4.2. Soroll aerodinàmic*

El soroll aerodinàmic generat per les pales dels aerogeneradors pot classificar-se d'acord amb el següent criteri:

- **Soroll de capa límit turbulenta en la bora de sortida:** S'origina per un dèficit fluctuant de pressió entre el costat de pressió i el costat de succió quan el flux arriba al límit de sortida.
- **Soroll de punta:** S'origina per la turbulència en el vòrtex de la punta.
- **Soroll d'entrada en pèrdua:** S'origina per les fluctuacions de pressió en les àrees de separació de flux, presents a alts angles d'atac.
- **Soroll a la bora de sortida rom:** S'origina en la petita zona de separació de flux darrere una bora de sortida rom que causa la formació de vòrtex (coneguda com formació de vòrtex de *Von Karman*).
- **Soroll de flux sobre els orificis, tall i intrusions:** S'origina per fluxos inestables i per formació de vòrtex.

### 13.2.5. Projecció d'ombres

Els aerogeneradors, a l'igual que la resta d'estructures altes, projecten ombres en les àrees veïnes quan el Sol està visible. Si es viu a prop d'un aerogenerador, és possible que hi hagi una petita molèstia si les pales del rotor tallen la llum solar, causant un efecte de parpelleig quan el rotor està en moviment.

No obstant això, una planificació ciutadana i la utilització d'un bon programa per planificar l'emplaçament de l'aerogenerador, es podria preveure aquest problema.

### 13.2.6. Regulació

La projecció de l'ombra no està en general regulada explícitament per les autoritats de planificació.

### 13.2.7. Predicció del parpelleig de l'ombra

Si es coneix la zona on el potencial de l'efecte de parpelleig tindrà una determinada mida, s'intentarà situar les turbines de manera que s'eviti qualsevol molèstia per als veïns.

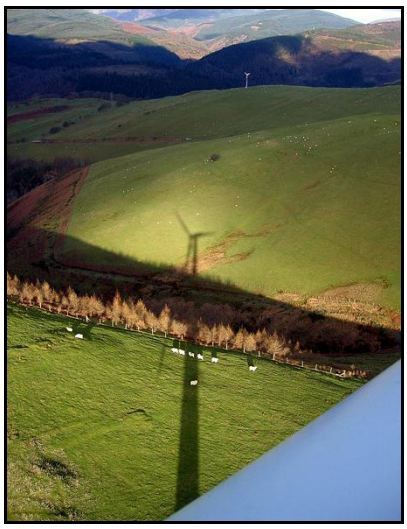


**Figura 111. Ombra d'un aerogenerador.**

Malauradament, sembla ser que no hi ha una capacitat de predicció amb prou exactitud sobre la possibilitat de durant quant temps pot haver un efecte de parpelleig. No es pot conèixer per avançat si hi haurà vent o quina serà la direcció del mateix, tot i que utilitzant l'astronomia i la trigonometria, es pot calcular bé un escenari probable o més favorable, és a dir, una situació on sempre hi hagi insolació quan el vent estigui tot el temps bufant i el rotor de la turbina segueixi exactament al Sol.

Obtenir la forma exacta, lloc i temps de l'ombra d'un aerogenerador precisa molts càlculs, però un programa informàtic eòlic podria fer-ho de forma molt precisa, inclòs en terrenys accidentats, i amb finestres de les cases de qualsevol mida i forma.

### 13.2.8. Impacte sobre la fauna

La construcció i implementació d'un aerogenerador en mig d'un medi verge té unes conseqüències devastadores a la fauna. Aquesta es veu totalment afectada pel fet de què se l'hi ha alterat el medi on habitava.

#### *13.2.8.1. Avifauna*

Els principals efectes negatius dels parcs eòlics sobre les aus són les col·lisions amb les aspes en moviment, amb la torre, o amb les infraestructures associades com les línies elèctriques d'evacuació, podent provocar la mortalitat directe. Per una part, els rotors poden causar lesions degut a les turbulències que produeixen. Per l'altra, els aerogeneradors suposen unes molèsties que comporten que les aus els evitin i fins i tot puguin provocar que deixin d'utilitzar tota la zona ocupada per un parc eòlic.

Les aus són desplaçades dels seus hàbits preferents per aquesta causa i són incapaces de trobar llocs alternatius, podent disminuir el seu èxit reproductor i de supervivència. A més, els parcs eòlics suposen una barrera per a la mobilitat de les aus, ja que fragmenten la connexió entre les àrees d'alimentació, cria i muda. Els rodejos necessaris per esquivar els parcs eòlics provoquen un major desgast energètic que poden arribar a minvar el seu estat físic.

**Figura 112. Aus travessant les pales d'aerogeneradors.**

És possible que la mortalitat de les aus pugi descendir ja que científics de la Universitat de Loughborough (U.K.) han descobert que si les turbines són de color púrpura, es deixarien de matar milers d'aus.

**Figura 113. Turbina de color púrpura.**

### *13.2.8.2. Animals terrestres*

La construcció de parcs eòlics afecta també a la fauna terrestre. Aquesta es veu totalment perjudicada, no només per l'espai que ocupa un aerogenerador, sinó per les infraestructures i les instal·lacions complementaries a aquest.

Alhora de la construcció d'un parc eòlic, cal realitzar una sèrie d' infraestructures com camins enmig del medi. Aquest, possible llar d'animals, és destrossat o alterat. També, l'enterrament de cables és un fet que perjudica greument el medi. La construcció de fonaments i excavacions per a plataformes de muntatge són altres fets perjudicials.

Els animals autòctons i migratoris pateixen un seguit de conseqüències com la pèrdua de la llar, la modificació del medi i la supervivència quan es construeix un parc eòlic.

**Figura 114. Muntatge d'un aerogenerador en un parc eòlic.**

### *13.2.8.3. Fauna marina*

La instal·lació de parcs eòlics en el mar, anomenat *offshore*, aporten un seguit d'avantatges a la fauna marina. Si és cert que poden destruir en un primer moment l'hàbitat de certes espècies autòctones, però un cop instal·lat l'aerogenerador, aquest pot servir com a hàbitat de nou. Un parc eòlic marí suposa un lloc tranquil pel peix i pels mamífers marítims en una àrea costera relativament ocupada per l'ésser humà.

Ajudaria a refer el medi contaminat i destruït per la pesca intensiva, la contaminació i l'extracció de petroli i gas. Així doncs, la implantació de parcs eòlics marins, ajudarien a augmentar la biodiversitat marina.

