

ÍNDEX GENERAL

Índex memòria	11
Resum	15
Resumen	15
Abstract	15
Capítol 1: Introducció.....	17
1.1. Objecte.....	17
Capítol 2: Estudi del recurs eòlic.....	19
2.1. Introducció	19
2.2. Selecció de l'emplaçament	19
2.2.1. Descripció	19
2.2.2. Factors que afecten al funcionament del sistemes eòlics	20
2.2.3. Criteris bàsics.....	20
2.2.4. Informació necessària per a la selecció de l'emplaçament	21
2.2.5. Aspectes particulars en la selecció d'emplaçaments.....	22
2.2.6. Descripció de la disposició dels aerogeneradors segons les possibilitats del terreny (segons cota).....	22
2.2.7. Variables a tenir en compte	22
2.3. Dades meteorològiques de la zona.....	22
2.3.1. Introducció.....	22
2.3.2. Naturalesa i causes del vent.....	24
2.4. Variació a llarg termini i turbulència. Valors mitjos.....	24
2.5. Caracterització dels valors mitjos. Corbes de distribució i rosa dels vents	25
2.5.1. Distribució de Weibull	25
2.5.2. Rosa dels vents.....	26
2.5.3. Variació de la velocitat del vent amb l'alçada	26
2.6. Models d'avaluació del potencial eòlic.....	28
2.7. Variació de la velocitat del vent segons la disposició dels aerogeneradors.....	28
2.8. Diagrama a seguir per a la realització del recurs eòlic.....	28

Capítol 3: Selecció de l'aerogenerador	29
3.1. Introducció	29
3.2. Potència extraïble del vent	29
3.2.1. Potència teòrica segons alçada	29
3.2.2. Potència màxima.....	30
3.2.3. Factor de potència.....	30
3.2.4. Potència útil	30
3.3. Tecnologies de generació	30
3.4. Característiques de l'aerogenerador a	31
escollir.....	31
3.5. Models comercials.....	31
3.6. Model escollit i les seves característiques.....	31
3.7. Diagrama a seguir per a la selecció d'un.....	32
aerogenerador	32
Capítol 4: Modelització	33
4.1. Descripció	33
4.2. Nombre de generadors	34
4.3. Cost energia elèctrica	34
4.4. Cost aerogeneradors	35
4.5. Beneficis anuals	35
4.6. Mètode inversió: Pay-back, VAN, TIR	35
4.6.1. Pay-back	35
4.6.2. Valor actual net (VAN)	36
4.6.3. Taxa interna de rendibilitat (TIR)	36
4.7. Amortització	36
4.8. Diagrama a seguir per a la realització de la	37
modelització	37
Capítol 5: Xarxa de potència.....	39
5.1. Descripció general	39
5.2. Instal·lació elèctrica de Baixa Tensió.....	40
5.2.1. Connexió generador-transformador.....	41
5.2.2. Dispositius de maniobra i protecció	41
5.2.3. Transformador de BT/MT	41
5.2.4. Proteccions del transformador	42
5.3. Xarxa de mitja tensió	42
5.4. Subestació.....	43

5.4.1.	Transformador de MT/AT	43
5.4.2.	Proteccions del transformador	43
5.5.	Canalitzacions	44
5.6.	Element de mesura	44
Capítol 6: Xarxa de terres.....		45
6.1.	Aspectes generals	45
6.2.	Tensió màxima admissible pel cos humà.....	46
6.3.	Característiques del terreny.....	46
6.4.	Tensions de pas i de contacte	46
6.5.	Xarxa de terres dels transformadors de	46
	BT/MT.....	46
6.5.1.	Terra de protecció	46
6.5.2.	Terra de servei	47
6.5.3.	Tensions a l'exterior de la instal·lació.....	47
6.5.4.	Tensions a l'interior de la instal·lació	47
6.5.5.	Comprovació de les tensions de pas i contacte amb les màximes admissibles	47
6.6.	Xarxa de terres de la subestació	47
6.6.1.	Terra de protecció	47
6.6.2.	Terra de servei	47
6.6.3.	Tensions a l'exterior de la instal·lació.....	47
6.6.4.	Tensions a l'interior de la instal·lació	47
6.6.5.	Comprovació de les tensions de pas i contacte amb les màximes admissibles	47
6.7.	xarxa de terres dels aerogeneradors	48
Capítol 7: Bibliografia.....		49
7.1.	Bibliografia de consulta.....	49
Índex càlculs		53
Capítol 1: introducció		57
1.1.	Objecte.....	57
Capítol 2: Estudi del recurs eòlic.....		59
2.1.	Introducció	59

2.2.	Selecció de l'emplaçament	59
2.3.	Dades meteorològiques de la zona.....	59
2.4.	Variació a llarg termini i turbulència. Valors	59
	mitjos.....	59
2.5.	Caracterització dels valors mitjos. Corbes	60
	de distribució i rosa dels vents	60
2.6.	Models d'avaluació del potencial eòlic.....	61
2.7.	Variació de la velocitat del vent segons la	61
	disposició dels aerogeneradors.....	61
2.8.	Diagrama a seguir per a la realització del	62
	recurs eòlic.....	62
Capítol 3: Selecció de l'aerogenerador		63
3.1.	Introducció	63
3.2.	Potència extraïble del vent	63
3.3.	Tecnologies de generació	65
3.4.	Característiques de l'aerogenerador a	65
	escollir.....	65
3.5.	Models comercials.....	65
3.6.	Model escollit i les seves característiques	65
3.7.	Diagrama a seguir per a la selecció d'un.....	65
	aerogenerador	65
Capítol 4: Modelització		67
4.1.	Descripció	67
4.2.	Nombre de generadors	67
4.3.	Cost energia elèctrica	67
4.4.	Cost aerogeneradors.....	67
4.5.	Beneficis anuals	67
4.6.	Mètode inversió: Pay-back, VAN, TIR	68
4.7.	Amortització	68
4.8.	Diagrama a seguir per a la realització de la	68
	modelització	68
Capítol 5: Xarxa de potència.....		71
5.1.	Descripció general	71
5.2.	Instal·lació elèctrica de Baixa Tensió	73
5.2.1.	Connexió generador-transformador	73
5.2.2.	Dispositius de maniobra i protecció	73