**Figura 115. Parc eòlic marí (*offshore*).**

*13.2.8.4. Flora*

Respecte als efectes que pot tenir sobre la flora, sembla obvi la seva escassa influència. La seva cobertura es veurà modificada en la fase de construcció del parc degut, principalment, al moviment de terres en la preparació d'accessos al parc i la realització de cimentacions pels aerogeneradors i edificis de control.

**Figura 116. Construcció d'un parc eòlic.**

## 13.3. Impacte ambiental del prototip

Tot i que l'objectiu de l'aerogenerador s'ha pensat per a poder generar energia elèctrica a partir d'una font d'energia renovable, no treu que l'energia elèctrica obtinguda al final sigui neta.

No obstant això, es pot assegurar des d'un bon principi que un cop entri l'aerogenerador en funcionament i estigui correctament emplaçat, aquest generarà energia elèctrica d'una forma molt més neta que no les generacions d'energia elèctrica que utilitzen combustibles fòssils o urani (com les centrals tèrmiques i de cicle combinat o les centrals nuclears).

Per a realitzar el disseny del prototip de l'aerogenerador ha calgut invertir una quantitat d'energia de forma inevitable. No es quantificarà l'energia invertida en el present projecte, ja que no s'ha fet un seguiment estricte, però si es mencionarà on i quan s'ha consumit.

Però no només el projecte afecta al medi en forma de consum d'energia, sinó que també té unes altres afectacions a considerar com la contaminació acústica o l'impacte visual.

### 13.3.1. Consum energètic

Des del primer dia en què s'ha plantejat realitzar el projecte, hi ha hagut de forma inevitable un consum d'energia. El fet d'utilitzar sales notablement calefactades (ó refrigerades) i adequadament il·luminades ha implicat un consum tèrmic i elèctric.

El consum elèctric també té un pes important en les hores d'utilització dels ordinadors empleats per cercar informació, simular dissenys o per redactar.

No podem obviar el fet que per realitzar el projecte ha calgut fer una sèrie de desplaçaments, tant en transport públic com en privat.

Un dels objectius futurs pel qual s'ha dissenyat l'aerogenerador és per reduir el consum energètic produït per fonts no renovables. Així doncs, en tot moment, s'ha tingut present l'estalvi energètic i s'ha contribuït en ell fent un ús adequat de les instal·lacions i objectes.

#### *13.3.1.1. Fase de disseny*

En la fase del disseny, el projecte s'ha anat portant a terme en laboratoris informàtics i biblioteques. El consum energètic ha estat ocasionat en aquest cas per la utilització d'ordinadors i il·luminació. També cal especificar que les sales estaven climatitzades per mantenir una temperatura ambient agradable.

#### *13.3.1.2. Fase de redacció de la memòria*

En aquesta fase s'ha utilitzat també laboratoris informàtics i sales de biblioteques. Totes elles il·luminades i calefactades.

### 13.3.2. Procedència dels materials

La no generació de residus és un tema que s'ha tingut en compte alhora de realitzar el projecte.

S'ha intentat aprofitar el màxim nombre de peces reciclades que ha sigut possible pel fet de què aquestes tinguin una altra utilitat i deixin de ser un residu. Però no tots els materials han pogut ser així degut a la dificultat per trobar-los en bon estat, o simplement, en trobar-los.

#### *13.3.2.1. Disc de fre*

La part que subjecte els imants ha sigut aconseguida en un desguàs. És un disc de fre usat d'algun automòbil. Degut a les propietats magnètiques dels imants, el disc de fre és idoni per subjectar aquests.

El re aprofitament del disc de fre és fonamental per la disminució d'acumulació de residus.

#### *13.3.2.2. Imants*

Els imants escollits no han sigut reutilitzats sinó que són fabricats a partir de matèries primes. El fet de què s'hagi de comprar un imant expressament pel projecte és degut a què és necessari conèixer certes propietats i característiques d'aquests com també que tots ells han de tenir les mateixes dimensions i propietats per a un funcionament correcte del generador.

#### *13.3.2.3. Cable de coure esmaltat*

Per un motiu similar al de l'apartat anterior, no s'empraria un cable de coure esmaltat reutilitzat pel fet de que les propietats no serien les mateixes que si està adquirit de primera mà.

### 13.3.3. Impacte visual

Degut a què el prototip no és emplaçat en cap lloc concret, aquest efecte no es pot avaluar en totals condicions. També, al no haver estat dissenyades les pales (possiblement l'element més visible), no es pot certificar si crea un gran o petit impacte.

El que si es pot garantir a priori, és que crearà un impacte visual ja que és un element que un cop emplaçat formarà part del paisatge urbà o rural.

# 14. VIABILITAT I ANÀLISI ECONÒMICS

## 14.1. Introducció a la viabilitat i anàlisi econòmic

La viabilitat econòmica avalua la conveniència del projecte, tenint en compte la relació entre els recursos utilitzats per a obtenir-lo i els que produeix el projecte. Així doncs, únicament es tracta d'analitzar la rendibilitat del projecte.

Altrament, en el present apartat, s'estudien els aspectes econòmics relacionats amb la construcció de la màquina de l'aerogenerador. Primer de tot caldria estimar el pressupost del projecte i a partir d'aquest estudiar la rendibilitat i el període de retorn de la inversió. Aquests dos últims aspectes només han sigut explicats sense efectuar cap càlcul degut al no tenir el pressupost de tot l'aerogenerador no serien fiables els càlculs realitzats.

## 14.2. Marc legal

El Règim Especial de producció d'energia elèctrica s'utilitza com a complement al Règim Ordinari. S'aplica a l'Estat per a la injecció a les xarxes de distribució i transport d'energia procedent del tractament de residus, la biomassa, la hidràulica, la cogeneració, la solar i l'eòlica.

La llei 80/1980 de Conservació de l'Energia va regular per primer cop aquest tipus de centrals generadores. Aquesta llei estableix els objectius de millorar l'eficiència energètica de la indústria i reduir la dependència de l'exterior.

El següent pas vas ser la creació del *Plan Estratégico Nacional 1991-2000* el qual establia un programa d'incentius per a la cogeneració i de la producció amb energies renovables per a intentar passar del 4,5 % de la producció nacional dels anys 90 fins al 10 % per a l'any 2010.

Finalment, la llei 54/1997 de 27 de novembre, del Sector Elèctric, fa compatible l'alliberació del sistema elèctric amb l'objectiu de garantir el subministrament amb una qualitat adequada, al menor preu possible i minimitzant l'impacte ambiental.

El Real Decret 661/2007, de 25 de Maig, regula actualment l'activitat de producció d'energia elèctrica en règim especial. Aquest decret estableix un nou règim jurídic i econòmic de l'activitat de producció d'energia elèctrica que substitueix al Real Decret 436/2004 de 12 de Març.