5.2.3.	Transformador de BT/MT	73
5.2.4.	Proteccions del transformador	74
5.3.	Xarxa de mitja tensió	74
5.4.	Subestació.....	75
5.4.1.	Transformador de MT/AT	75
5.4.2.	Proteccions del transformador	75
5.5.	Canalitzacions	75
5.6.	Elements de mesura	75
Capítol 6: Xarxa de terres.....		77
6.1.	Aspectes generals.....	77
6.2.	Tensió màxima admissible pel cos humà.....	77
6.3.	Característiques del terreny.....	78
6.4.	Tensions de pas i de contacte	78
6.5.	Xarxa de terres dels transformadors de	79
	BT/MT.....	79
6.5.1.	Terra de protecció	79
6.5.2.	Terra de servei	79
6.5.3.	Tensions a l'exterior de la instal·lació.....	79
6.5.4.	Tensions a l'interior de la instal·lació	80
6.5.5.	Comprovació de les tensions de pas i contacte amb les màximes admissibles	80
6.6.	Xarxa de terres de la subestació	80
6.6.1.	Terra de protecció	80
6.6.2.	Terra de servei	80
6.6.3.	Tensions a l'exterior de la instal·lació.....	80
6.6.4.	Tensions a l'interior de la instal·lació	81
6.6.5.	Comprovació de les tensions de pas i contacte amb les màximes admissibles	81
6.7.	xarxa de terres dels aerogeneradors.....	81



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Memòria



"APORTACIÓ AL DISSENY DE SISTEMES EÒLICS"

PFC presentat per optar al títol d'Enginyeria Tècnica Industrial especialitat ELECTRÒNICA, ELECTRICITAT per **Anna Mora Sánchez, Pau Sebastián Arcos**

Barcelona, 17 de Juny de 2010

Directors: Jordi de la Hoz Cases
Helena Martín Cañadas
Departament EE (709)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ÍNDEX MEMÒRIA

Índex memòria	11
Resum	15
Resumen	15
Abstract	15
Capítol 1: introducció	17
1.1. Objecte	17
Capítol 2: Estudi del recurs eòlic.....	19
2.1. Introducció	19
2.2. Selecció de l'emplaçament	19
2.2.1. Descripció	19
2.2.2. Factors que afecten al funcionament del sistemes eòlics	20
2.2.3. Criteris bàsics	20
2.2.4. Informació necessària per a la selecció de l'emplaçament	21
2.2.5. Aspectes particulars en la selecció d'emplaçaments.....	22
2.2.6. Descripció de la disposició dels aerogeneradors segons les possibilitats del terreny (segons cota)	22
2.2.7. Variables a tenir en compte	22
2.3. Dades meteorològiques de la zona.....	22
2.3.1. Introducció.....	22
2.3.2. Naturalesa i causes del vent.....	24
2.4. Variació a llarg termini i turbulència. Valors	24
mitjos.....	24
2.5. Caracterització dels valors mitjos. Corbes	25
de distribució i rosa dels vents	25
2.5.1. Distribució de Weibull	25
2.5.2. Rosa dels vents.....	26
2.5.3. Variació de la velocitat del vent amb l'alçada	26
2.6. Models d'avaluació del potencial eòlic.....	28
2.7. Variació de la velocitat del vent segons la	28
disposició dels aerogeneradors.....	28
2.8. Diagrama a seguir per a la realització del	28
recurs eòlic.....	28

Capítol 3: Selecció de l'aerogenerador	29
3.1. Introducció	29
3.2. Potència extraïble del vent	29
3.2.1. Potència teòrica segons alçada	29
3.2.2. Potència màxima.....	30
3.2.3. Factor de potència.....	30
3.2.4. Potència útil	30
3.3. Tecnologies de generació	30
3.4. Característiques de l'aerogenerador a	31
escollir.....	31
3.5. Models comercials.....	31
3.6. Model escollit i les seves característiques.....	31
3.7. Diagrama a seguir per a la selecció d'un.....	32
aerogenerador	32
Capítol 4: Modelització	33
4.1. Descripció	33
4.2. Nombre de generadors	34
4.3. Cost energia elèctrica	34
4.4. Cost aerogeneradors	35
4.5. Beneficis anuals	35
4.6. Mètode inversió: Pay-back, VAN, TIR	35
4.6.1. Pay-back	35
4.6.2. Valor actual net (VAN)	36
4.6.3. Taxa interna de rendibilitat (TIR)	36
4.7. Amortització	36
4.8. Diagrama a seguir per a la realització de la	37
modelització	37
Capítol 5: Xarxa de potència.....	39
5.1. Descripció general	39
5.2. Instal·lació elèctrica de Baixa Tensió.....	40
5.2.1. Connexió generador-transformador.....	41
5.2.2. Dispositius de maniobra i protecció	41
5.2.3. Transformador de BT/MT	41
5.2.4. Proteccions del transformador	42
5.3. Xarxa de mitja tensió	42
5.4. Subestació.....	43