Es considera que la potència de la instal·lació és la suma de totes les potències instal·lades per a cada un dels grups. Aquest tipus d'instal·lacions es classifiquen en categories, grups i subgrups. Així el cas que ens ocupa pertany a:

Categoria b): Instal·lacions que utilitzin com a energia primària alguna de les energies renovables no consumibles, biomassa, o qualssevol tipus de biocarburant, sempre i quan el seu titular no realitzi activitats de producció en Règim Ordinari. Aquesta categoria es classifica alhora en vuit grups:

Grup b.1. Instal·lacions que utilitzin com a energia primària l'energia solar mitjançant la tecnologia fotovoltaica.

**Grup b.2. Instal·lacions que únicament utilitzin com a energia primària l'energia eòlica. Subgrups:**

**Subgrup b.2.1. Instal·lacions eòliques ubicades al terra.**
Subgrup b.2.2. Instal·lacions eòliques ubicades al mar territorial.

## 14.3. Règim econòmic

Segons la normativa en vigor, R.D. 661/2007 de 25 de maig, s'haurà d'optar per una de les dues opcions.

### 14.3.1. Cedir energia

Aquest sistema de retribució econòmica es basa en cedir l'electricitat al sistema a través de la xarxa de transport o distribució, obtenint a canvi una tarifa regulada, única per a tots els períodes de programació, expressada en c€ el kWh. Per a poder operar a tarifa regulada cal tenir en compte els punts següents:

- Complir els requisits administratius de Participació en el mercat elèctric, que apareixen al mateix Real Decret.
- Els titulars podran escollir, per períodes no inferiors a un any, l'opció de venda de la seva energia que més els hi convingui. L'elecció es comunicarà a l'empresa distribuïdora i a la Direcció General de Política Energètica i Mines.
- La tarifa reguladora consisteix en una quantitat fixa, única per a tots els períodes de programació. La tarifa vigent és la de la ITC/3801/2008 de 26 de desembre.

| Grup | Subgrup | Potència | Termini | Tarifa reguladora c€/kWh | Prima de referència c€/kWh | Límit superior c€/kWh | Límit inferior c€/kWh |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| b.1 | b1.1 | P≤100 kW | Primers 25 anys | 44,0381 | | | |
| | | | A partir de llavors | 35,2305 | | | |
| | | 100 kW <P≤10 MW | Primers 25 anys | 41,7500 | | | |
| | | | A partir de llavors | 33,4000 | | | |
| | | 10<P≤50 MW | Primers 25 anys | 22,9764 | | | |
| | | | A partir de llavors | 18,3811 | | | |
| | b1.2 | | Primers 25 anys | 26,9375 | 25,4000 | 34,3976 | 25,4038 |
| | | | A partir de llavors | 21,5498 | 20,3200 | | |
| **b.2** | **b2.1** | | **Primers 20 anys** | **7,3228** | **2,9291** | **8,4944** | **7,1275** |
| | | | **A partir de llavors** | **6,1200** | **0,0000** | | |

**Taula 13. Grup normatiu.**

### 14.3.2. Vendre energia

Aquest sistema consisteix en vendre l'electricitat al mercat de producció d'energia elèctrica. En aquest cas, el preu de venda de l'electricitat serà el preu resultant al mercat organitzat o el preu lliurement negociat pel titular de l'aerogenerador, complementat per una prima en c€/kWh. Els punts a tenir en compte són:

- Complir els requisits administratius de Participació en el mercat elèctric, que apareixen al mateix Real Decret.
- Els titulars podran escollir, per períodes no inferiors a un any, l'opció de venda de la seva energia que més els hi convingui. L'elecció es comunicarà a l'empresa distribuïdora i a la Direcció General de Política Energètica i Mines.
- La prima, per al nostre cas, s'obtindrà durant els primers 20 anys de funcionament de la nostra instal·lació. Consisteix en una quantitat addicional al preu de mercat organitzat, o del preu lliurement negociat pel titular de l'aerogenerador. La quantitat de la prima variarà en funció del preu de referència i es calcularà en franges temporals d'una hora de la forma següent:
  - Si preu del mercat de referència + prima de referència es troba entre el límit superior (8,4944 c€/kWh) i el límit inferior (7,1275 c€/kWh), el valor de la prima a rebre serà el de referència (2,9291 c€/kWh).
  - Si preu del mercat de referència + prima de referència és igual o inferior al límit inferior, el valor de la prima a rebre serà el límit inferior de la prima (7,1275 c€/kWh) – preu de l'horari de mercat de referència per a aquella hora.
  - Si preu del mercat de referència es troba entre (límit superior – prima de referència) i límit superior, el valor de la prima serà límit superior – preu de referència del mercat.
  - Si el valor del preu de mercat de referència és superior o igual al límit superior el valor de la prima serà 0 per a aquesta hora.

### 14.3.3. Conclusions

El preu de venda de l'energia varia en funció del temps. En aquest moment el kWh d'energia eòlica es paga segons la tarifa regulada a 7,3228 c€ (ITC/3801/2008 de 26 de desembre).

Per als nostres càlculs considerarem un preu fix del kWh ja que no coneixem quina serà l'evolució dels preus de l'energia durant els propers anys. Així doncs, es prendrà el preu del kWh en vigència sent aquest de 7,3228 c€.

En el cas de conèixer les dades de la producció d'energia d'hora en hora durant com a mínim un any, l'estudi es podria realitzar segons l'opció de vendre l'electricitat a la xarxa. No obstant, en cas de desconèixer-les es realitzaria segons l'opció de cedir l'electricitat.

Així, durant el primer any de producció energètica s'adoptarà l'opció de cedir l'electricitat al sistema obtenint a canvi una tarifa reguladora. Al cap de l'any com a treball futur es podria realitzar l'estudi pertinent per tal d'esbrinar si amb les produccions obtingudes durant l'any, hora en hora, resulta més avantatjosa aquesta tarifa o si cal canviar d'opció.

## 14.4. Pressupost del projecte

S'ha fet una estimació de la inversió que costaria només els components esmentats en el projecte que modelen la màquina, sense tenir en compte les hores d'enginyeria. S'ha obviat la resta de components que constitueixen l'aerogenerador degut a què no és objecte del present projecte. Així doncs s'ha obtingut el següent pressupost.

| Concepte | Unitat | Preu unitat (€) | Preu total (€) |
|---|---|---|---|
| Disc de fre. | 1 | 30,00 | 30,00 |
| Fil de coure esmaltat ARISTON d'1 mm de diàmetre. Carret de 9,9 m. | 3 | 5,99 | 17,97 |
| Disc magnètic de 45 mm de diàmetre i 10 mm d'alçada, de magnetització N35 de Supermagnete. | 10 | 11,60 | 116,00 |
| Resinar les bobines | 1 | 49,95 | 49,95 |
| | | **TOTAL** | **213,92** |

**Taula 14. Pressupost del projecte.**

El pressupost ascendeix a la quantitat de DOS-CENTS TRETZE AMB NORANTA-DOS CÈNTIMS.

## 14.5. Estudi de rendibilitat

En el present estudi, com s'ha anomenat a la introducció d'aquest capítol, l'estudi de rendibilitat es deixarà exposat per tal de només obtingudes les dades poder substituir i així trobar els anys que es triga en amortitzar l'aerogenerador i conèixer si es rentable o no.

### 14.5.1. Càlcul del cost de generació d'energia

Primer de tot es determina el preu del kWh generat per l'aerogenerador de baixa potència i així comparant-lo amb el preu del kWh subministrat per les companyies elèctriques es podrà assegurar si el projecte es rentable o no econòmicament parlant.

Coneixent la inversió inicial de tot l'aerogenerador, es calcularà la tassa interna de rendibilitat (TIR) que indica la viabilitat del projecte. La tassa interna de rendibilitat depèn de la tassa d'interès aplicada r i dels anys de vida útil de la instal·lació n. A continuació es mostra la fórmula per a calcular el TIR.

$$TIR = \frac{r_{ti}}{1 - \frac{1}{(1 + r_{ti})^n}}$$

**Equació 106. Tassa interna de rendibilitat (TIR).**

La tassa d'interès aplicada r és el tipus d'interès mig del diner en el moment de l'estudi. Aquest paràmetre fa que els costos financers associats a la inversió varïin de forma que el preu de l'energia generada sigui major o menor. En quant a la vida útil de la instal·lació n és el temps estimat de funcionament de la instal·lació, normalment aquest valor es troba entre 15 i 20 anys.

Tant mateix, la fórmula que fixa el cost de capital ($C_C$) per kWh generat serà en funció de la inversió inicial ($I_i$), de la tassa interna de rendibilitat (TIR), de la potència de la instal·lació ($P_{inst}$) i del paràmetre denominat factor de capacitat (FC) el qual representa el quocient entre l'energia produïda anualment en kWh, i la que podria produir si l'aerogenerador funcionés contínuament. D'aquesta manera s'obté:

$$C_C = \frac{I_i}{P_{inst}} \cdot \frac{TIR}{FC \cdot 8760}$$

**Equació 107. Cost de capital.**

Adjuntant el numerador dels dos termes, és a dir $I_i \cdot TIR$, s'obté el cost de capital per any i de forma similar però amb el denominador $P \cdot FC \cdot 8760$, la producció anual d'energia a la velocitat ponderada el factor de capacitat pren com a valor:

$$FC = \frac{h_{funcionament}}{h_{any}}$$

**Equació 108. Factor de capacitat.**

Per a obtenir el factor de capacitat cal estimar o conèixer les hores de funcionament de l'aerogenerador al dia i un cop conegudes substituir a la fórmula anterior. Un cop ja es coneix la tassa interna de rendibilitat i el factor de capacitat es pot calcular el cost de capital.

Finalment, el cost de generació de cada kWh ve donat per la suma dels costos de capital més els d'operació i manteniment. Dintre dels costos anuals d'operació i manteniment es poden incloure reposicions però per a simplificar es suposa que aquests costos suposen el 2 % de la inversió inicial. Per a calcular els costos d'operació i manteniment s'empra la fórmula següent:

$$C_{om} = \frac{0{,}02 \cdot I_i}{P_{inst} \cdot FC \cdot 8760}$$

**Equació 109. Costos d'operació i manteniment.**

Els costos de generació d'electricitat són la suma dels costos de capital més els d'operació i manteniment.

$$\frac{\mathrm{Pr}eu}{kWh} = C_C + C_{om}$$

**Equació 110. Costos de generació d'electricitat.**

Tenint en compte el preu de compra establert per llei, s'haurà d'arribar a la conclusió si el cost de generar 1 $kWh$ mitjançant energia eòlica és més econòmic o no.

### 14.5.2. Càlcul del període de retorn de la inversió

El període de retorn de la inversió es refereix al temps que transcorre fins que s'amortitza la inversió. Per això cal estudiar el moviment de fons durant els primers anys d'explotació de la instal·lació. El moviment de fons és la diferència entre les despeses i els ingressos que genera la inversió.

Les despeses de la instal·lació són:

- Inversió inicial.
- Despeses d'operació i manteniment.

Els ingressos que genera la instal·lació són:

- Estalvi de consum d'electricitat.

De les despeses de la instal·lació es coneix la inversió inicial. En canvi les despeses d'operació i manteniment són desconeguts. Com s'ha esmentat anteriorment es suposaran un 2 % de la inversió inicial (per a simplificar les despeses d'operació i manteniment es suposen despeses fixes i invariables per temps). Així doncs, en resum les despeses de la instal·lació són:

$$Despeses = C_{om} = 0{,}02 \cdot I_i$$

**Equació 111. Despeses de la instal·lació.**

L'estalvi de consum d'electricitat es calcula amb la factura d'electricitat anual que s'ha de pagar a la companyia elèctrica si s'utilitza el servei que ofereixen. La facturació bàsica es compon de dos termes:

- **Terme de facturació de potència:** És el producte de la potència a facturar (PF), pel preu de la potència ($t_p$), pel nombre de mesos (N).

$$TP = PF \cdot t_p \cdot N_m$$

**Equació 112. Terme de potència.**

- **Terme de facturació d'energia:** És el producte de l'energia consumida (EC) pel preu del terme de l'energia ($t_e$).

$$TE = EC \cdot t_e$$

**Equació 113. Terme d'energia.**

A aquests dos termes cal afegir el lloguer de l'aparell i el IVA sobre el total de la factura.

Els termes $t_p$ i $t_e$ venen classificats en funció de la tensió a la què es realitza el subministra i de la potència contractada amb la companyia. Conegudes les dades el preu vindrà concretat pel Real Decret (RD).