5.4.1.	Transformador de MT/AT	43
5.4.2.	Proteccions del transformador	43
5.5.	Canalitzacions	44
5.6.	Element de mesura	44
Capítol 6: Xarxa de terres.....		45
6.1.	Aspectes generals	45
6.2.	Tensió màxima admissible pel cos humà.....	46
6.3.	Característiques del terreny.....	46
6.4.	Tensions de pas i de contacte	46
6.5.	Xarxa de terres dels transformadors de	46
BT/MT.....		46
6.5.1.	Terra de protecció	46
6.5.2.	Terra de servei	47
6.5.3.	Tensions a l'exterior de la instal·lació.....	47
6.5.4.	Tensions a l'interior de la instal·lació	47
6.5.5.	Comprovació de les tensions de pas i contacte amb les màximes admissibles	47
6.6.	Xarxa de terres de la subestació	47
6.6.1.	Terra de protecció	47
6.6.2.	Terra de servei	47
6.6.3.	Tensions a l'exterior de la instal·lació.....	47
6.6.4.	Tensions a l'interior de la instal·lació	47
6.6.5.	Comprovació de les tensions de pas i contacte amb les màximes admissibles	47
6.7.	xarxa de terres dels aerogeneradors	48
Capítol 7: Bibliografia.....		49
7.1.	Bibliografia de consulta.....	49

RESUM

Aquest treball, Aportació al disseny d'un parc eòlic, pretén sistematitzar a través de mòduls el dissenys d'un parc eòlic. Cada mòdul té com a missió solucionar cada temàtica d'aquest estudi, entrelaçant-los successivament. Els àmbits a tractar són: recurs eòlic, selecció d'un aerogenerador, modulació, xarxa de potència i xarxa de terres. En vol realitzar un programa informàtic amb Matlab que sigui capaç de resoldre els diferents mòduls. Aquest estarà compost per una interfície usuari-programa per elecció dades d'entrada, pel programa generat i pel mostreig de resultats.

Concretament el PFC1 té com a objectiu ésser una entrega prèvia al PFC2, on en aquest últim es resoldran els aspectes ciats.

RESUMEN

Este trabajo, Aportación al diseño de un parque eólico, pretende sistematizar, a través de módulos, el diseño de un parque eólico. Cada módulo tiene como misión solucionar cada temática de este estudio, entrelazándolos successivament. Los ámbitos a tratar son: recurso eólico, selección de un aerogenerador, modulación, red de potencia y red de tierras. Se quiere realizar un programa informático con Matlab que sea capaz de resolver los diferentes módulos. Este estará compuesto por una interfaz usuario-programa para la elección de datos de entrada, por el programa generado y por el muestreo de resultados.

Concretamente el PFC1 tiene como objetivo ser una entrega previa al PFC2, dónde en este último se resolverán los aspectos citados.

ABSTRACT

This work, Contribution to the design of a wind farm, tries to systemize, across modules, the design of a wind farm. Every module has to solve each subject study, interlacing them successively. The areas to treat are: eolic resource, select an aero generator, modulation, power network and land network. We will desing a program by Matlab that would be capable to solve the different modules. This will be made by an unsuary-program interface, to choose entry values , an informatic program and a sampling result.

Concretely the PFC1 has the aim to be a delivery before PFC2, which will contains all aspects solved.

CAPÍTOL 1: INTRODUCCIÓ

1.1. Objecte

L'objecte d'aquest projecte es l'aportació al disseny d'un parc eòlic. Concretament l'objectiu és la sistematització dels diferents processos que hi tenen lloc.

Es busca facilitar el disseny amb l'ajust de diferents paràmetres que ens caracteritzin el nostre projecte. D'aquesta manera, modificant les diverses variables, podem observar els guanys o pèrdues obtingudes.

Concretament, en aquesta entrega del projecte, PFC1, es busca traçar les línies generals, igual que els límits d'estudi i la busca de solucions. Es vol dissenyar un conjunt de mòduls que donin resposta a les diferents àrees d'estudi. És a dir, es pretén dissenyar una sistematització de :

- Recurs eòlic
- Selecció aerogenerador
- Modulació

Cada apartat estarà compostat, o no, de varis mòduls. En funció de la preciso a obtenir cada grup tindrà més o menys dimensió.

D'altre banda, el treball es divideix bàsicament en les següents parts, per tal de definir altres aspectes producte de l'estudi parlat anteriorment:

- Recurs eòlic
- Selecció aerogenerador
- Modulació
- Xarxa potencia
- Xarxa terres

CAPÍTOL 2: ESTUDI DEL RECURS EÒLIC

2.1. Introducció

L'estudi del recurs eòlic de la zona on es pretén instal·lar el parc eòlic es fonamental per a conèixer la potència extraïble del vent així com l'energia que s'espera generar.

Gràcies a aquests càlculs es coneixen els valors de velocitat mitja i orientació predominant del vent a la zona, el que possibilita el càlcul de la potència esperada, obtenint així les dades per a ser tractades en el següent mòdul *selecció d'un aerogenerador*.

En aquest apartat s'explicaran els conceptes a tenir en compte per a realitzar l'estudi del recurs eòlic.

En la part de càlculs s'hi pot veure el diagrama de flux corresponent a tot el que seguidament s'explicarà.

2.2. Selecció de l'emplaçament

2.2.1. Descripció

L'objectiu és maximitzar la captació d'energia per a reduir el cost de producció. Consisteix en estimar l'energia disponible en un determinat lloc on no s'han realitzat mesures de vent referides a un període llarg de temps, o inclús, amb freqüència en llocs on no existeixen dades. En general les situacions més comunes inclouen els següents aspectes:

- Estimació dels recursos eòlics e un lloc on no existeixen registres de vent disponibles
- Estimació de l'energia eòlica a l'altura del rotor de les aeroturbines, normalment diferent de l'altura a la que estan recollides les dades.
- Estimació dels recursos eòlics referits a llarg termini en un lloc on es disposa de dades referides a un curt període de mesures.