Per a calcular la factura anual d'energia és necessari calcular l'energia consumida EC per dia.

$$EC = E_{mitja} \cdot 365 = \frac{Wh}{dia} \cdot 365\,dies = \frac{kWh}{any}$$

**Equació 114. Energia consumida en un any.**

A continuació es mostra una taula que equival al format d'una factura d'electricitat. Aquesta només caldria completar-la un cop obtinguts els resultats detallats anteriorment.

| | |
|---|---|
| **Potència** | $PF \cdot t_p \cdot N_m$ |
| **Energia** | $EC \cdot t_e$ |
| **Lloguer** | $0{,}72 \cdot N_m$ |
| **Subtotal** | $PF \cdot t_p \cdot N_m + EC \cdot t_e + 0{,}72 \cdot N_m$ |
| **IVA** | $0{,}18 \cdot \left(PF \cdot t_p \cdot N_m + EC \cdot t_e + 0{,}72 \cdot N_m\right)$ |
| **Total** | $1{,}18 \cdot \left(PF \cdot t_p \cdot N_m + EC \cdot t_e + 0{,}72 \cdot N_m\right)$ |

**Taula 15. Format factura d'electricitat.**

# 15. NORMATIVA

Normativa vigent d'energia eòlica:

- UNE-EN 45510-3:1999 Guia per a la compra d'equips per a centrals elèctriques. Part 5-3: Turbines eòliques.
- UNE-EN 50308:2005 Aerogeneradors. Mesura de protecció. Requisits per al disseny, operació i manteniment.
- UNE-EN 61400-11:2004 Aerogeneradors. Part 11: Tècniques de mesura de soroll acústic.
- UNE-EN 61400-11:2004 ERRATUM Aerogeneradors. Part 11: Tècniques de mesura de soroll acústic.
- UNE-EN 61400-11:2004/A1:2009 Aerogeneradors. Part 11: Tècniques de mesura de soroll acústic.
- UNE-EN 61400-12-1:2007 Aerogeneradors. Part 12-1: Mesura de la corba de potència d'aerogeneradors productores d'electricitat (IEC 61400-12-1:2005).
- UNE-EN 61400-1:2006 Aerogeneradors. Part 1: Requisits de disseny (CEI 61400-1:2005).
- UNE-EN 61400-21:2003 Aerogeneradors. Part 21: Mesura i avaluació de les característiques de la qualitat de subministra de les turbines eòliques connectades a la xarxa.
- UNE-EN 61400-2 Aerogeneradors. Part 2: Requisits de disseny per a petits aerogeneradors. (IEC 61400-2:2006).
- UNE-IEC/TR 61400-24:2005 IN Aerogeneradors. Part 24: Protecció contra llamps.
- CEI 60050-415:1999 Vocabulari electrotècnic. Part 415: Aerogeneradors.
- CEI 61400-11:2002 Aerogeneradors. Part 11: Tècniques de mesura del soroll acústic.
- CEI 61400-11:2002/A1:2006 Aerogeneradors. Part 11: Tècniques de mesura del soroll acústic.
- CEI 61400-12-1:2005 Aerogeneradors. Part 12-1: Mesura de la corba de potència d'aerogenradors productors d'electricitat.
- CEI 61400-1:1999 Aerogeneradors. Part 1: Requisits de seguretat.
- CEI 61400-1:2005 Aerogeneradors. Part 1: Requisits de disseny.
- CEI 61400-2:1996 Aerogeneradors. Part 2: Seguretat dels aerogeneradors petits.
- CEI 61400-2:2006 Aerogeneradors. Part 2: Requisits de disseny per a petits aerogeneradors.
- CEI/TR 61400-24:2002 Aerogeneradors. Part 24: Protecció contra llamps.
- Directiva 2003/10/CE del Parlament Europeu i del Consell, del 6 de febrer de 2003, sobre les disposicions mínimes de seguretat i de salut relatives a la exposició dels treballadors als riscos derivats dels agents físics (soroll).
- Real Decret 286/2006, de 10 de març, sobre la protecció de la salut i la seguretat dels treballadors contra els riscos relacionats amb la exposició al soroll.

# 16. CONCLUSIONS

- L'energia eòlica és una font d'energia renovable que permet obtenir energia elèctrica. L'aprofitament d'aquesta es realitza mitjançant els aerogeneradors.
- Una bona implementació de l'aerogenerador pot optimitzar l'obtenció de l'energia. És necessari realitzar estudis previs per a escollir l'emplaçament i la turbina eòlica.
- L'opció de dissenyar un generador síncron emprant imants permanents ha sigut degut a la seva simplicitat constructiva. S'ha optat que incorpori imants permanents per a què aquests creïn un flux que sigui induït pels debanats.
- Les equacions del càlcul de l'àrea són valides per a obtenir l'àrea d'intersecció entre dos circumferències, de qualsevol mida, a partir d'un centre que descriu una trajectòria angular.
- El fet de què el valor de la inducció generada per l'imant s'hagi considerat en tot moment la que és generada en el centre d'aquest i s'hagi menyspreat la possible dispersió de flux, els resultats obtinguts teòrics del flux són una aproximació dels possibles resultats que es podrien obtenir experimentalment.
- La intensitat en el debanat depèn del flux, del coeficient d'autoinducció de la bobina, i del nombre de voltes d'aquesta. En el nostre disseny s'ha obtingut un valor de 1,7 mH amb una bobina d'una sola capa, 15 voltes amb un fil d'1 $mm^2$ i 4 cm de diàmetre.
- A l'optar en dissenyar un debanat de 4 cm de diàmetre i escollir un imant de 4,5 cm de diàmetre la forma de l'ona és simular a una sinusoide, però no del tot perfecte.
- Depenent la polaritat de l'imant, la forma d'ona serà positiva (si l'imant és nord) o negativa (si l'imant és sud).
- La velocitat de sincronisme és influenciada pel nombre de pols de la màquina. A l'haver-hi 5 parells de pols, la velocitat de sincronisme és de 600 rpm contemplant 50 Hz com a freqüència industrial.
- Per a què pugui crear un període de 20 ms, girant a una velocitat angular de 600 rpm, ha d'haver un decalatge entre imants. Aquest decalatge ha de ser de 36 º.
- Per poder haver-hi una connexió trifàsica, amb 5 parell de pols, cal que hi hagi un decalatge de 24 º entre les bobines.
- Una avantatge que té el disseny de què el nucli de la bobina sigui d'aire és el fet de què alhora de girar els imants no causaran sotracs com apareixerien si hi hagués ferro. Un inconvenient d'això és el fet de què el flux no quedarà concentrat en el nucli, sinó en el coure de les voltes.
- La romanència de l'imant i la magnetització, així com la distància en l'entreferro, són factors molt influenciats alhora d'obtenir un alt valor en la inducció. S'ha obtingut una inducció de 0,219 T amb l'imant de qualitat N35, 4,5 cm de diàmetre i 1 cm d'alçada, deixant un entreferro de 0,3 cm.
- El *software* MATLAB-SIMULINK ha permès generar els resultats a partir de la programació i resolució de càlculs matemàtics, havent introduït, prèviament, certs paràmetres del generador.
- L'energia obtinguda a partir d'un generador pot ser aprofitada de vàries maneres, entre elles, la possible càrrega de bateries o la connexió directa a la xarxa.

- És important escollir un tipus de manteniment ja que optimitzarà les pèrdues econòmiques i millorarà el rendiment de l'aerogenerador.
- Tot i que l'aerogenerador genera energia elèctrica a partir d'origen renovable, si que contamina en el procés de disseny, fabricació i emplaçament.
- L'aerogenerador, un cop emplaçat, causa un impacte sonor i un impacte visual que s'ha tenir en compte.
- Si s'emplaça en un lloc concret, cal tenir en compte l'impacte ambiental que causa sobre la fauna i flora de la zona. Amb uns estudis ambientals, aquests impactes podrien ser mínims.
- Es pot amortitzar l'inversió de l'arerogenerador ja que obté energia elèctrica a través d'una font d'origen renovable, ja que suposa un estalvi energètic, o una inversió econòmica pel fet d'obtenir primes.

# 17. APORTACIONS, RECOMANACIONS I FUTURS PROJECTES

## 17.1. Aportacions

- La contribució del projecte de recerca ha sigut l'obtenció de les equacions d'una màquina de flux axial emprant imants i bobines circulars. A més, s'han demostrat, mitjançant simulacions, els resultats d'aquests.
- S'ha desenvolupat un prototip de generador de flux axial per a poder generar energia elèctrica, emprant imants permanents de forma circular, així com també emprant bobines de la mateixa forma.

## 17.2. Recomanacions

- La possible millora de disseny de les bobines i dels imants podria generar noves formes d'ona, les quals permetria optimitzar resultats.
- La construcció del prototip del generador i realitzar un seguit d'assajos permetria obtenir uns resultats més fiables.

## 17.3. Futurs projectes

Com a futures línies d'investigació es proposen les següents:

- Es podria fabricar el prototip de generador dissenyat en el present projecte per comparar els resultats obtinguts mitjançant simulacions amb els resultats obtinguts mitjançant assajos.
- Escollir altres tipus d'imants i dissenyar noves formes de debanats per a obtenir diversos resultats i poder fer una comparació global amb el present projecte, per després seleccionar el més òptim.

# 18. BIBLIOGRAFIA

- **Llibres:**

Corrales Martín, Juan. *Cálculo industrial de máquina eléctricas Tomo I*. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores, 1982.

Corrales Martín, Juan. *Cálculo industrial de máquina eléctricas Tomo II*. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores, 1982.

Serrano Iribarnegaray, Luís. *Fundamentos de máquinas eléctricas rotativas*. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores, 1989.

Chapman Stephen, J. *Máquinas eléctricas*. 4a ed. México, DF: Mc Grau Hill, 2005.

Hindmarsh, John. *Electrical machines and their applications*. 4a ed., University of Southapton, UK: Bitterworth Heinemann, 1995.

Sanjurjo Navarro, Rafael. *Máquinas eléctricas*. Madrid: García-Maroto Editores, 2001.

Boix i Aragonès, Oriol; Rull i Duran Joan. *Màquines elèctriques*. 3a ed. Barcelona: Edicions UPC, 1995.

Iov, Florin; Daniela Hansen, Anca; Sorensen, Poul; Blaabjerg, Frede. *Wind Turbine Blockset in Matlab / Simulink – General Overview and Description of the Models.* Aalborg University, 2004.

- **Apunts:**

Tema 1, de l'assignatura Tècniques de Manteniment Industrial. UPC - Departament d'Enginyeria Elèctrica, Secció de Vilanova i la Geltrú.

Martínez Piera, Eusebi. Tema Circuits Magnètics, de Màquines Elèctriques I. UPC - Departament d'Enginyeria Elèctrica, Secció de Vilanova i la Geltrú.

Torrent i Burgués, Marcel. Tema Màquina Síncrona, de Màquines Elèctriques II. UPC - Departament d'Enginyeria Elèctrica, Secció de Vilanova i la Geltrú.

Blanqué i Molina, Balduí; Perat i Benavides, Ignasi; Font i Mateu, Josep; Torrent i Burgués, Marcel. Tema 3, de Sistemes Elèctrics. UPC - Departament d'Enginyeria Elèctrica, Secció de Vilanova i la Geltrú.

Perat Benavides, Jose Ignasi. Tema Rectificació monofàsica (no controlada), d'Electrònica de Potència. UPC - Departament d'Enginyeria Elèctrica, Secció de Vilanova i la Geltrú.

- **Recursos consultats via telemàtica:**

http://www.supermagnete.es/

http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/core.htm

http://www.uv.es/navasqui/

http://es.scribd.com/doc/17688203/24/Determinacion-de-la-forma-del-Rotor

http://es.scribd.com/doc/28329660/25/Rotor-Darrieux

http://www.ambientum.com/revista/2002_05/IMPACTOEOLICO1.asp

http://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/niveles.htm

http://www.monografias.com/trabajos82/aerogeneradores-generadores-electricidad-y-productores-agua/aerogeneradores-generadores-electricidad-y-productores-agua2.shtml

http://www.energiasolarok.com/2009/06/normas-vigentes-de-energia-eolica-ics.html

http://www.boe.es/boe_catalan/dias/2007/06/01/pdfs/A02567-02605.pdf

http://www.frba.utn.edu.ar/html/Electrica/archivos/Apuntes_EyM/Capitulo_6_Perdidas_y_calentamiento.pdf

http://www.ute.com.uy/empresa/entorno/Energias_Renovables/eolica/Actividad_02/Eolica_Generadores.pdf

- **Publicacions consultades en l'IEEE:**

A. Parviainen i J. Pyrhönen. "Axial Flux Permanent Magnet Generator with Concentrated Winding for Small Wind Power Applications". Publicació en l'IEEE.

D. Plat. "Permanent Magnet Synchronous Motor With Axial Flux Geometry". *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 25, No. 4, July 1989

T. F. Chan i L. L. Lai. "An Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator for a Direct-Coupled Wind-Turbine System" *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 22, No. 1, March 2007.

P. Wannakarn, T. Tanmaneeprasert, N. Rugthaicharoencheep i S. Nedphograw. "Design and Construction of Axial Flux Permanent Magnet Generator for Wind Turbine Benerated DC Voltage at Rated Power 1500 W".

B.J. Chalmers i W.Wu. "An Axial-Flux Permanent-Magnet Generator for a Gearless Wind Energy System". *IEEE Transactions on Energy Conversion,* Vol. 14, No. 2, June 1999.