2.2.2. Factors que afecten al funcionament del sistemes eòlics

Els factors meteorològics més importants que afecten al disseny, funcionament, emplaçament operació dels sistemes eòlics són:

- Velocitat mitjana del vent i les seves variacions diürnes, estacionals e interanuals.
- Distribució de probabilitats de velocitats.
- Variació amb l'altura de la velocitat i en menor mesura, de la direcció.
- Distribució de direccions i probabilitats de canvis bruscs de direcció.
- Variacions estacionals i diürnes de la densitat de l'aire i variacions de la densitat amb l'altura
- Caracterització de series temporals d'alts vents i de períodes de calma.
- Interaccions de les pales en parc eòlics
- Freqüències de condicions extremes de vent (tempestes, huracans, etc)
- Condicions atmosfèriques especials (gelades, arena, elevada salinitat, etc.)

2.2.3. Criteris bàsics

Els emplaçaments òptims dels aerogeneradors s'ha de seleccionar en funció dels criteris següents:

- Elevada velocitat mitja. L'emplaçament ha d'estar en un zona d'altres velocitats mitjanes i situat en terreny amb bona disposició i sense obstacles al flux de l'aire.
- Acceptables variacions diürnes i estacionals, considerant l'acoblament favorable entre el vent disponible i la necessitat de subministrament elèctric.
- Acceptables nivells de vent extrems, que afecten a la vida útil del sistema. S'han de tenir en compte les dades estadístiques per conèixer la probabilitat de superada una determinada velocitat, així com el nombre de vegades en que existeix un determinat nivell de ràfegues.
- Generalment, els llocs que es consideren com altres velocitat es pugin sintetitzar en: passos entre muntanyes en àrees d'alts gradients de pressió, llargues valls descendent de cadenes muntanyoses, plans elevats, plans i valls amb vents alts associats a forts vents de gradients de pressió. Elevacions amb bons exposició en cims de muntanyes en àrees de forts

vens d'altura, llocs costaners ben exposats en àrees de vents d'altura o forts gradients tèrmics o de pressió i llocs amb vegetació acusadament deformada per acció dels vents dominants.

2.2.4. Informació necessària per a la selecció de l'emplaçament

La informació meteorològica relacionada amb les aplicacions de l'emergència eòlica, està considerada per la Organització Meteorològica Mundial (WMO, 1981) en funció de varies fases:

- a) Fase d'exploració, que implica la prospecció eòlica general i els dissenys preliminar del sistema eòlic.
- b) Fase de planificació, que compren una detallada avaluació de l'emplaçament i del disseny del sistema eòlic
- c) Fase d'operació, que implica la predicció del vent i la avaluació operacional del sistema.

La primera d'elles constitueix la fase prèvia per emplaçaments de grans màquines, però hauria de ser l'únic nivell d'anàlisi de preinstal·lació de petites màquines.

Cadascun d'aquests procediments impliquen el següent procés:

- Prospecció eòlica general
 - a) Anàlisi a gran escala (100.000 Km² -> 10.000 Km²)
 - b) Avaluació a mitja escala (10.000 Km² -> 100 Km²)
 - c) Llista de llocs favorables.
 - d) Avaluació de llocs favorables.
 - e) Selecció d'emplaçaments.
- Avaluació d'un emplaçament predeterminat.
 - a) Determinació inicial del potencia eòlic
 - b) Avaluació de l'emplaçament
 - c) Definició de l'emplaçament

Pel primer procediment, es poden utilitzar dades d'observacions però només es aplicable a zones extenses de terreny pla on les velocitat mitjanes anuals siguin iguals o superiors a 5m/s.

El pas següent consisteix en realitzar mesures i en establir correlacions aproximades amb els observatoris pròxims, i avaluar així les característiques del potencia eòlic. Si existeix una alta correlació entre l'emplaçament i la observació de referència, aquest mètode és bastant precís, encara que s'han de considerar les variacions estacionals d velocitat i direccions del vent.

El procediment més fiable per a realitzar un emplaçament consisteix en instal·lacions mitjanes o grans, en prendre mesures de vent durant almenys un any, valorant si es representatiu i analitzar les dades per obtenir el potencial eòlic mig aprofitable. Aquest mètode és el més precís i es pot aplicar a qualsevol tipus de terreny.

2.2.5. Aspectes particulars en la selecció d'emplaçaments

En la selecció d'un emplaçament, s'ha de tenir en compte les possibles interaccions de les esteles entre aerogeneradors, la potencia total subministrada pot quedar reduïda respecte a un nombre equivalent d'unitats completament independents. No existeix un consens sobre la distància mínima desitjable entre màquines per evitar interferències.

En general, la millor disposició consisteix en ubicar el menor nombre possible d'aerogeneradors en la direcció paral·lela als vents predominants i el major nombre possible en la direcció perpendicular. Per a minimitzar els efectes d'esteles en un parc, es considera que la separació lateral mínima ha d'estar entre 3 y 5 diametres, i la separació en la direcció predominant del vent ha d'estar entre 7 i 10 diàmetres.

S'ha de fer un balanç entre que s'inclouen la disponibilitat del terreny, les despeses d'infraestructures i interconnexionat i la pèrdua d'energia que implicarien les diverses possibilitats.