# 19. ANNEX

## 19.1. Càlculs justificatius

### 19.1.1. Velocitat de sincronisme

Un paràmetre important a conèixer és la velocitat de sincronisme. Aquesta es calcula a partir de la següent fórmula:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$$

**Equació 115. Velocitat de sincronisme.**

Com que la freqüència de la xarxa és de 50 Hz i el nombre de parell de pols són 5, substituint els valors obtenim que la velocitat de sincronisme és de:

$$n_s = \frac{60 \cdot 50}{5} = 600\ r.p.m.$$

### 19.1.2. Càlcul de l'alçada de la bobina

Per a calcular l'alçada de la bobina, caldrà primer determinar el nombre d'espires que contindrà aquesta. Coneixent el nombre d'espires i el gruix, es podrà calcular l'alçada.

$$h_b = gruix \cdot N_v$$

**Equació 116. Alçada bobina.**

L'alçada és de:

$$h_b = 0{,}001 \cdot 15 = 0{,}015\ m$$

### 19.1.3. Càlcul de la longitud total del cable

Per posteriorment aïllar la resistència, o per a conèixer el preu que costaran els debanats, es necessari saber la longitud total de cable que caldrà per fabricar els debanats.

#### *19.1.3.1. Longitud del cable d'una bobina*

A partir de l'equació següent podem determinar la longitud de cable per només una bobina:

$$l_{bobina} = \sum_{i=1}^{i=n} 2 \cdot \pi \cdot r_b \cdot N_v$$

**Equació 117. Longitud cable d'una bobina.**

Substituint valors obtenim una longitud de:

$$l_{bobina} = \sum_{i=1}^{i=n} 2 \cdot \pi \cdot 0{,}02 \cdot 15 = 1{,}885\ m$$

*19.1.3.2. Longitud de cable total*

Per a conèixer la longitud de cable total, caldrà saber el nombre debanats, i coneguts aquests es pot resoldre l'equació següent:

$$l_{total} = \sum_{j=1}^{j=m} l_{bobina}$$

**Equació 118. Longitud cable per a tots els debanats.**

Substituint valors obtenim una longitud de:

$$l_{total} = \sum_{j=1}^{j=15} 1{,}885 = 28{,}27\ m$$

**Equació 119. Càlcul de la longitud cable per a tots els debanats.**

### 19.1.4. Càlcul de la inducció magnètica en el disc magnètic

Imprescindible conèixer el valor de la romanència de l'imant per conèixer el valor de la inducció. El valor que ens facilita el fabricant pot ser de 1,32 T a 1,37 T. Així doncs, s'ha procedit ha fer una mitja aritmètica, la qual utilitzarem com a valor mitjà.

$$B_r = \frac{1{,}21 - 1{,}17}{2} = 1{,}19\ T$$

Per a calcular la inducció magnètica en l'imant escollit, el fabricant ens facilita la fórmula següent:

$$B = \frac{B_r}{2}\left( \frac{h_i + z}{\sqrt{r_i^2 + (h_i + z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{r_i^2 + z^2}} \right)$$

**Equació 120. Càlcul de la inducció magnètica per un imant cilíndric.**

Substituint els valors s'obté:

$$B = \frac{1{,}19}{2}\left( \frac{0{,}01 + 0{,}003}{\sqrt{0{,}0225^2 + (0{,}01 + 0{,}003)^2}} - \frac{0{,}003}{\sqrt{0{,}0225^2 + 0{,}003^2}} \right) = 0{,}219\ T$$

### 19.1.5. Força de subjecció de l'imant per un entreferro de 0,003 m

L'imant té una força de subjecció quan està en contacte amb una superfície (que permeti imantar-s'hi), però aquesta no és la mateixa si l'imant està a una certa distància.

El proveïdor ens ha facilitat la taula de la força de subjecció, localitzat el l'apartat 5.5.1.3, en la qual es pot determinar el valor de subjecció per a l'entreferro de 3 mm. Aquest ens diu que la força de subjecció a 0 mm és d'uns 38 kg. I com s'observa a la figura, el valor de la força de subjecció a 5 mm és d'aproximadament 13 kg. Així doncs, realitzant una interpolació a 3 mm, s'obté una força de subjecció de 23 kg.

Si prenem com a valor vàlid que 1 kg es corresponen a 9,8125 N, la força de subjecció serà de 225,69 N.

### 19.1.6. Càlcul de la impedància del generador

#### *19.1.6.1. Inductància de la bobina*

Es pot conèixer el valor de la inductància a partir de la fórmula següent:

$$L = \frac{0{,}0395 \cdot N_v^{\ 2} \cdot r_b^{\ 2}}{l_{bobina}}$$

**Equació 121. Inductància.**

Substituint els valors, s'obté un valor d'inductància de:

$$L = \frac{0{,}0395 \cdot 20^2 \cdot 0{,}02^2}{1{,}885} = 0{,}0017\ H$$

#### *19.1.6.2. Reactància de la bobina*

Per a calcular la reactància de la bobina, caldrà l'equació següent:

$$X_L = j\omega L$$

**Equació 122. Reactància.**

Cal però, conèixer el valor de la pulsació:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

**Equació 123. Pulsació.**

A freqüència de sincronisme, la pulsació val:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314{,}159\ {}^{rad}\!/_{s}$$

A velocitat de sincronisme, substituint els valors, s'obté el valor de la reactància:

$$X_L = 314{,}159 \cdot 0{,}0017 = 0{,}534\ \Omega$$

Com que la connexió dels debanats està feta en sèrie, hem emprat la fórmula següent:

$$X_{Leq} = \sum_{i=1}^{i=n} X_L$$

**Equació 124. Reactància equivalent.**

Substituint valors s'obté:

$$X_{Leq} = \sum_{i=1}^{i=5} 0{,}534 = 2{,}67\ \Omega$$

*19.1.6.3. Resistència del cable*

El fet de que el material de la bobina sigui de coure, aquest oposa una resistència al pas del corrent. Aquesta resistència s'ha de tenis en compte alhora de conèixer el corrent i la tensió que podrà entregar el generador.

La resistència del cable es pot calcular a partir de la següent fórmula:

$$R_{cable} = \rho_{cu} \cdot \frac{l}{s}$$

**Equació 125. Resistència conductor elèctric.**

Al haver-hi connectades les bobines en sèrie caldrà tenir en compte la resistència equivalent que hi haurà. Així doncs, la resistència es podrà calcular a partir de la següent equació:

$$R_{eq} = \sum_{i=1}^{i=n} R_{cablei}$$

**Equació 126. Resistència equivalent.**

Substituint valors, s'obté:

$$R_{cable} = \frac{1}{56} \cdot \frac{1{,}885}{\left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot \pi} = 0{,}043\ \Omega$$

I la resistència equivalent per fase és:

$$R_{eq} = 0{,}043 \cdot 5 = 0{,}21\ \Omega$$

La resistència per a diferents temperatures es calcula a partir de la següent equació:

$$R_T = R_{eqT_e} \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_o))$$

**Equació 127. Resistència conductor elèctric a qualsevol temperatura.**

A la següent taula, es poden observar diferents valors de resistència obtinguts a diferents temperatures:

S'ha procurat donar diferents valor de temperatura per a conèixer la variació de la resistència (equivalent per fase) que adquirirà la màquina. S'ha partit de la temperatura base de 20 ºC i s'ha augmentat de 10 en 10 els graus centígrads fins als 100 ºC.

| Temperatura | Càlcul | Resistència total |
|---|---|---|
| 20 ºC | $0{,}21 \cdot (1 + 0{,}00393 \cdot (20 - 20))$ | 0,210 Ω |
| 30 ºC | $0{,}21 \cdot (1 + 0{,}00393 \cdot (30 - 20))$ | 0,218 Ω |
| 40 ºC | $0{,}21 \cdot (1 + 0{,}00393 \cdot (40 - 20))$ | 0,226 Ω |
| 50 ºC | $0{,}21 \cdot (1 + 0{,}00393 \cdot (50 - 20))$ | 0,235 Ω |
| 60 ºC | $0{,}21 \cdot (1 + 0{,}00393 \cdot (60 - 20))$ | 0,243 Ω |
| 70 ºC | $0{,}21 \cdot (1 + 0{,}00393 \cdot (70 - 20))$ | 0,251 Ω |
| 80 ºC | $0{,}21 \cdot (1 + 0{,}00393 \cdot (80 - 20))$ | 0,259 Ω |
| 90 ºC | $0{,}21 \cdot (1 + 0{,}00393 \cdot (90 - 20))$ | 0,267 Ω |
| 100 ºC | $0{,}21 \cdot (1 + 0{,}00393 \cdot (100 - 20))$ | 0,276 Ω |

**Taula 16. Valors de temperatura i resistències.**

### *19.1.6.4. Càlcul de la impedància*

Per a calcular el mòdul de la impedància estatòrica s'ha emprat la fórmula següent:

$$|z| = \sqrt{R_{eq}^{\ 2} + X_{L\,eq}^{\ 2}}$$

**Equació 128. Impedància estatòrica.**

Tant mateix, s'ha calculat l'angle de desfasament a través de la fórmula següent:

$$\beta = arctg\left(\frac{X_{L\,eq}}{R_{eq}}\right)$$

**Equació 129. Desfasament impedància estatòrica.**

Substituint els valors a les equacions anteriors, obtenim el valor absolut de la impedància estatòrica:

$$|z| = \sqrt{0{,}21^2 + 2{,}67^2} = 2{,}68\,\Omega$$

I d'angle de desfasament:

$$\beta = arctg\left(\frac{2{,}68}{0{,}21}\right) = 85{,}52\ ^{o}$$

### 19.1.7. Càlcul de les pèrdues

#### *19.1.7.1. Pèrdues per efecte Joule*

Les pèrdues per efecte Joule es calculen a partir de l'equació següent:

$$p_{cu} = \sum_{i=1}^{i=n} R_{cable} \cdot i^2$$

**Equació 130. Pèrdues al coure de l'estator per fase.**

$$p_{cu} = 0{,}251 \cdot 2{,}5^2 = 1{,}56\,W$$

#### *19.1.7.2. Pèrdues mecàniques*

Les pèrdues mecàniques, tenint en compte el coeficient mecànic del 14 % respecte la potència d'entrada es calcula a partir de l'equació següent:

$$p_{mec} = k_{mec} \cdot P_{entrada}$$

**Equació 131. Pèrdues mecàniques.**

$$p_{mec} = 0{,}14 \cdot 216{,}47 = 30{,}31\ \ W$$

#### *19.1.7.3. Pèrdues addicionals*

Les pèrdues addicionals equivalent a l'1 % de la potència d'entrada, així doncs:

$$p_{add} = P_{entrada} \cdot 1\%$$

**Equació 132. Pèrdues addicionals.**

$$p_{add} = 216{,}47 \cdot 0{,}01 = 2{,}16\,W$$

*19.1.7.4. Pèrdues totals*

Les pèrdues totals són el sumatori de totes les diferents pèrdues:

$$p_{totals} = p_{cu} + (p_{FT} + p_{HT}) + p_{mec} + p_{add}$$

**Equació 133. Pèrdues totals.**

$$p_{totals} = 1{,}56 + (0+0) + 30{,}31 + 2{,}16 = 34{,}03\,W$$

### 19.1.8. Càlcul de potències

*19.1.8.1. Potència del vent*

La potència d'entrada, tenint en compte que el radi de les pales és de 1,5 m i la velocitat del vent és de 5 m/s, la potència d'entrada és calcula a partir de la següent equació:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot \pi \cdot r^2$$

**Equació 134. Potència del vent.**

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot 1{,}225 \cdot 5^3 \cdot \pi \cdot 1{,}5^2 = 341{,}20\,W$$

*19.1.8.2. Càlcul de la potència d'entrada*

La potència d'entrada és influenciada per la constant de potència de la turbina, que en aquest cas, ha estat escollida com a 0,4.

$$P_{entrada} = P_{vent} \cdot c_p$$

**Equació 135. Potència de la turbina.**

$$P_{entrada} = 341{,}2 \cdot 0{,}4 = 216{,}47\,W$$

*19.1.8.3. Càlcul de la potència de sortida*

La potència de sortida obtinguda pel generador és la diferència entre la potència d'entrada menys les pèrdues totals d'aquest. Aquesta es troba fent ús de l'equació següent:

$$P_{sortida} = P_{entrada} - p_{totals}$$

**Equació 136. Potència de sortida del generador.**

$$P_{sortida} = 216{,}47 - 34{,}03 = 182{,}44\,W$$

### 19.1.9. Càlcul del rendiment

El rendiment ha sigut imposat per a poder conèixer el coeficient mecànic. No obstant això, respon a l'equació següent:

$$\eta = \frac{P_{sortida}}{P_{entrada}} \cdot 100\,(\%)$$

**Equació 137. Eficiència de la màquina de corrent altern.**

$$\eta = \frac{182{,}44}{216{,}47} \cdot 100 = 85\,\%$$