2.2.6. Descripció de la disposició dels aerogeneradors segons les possibilitats del terreny (segons cota)

- d) Disposició a igual cota
- e) Disposició a diferent cota

Aquest apartat dependrà del terreny en el que es dura a terme el projecte.

2.2.7. Variables a tenir en compte

Es definirà l'emplaçament de la instal·lació, que serà triat tenint en comte:

Mapa d'implantació eòlica Catalunya

Pla d'espais d'interès natural

Recurs eòlic de la zona

Proximitat a línia de transport d'alta tensió

Guany econòmic potencial

2.3. Dades meteorològiques de la zona

2.3.1. Introducció

El primer pas per al càlcul del recurs eòlic es realitzar un estudi del règim de vents a la zona durant un període llarg de temps, aproximadament dos anys.

En el cas d'una empresa que vulgui projectar un parc eòlic, aquest primer hauria d'elaborar projecte de viabilitat que demostres que es tracta d'una zona apte per la construcció d'un parc eòlic. En el nostre cas s'han utilitzat dades cedides gratuïtament per la Xarxa d'Equipaments Meteorològics de la Generalitat de Catalunya per tal de poder realitzar l'estudi. El tracte d'aquestes dades serà el mateix que per a les dades reals de l'emplaçament d'un parc en concret. Es pretén fer una simulació amb les dades de metocat.cat.

Les dades obtingudes són:

- Velocitat mitjana vent (m/s)
- Direcció mitjana vent (graus)
- Ratxa (m/s)
- Direcció ratxa (graus)

Les dades útils que es volen obtenir de les estacions són les següents:

- Velocitat mitja diària del vent a 10m d'alçada
- Orientació predominant diària del vent
- Determinar la variabilitat del vent per escollir la tecnologia de generació

A partir d'aquestes dades corresponents a un període de temps de dos anys es realitzarà la rosa dels vents de la zona a estudiar.

Direm doncs que partim de les dades de vent i freqüència per sectors i a través d'un mòdul o procés de sistematització, recollirem les dades per a un posterior tractament d'aquestes. Val a dir que la programació es realitzarà amb el programa Matlab.

El primer pas per al càlcul del recurs eòlic es realitzar un estudi del règim de vents a la zona durant un període llarg de temps, aproximadament dos anys.

En el cas d'una empresa que vulgui projectar un parc eòlic, aquest primer hauria d'elaborar projecte de viabilitat que demostrés que es tracta d'una zona apte per la construcció d'un parc eòlic. En el nostre cas s'han utilitzat dades cedides gratuïtament per la Xarxa d'Equipaments Meteorològics de la Generalitat de Catalunya per tal de poder realitzar l'estudi. El tracte d'aquestes dades serà el mateix que per a les dades reals de l'emplaçament d'un parc en concret. Es pretén fer una simulació amb les dades de metocat.cat.

Les dades obtingudes són:

- Velocitat mitjana vent (m/s)
- Direcció mitjana vent (graus)
- Ratxa (m/s)
- Direcció ratxa (graus)
- Les dades útils que es volen obtenir de les estacions són les següents:
- Velocitat mitja diària del vent a 10m d'alçada
- Orientació predominant diària del vent
- (Determinar la variabilitat del vent per escollir la tecnologia de generació)

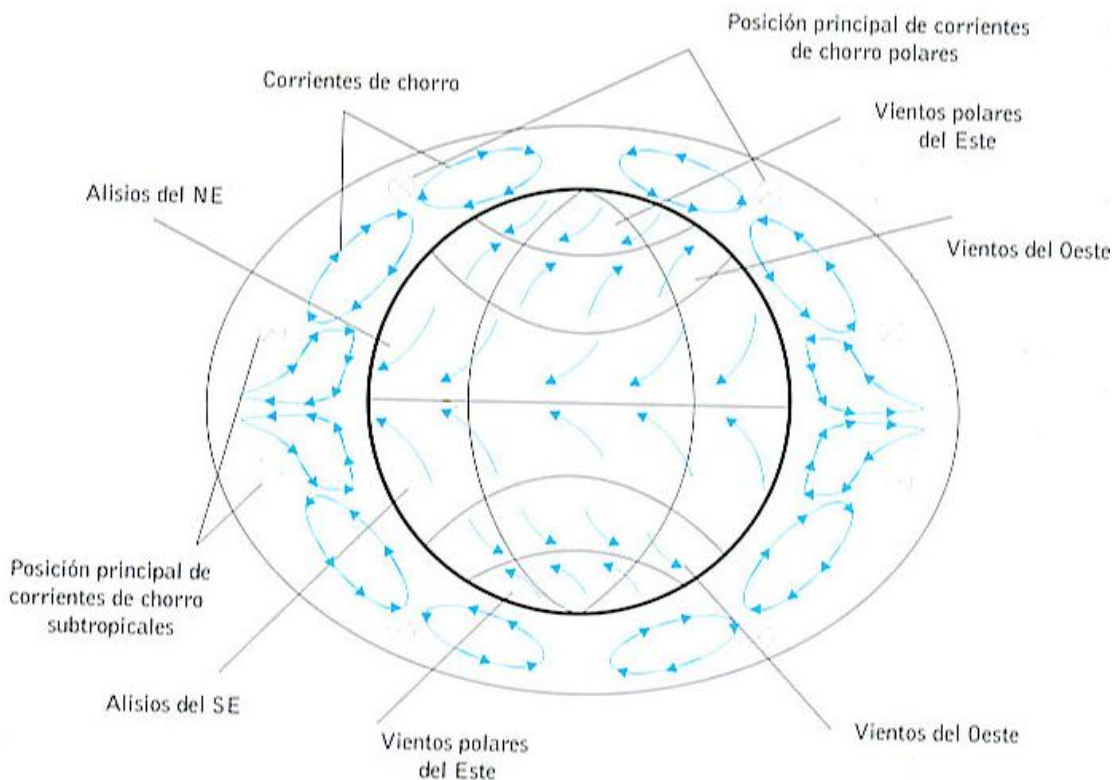
A partir d'aquestes dades corresponents a un període de temps de dos anys es realitzarà la rosa dels vents de la zona a estudiar.

Direm doncs que partim de les dades de vent i freqüència per sectors i a través d'un mòdul o procés de sistematització, recollirem les dades per a un posterior tractament d'aquestes. Val a dir que la programació es realitzarà amb el programa Matlab.

2.3.2. Naturalesa i causes del vent

El vent es genera per l'escalfament desigual que pateix la terra. Aquest és més intens més prop de l'equador i durant el dia, les zones més calentes que es mouen sobre la superfície de la terra en el seu moviment de rotació. Generalment l'aire calent puja, per després circular per la part superior de l'atmosfera i caure en les zones més fredes. A nivell de terra la circulació és en sentit invers. L'efecte combinat d'escalfament desigual de la terra i de les forces centrífugues i de Coriolis degudes a la rotació, dona lloc a vents a escala terràquica, amb unes tendències més o menys permanents.

Taula 1. Vents a escala global



2.4. Variació a llarg termini i turbulència. Valors mitjos

Una de les característiques més importants del vent és la seva variabilitat, tan espacial com temporal.

Donat que les fluctuacions turbulentes són aleatòries i requereixen un tractament estadístic, s'aconsella separar-les de les variacions de temps diàries i estacionals. La forma de fer això és considerar el valor mig de la velocitat durant un període apropiat de temps, T , i suposar al mateix temps les fluctuacions turbulentes.

Es requereix de la següent expressió pel càlcul de la velocitat mitjana:

$$v_w(t_0) = \frac{1}{T} \int_{t_0 - \frac{T}{2}}^{t_0 + \frac{T}{2}} v_{ix}(t) dt \quad (1)$$

On:

- v_w = Velocitat promig del vent
- T = Període de temps d'estudi
- v_{ix} = Velocitat instantània

2.5. Caracterització dels valors mitjos. Corbes de distribució i rosa dels vents

2.5.1. Distribució de Weibull

La distribució de Weibull és una funció distribució acumulada que permet predir la variació de la velocitat promig durant un període de temps. Així expressa la probabilitat de que la velocitat excedeixi un valor límit durant un període de temps determinat.

La expressió de la distribució de Weibull és:

$$F(V_0) = P(V_0 < V_w) = \exp\left(-\frac{V_0}{C}\right)^k \quad (2)$$

La funció de densitat de probabilitat es calcula:

$$f(V_w) = k \cdot \frac{V^{k-1}}{C^k} \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right) \quad (3)$$

Per al càlcul de la distribució de Weibull és necessari obtenir els valors dels paràmetres C y k. Aquest es poden obtenir a partir de les dades de velocitat mitjana i les freqüències de classe de cada sector.

El procediment a seguir consisteix en ajustar per mínims quadrats les dades a la recta:

$$Y = Y_0 + kX \quad (4)$$

$$Y = \ln(-\ln(F)) \quad (5)$$

$$X = \ln(V_0) \quad (6)$$

El valor del pendent de la recta correspon al paràmetre k, metre que la seva intersecció amb l'eix Y permet calcular Y_0 i així determinar C:

$$Y_0 = -k \cdot \ln(C) \quad (7)$$

Aquest apartat es merament per descriure i donar més informació sobre el vent de la zona, per no tindrà cap valor alhora de prendre la decisió sobre com, quants, quins, on,...seran els aerogeneradors, ja que els paràmetres que s'utilitzen per prendre caracteritzar-lo són la freqüència i la velocitat, cosa que no ens facilita aquesta distribució.

2.5.2. Rosa dels vents

Per a realitzar la rosa dels vents és necessari a més, un estudi estadístic de la freqüència de cada direcció del vent. S'analitzà la freqüència de la direcció del vent de cada un dels sectors anteriorment anomenats.

La rosa dels vents és un gràfic radial que permet obtenir informació sobre la velocitat i orientació del vent. Mostra les diverses orientacions i velocitats mitges del vent dividint la circumferència en varis sector. En el nostre cas s'ha decidit dividir-la en setze sectors ja que és un model més precís. Les zones es subdivideixen de la següent manera:

- Nord (N)
- Nord Nord-est (NNE)
- Nord-est (NE)
- Est Nord-est (ENE)
- Est (E)
- Est Sud-est (ESE)
- Sud-est (SE)
- Sud Sud-est (SSE)
- Sud (S)
- Sud Sud-oest (SSO)
- Sud-oest (SO)
- Oest Sud-oest (OSO)
- Oest (O)
- Oest Nord-oest (ONO)
- Nord-oest (NO)
- Nord Nord-oest (NNO)

2.5.3. Variació de la velocitat del vent amb l'alçada

El càlcul de la variació del vent amb l'alçada és important per a determinar l'alçada de la torre de l'aerogenerador i les dimensions de les pales.

La velocitat del vent augmenta amb l'alçada, però és important tenir en compte que a major alçada major és la fatiga mecànica que suporten les pales de l'aerogenerador.

Per calcular la velocitat del vent a diferents alçades es necessària l'expressió:

$$V_h = V_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad (8)$$

On:

- V_h = Velocitat del vent a l'altura escollida
- V_0 = Velocitat del vent a l'altura de referència (10m)
- h = Altura
- h_0 = Altura de referència (10m)

El paràmetre α fa referència a la rugositat del terreny i es determina amb la taula:

Taula 2. Rugositat del terreny

Tipus de terreny	Coefficient de rugositat
Gel	10 ⁻⁵ a 3·10 ⁻⁵
Aigua	10 ⁻⁴ a 3·10 ⁻⁴
Herba	10 ⁻³ a 10 ⁻²
Terreny rocós	10 ⁻² a 5·10 ⁻²
Pastures	0,1 a 0,3
Suburbis	0,5 a 1
Boscós	0,1 a 1
Ciutats	1 a 5

El procediment habitual realitza aquest càlcul per a diferents altures i presenta una taula de resultats per observar de forma clara l'altura més favorable.

Taules on es mostren les característiques tècniques del model escollit

Taula 1. Característiques del rotor

Taula 2. Característiques de les pales

Taula 3. Característiques de la torre

Taula 4. Característiques de la multiplicadora

Taula 5. Característiques del generador

2.6. Models d'avaluació del potencial eòlic

Alhora d'avaluar el recurs eòlic en una zona determinada es plantegen típicament dunes qüestions:

- A partir de mesures de vent durant un període de varis anys en una estació de mesura es vol extrapolar aquestes mesures a altres punts d'una regió (extrapolació horitzontal), o a altres nivells (extrapolació vertical).
- A partir de mesures de vent durant un període reduït, s'estén a aquestes mesures a un valor representatiu de les característiques eòliques del lloc a llarg termini (extrapolació temporal).

2.7. Variació de la velocitat del vent segons la disposició dels aerogeneradors

La disposició dels AG si el terreny és pla:

1. En files alineades: Quan hi ha una direcció dominant del vent
2. A portell: Quan hi ha no hi ha una direcció dominant del vent

La disposició dels AG si el terreny no és pla:

1. Sobre turons alineats
2. Sobre turons no alineats

Gràfic de la corba de potencia facilitat pel fabricant.

2.8. Diagrama a seguir per a la realització del recurs eòlic

La realització del diagrama tindrà lloc en l'apartat de càlculs, serà la base per la programació posterior amb el programa Matlab.

CAPÍTOL 3: SELECCIÓ DE L'AEROGENERADOR

3.1. Introducció

En aquest capítol es tractarà la selecció d'un aerogenerador, es partirà de les dades obtingudes en el recurs eòlic i s'obtidran les dades d'entrada en el mòdul de modulació del capítol següent.

3.2. Potència extraïble del vent

Per a calcular la potencia extraïble del vent s'ha de tenir en compte que, segons marca el límit de Benz, de la potencia continguda en el vent només és aprofitable el 59,26% per a la generació elèctrica.

3.2.1. Potència teòrica segons alçada

La potencia teòrica continguda en el vent ve donada per la velocitat d'aquest.

L'energia cinètica del vent és:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_w^2 \quad (9)$$

Tenint en compte que la massa d'aire per unitat de temps pot ser expressada com:

$$m = \rho \cdot AV \quad (10)$$

On A és l'àrea que abracen les pales de la turbina i ρ és la densitat de l'aire en Kg/m^3 .

Així la potencia teòrica del vent al accionar la turbina:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V_w^3 \quad (11)$$

3.2.2. Potència màxima

Com s'ha expressat anteriorment, de la potencia teòrica del vent només és aprofitable el 59.26% (16/27) segons marca el límit de Benz. De manera que la potencia màxima aprofitable es:

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{16}{27} \rho \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot V_w^3 \quad (12)$$

On D és el diàmetre de les pales de la turbina

Val a dir que en una zona ventada el diàmetre del rotor serà més petit que en una zona poc ventada.

3.2.3. Factor de potencia

La potencia màxima és el valor més favorable de potencia, si bé s'ha de calcular el factor de potencia real, segons el diàmetre de les pales de la turbina:

$$C_p = \frac{P_{\max}}{\frac{1}{2} \rho \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot V_w^3} \quad (13)$$

3.2.4. Potència útil

Finalment la potencia útil per a la generació elèctrica és:

$$P_u = P_{\max} \cdot C_p \quad (14)$$

3.3. Tecnologies de generació

Les diferents tecnologies de generació es diferencien entre elles per la velocitat a la que cadascuna pot treballar:

- Velocitat constant: La variació de la velocitat es menor al 2%. La configuració més habitual en aquest tipus de sistemes es la de generador asíncron connectat directament a la xarxa.
- Existeix també la possibilitat d'augmentar la variació de la velocitat fins al 10% mitjançant generadors asíncrons amb resistències al rotor, de manera que permet majors desviacions de lliscament.

- Velocitat variable: La configuració més habitual en aquest tipus de sistemes es la de generador asíncron doblement alimentat i la de generador síncron connectat a la xarxa mitjançant un convertidor de AC/DC.

3.4. Característiques de l'aerogenerador a escollir

Ens centrarem en escollir un AG tenint en compte que ha de ser on-shore.

Es parteix de l'altura i d'una base de dades de diferents AG, segons models i marques, que donada una alçada s'obtingui una potència.

Ens centrarem bàsicament en aquestes variables. Sempre s'hi podrà afegir un mòdul per sistematitzar el procés fent que depengui de més variables, per exemple, que ens ajudi a ajustar millor l'elecció del AG o fins i tot de cadascun dels elements que el formen.

3.5. Models comercials

Segons el resultat de l'estudi del recurs eòlic de la zona on es vol implantar el parc es determinen les característiques de l'aerogenerador a escollir.

Els resultats de l'estudi determinaran:

- L'alçada més adient, el que determinarà l'alçada de la torre de l'aerogenerador.
- La potència aprofitable a aquesta alçada, el que determinarà la potència nominal del generador.
- La variabilitat del vents, el que determinarà la tecnologia de generació a implantar.

3.6. Model escollit i les seves característiques

Es dona a conèixer el model escollit presentant les seves especificacions tècniques, junt amb tota la informació de la que es disposa de l'aerogenerador.

Es realitzarà una descripció del AG escollit a través d'unes taules on es mostren les característiques tècniques del model escollit.

Taula 1. Característiques del rotor

Taula 2. Característiques de les pales

Taula 3. Característiques de la torre

Taula 4. Característiques de la multiplicadora

Taula 5. Característiques del generador

Taula 6. Corba de potència.

3.7. Diagrama a seguir per a la selecció d'un aerogenerador

La realització del diagrama tindrà lloc en l'apartat de càlculs, serà la base per la programació posterior amb el programa Matlab.

CAPÍTOL 4: MODELITZACIÓ

4.1. Descripció

En aquest apartat es realitzarà un estudi on es buscarà una relació entre el vent i els possible guanys. Es buscarà una equació, conjunt d'equacions o procediments que representin la relació entre el vent en un punt concret i els possibles guanys.

La motivació d'incloure aquest apartat ha estat que també es vols sistematitzar, modelitzar, representar,...l'estudi econòmic com a una part del projecte. És a dir, que modificant el valor de les variables es pugui ajustar el guany final del procés.

Val a dir que no totes les parts de l'estudi de viabilitat es tractaran aquí, algunes com les següents en l'estudi econòmic:

- Cost d'inversió per legislació:
 - f) Impacte ambiental
 - g) Tràmits llicència i execució obra
 - h) Autorització administrativa
- Cost per inversió per execució d'obra:
 - i) Condicionament del terreny
 - j) Obra civil
 - k) Infraestructura elèctrica
 - l) Línea d'evacuació
 - m) Personal tècnic i mà d'obra
- Costos per explotació
 - n) Terrenys
 - o) Gestió i administració

p) Assegurances i impostos

Llavors les variables que s'estudiaran en aquest mòdul seran:

- Nombre de generadors
- Cost energia elèctrica: regulada o a mercat
- Cost aerogeneradors
- Beneficis anuals
- Mètode inversió: Pay-back, VAN, TIR
- Amortització
- ...

4.2. Nombre de generadors

Es presenten el nombre de generadors present al parc.

El nombre de generadors dependrà de totes les variables que formen part del mòdul de modelització, totes les citades anteriorment.

4.3. Cost energia elèctrica

El Real Decret 661/2007, de 25 de maig, pel qual es regula l'activitat de producció d'energia elèctrica en règim especial, en l'article 2 classifica les instal·lacions en funció del combustible utilitzat com a matèria primera.

- L'article 24 preveu dues modalitats a l'hora de vendre la energia elèctrica:
- Mitjançant una tarifa regulada, expressada en cèntims d'€ per kW.
- Vendre l'electricitat en el mercat de producció. En aquest cas el preu de venda a aplicar es el resultat del mercat organitzat, complementat amb una prima en cèntims d'€ per kW.

1) Tarifa regulada:

- 7,8183 cèntims d'€/kWh (els primers 20 anys).
- 6,5341 cèntims d'€/kWh (la resta d'anys).

2) Tarifa de mercat:

- Límit superior 9,0692 cèntims d'€/kWh.
- Límit inferior 7,6098 cèntims d'€/kWh.
- Prima de 2,9291 cèntims d'€/kWh (els 20 primers anys).

4.4. Cost aerogeneradors

Aquest és un valor fixa que vindrà determinat pel mòdul anterior anomenat *selecció d'un aerogenerador*.

4.5. Beneficis anuals

Es tracta dels guanys que obté el parc eòlic, amb el quals haurà de cobrir despeses i obtenir benefici. Serà la diferència entre els ingressos del parc i les despeses obtingudes en l'estudi de viabilitat.

Dependrà de:

- Recurs eòlic de la zona
- Selecció aerogenerador
- Finançament
- Ingressos a obtenir
- Indicadors econòmics
- ...

4.6. Mètode inversió: Pay-back, VAN, TIR

Una inversió es l'entrega de recursos econòmics amb l'objectiu de rebre a canvi uns altres recursos econòmics, renunciant a una satisfacció immediata i certa a canvi d'una espera futura que proporcioni més utilitat.

Seleccionar la inversió consisteix en decidir si un projecte ha de ser realitzat o no. Qualsevol inversió es pot definir per la corrent de costos i ingressos que origina, considerant cada un en el moment que es produeixen. Així, l'empresa ha d'avaluar totes les entrades i sortides de caixa que es produeixin com a conseqüència de la inversió, tant en l'actualitat com en el futur, per obtenir una mitja del valor de cada projecte.

Els mètodes de selecció d'inversions també serveixen per ajudar a l'empresa a comparar inversions entre si i poder escollir les millors.

Aquests mètodes clàssics es divideixen en estàtics i dinàmics, segons tinguin en compte o no el factor temps. Entre el mètodes estàtics, destaca el mètode de període de recuperació (pay-back). Els mètodes dinàmics més utilitzats son el valor capital o valor actualitzat net (VAN) i la taxa d'interès intern (TIR).

4.6.1. Pay-back

Es un mètode que consisteix en determinar quant de temps tarda en recuperar l'empresa l' inversió inicial.

El període de recuperació s'obté restant de la inversió inicial els fluxos de caixa obtinguts en anys successius, fins que els fluxos generats igualin o superin la inversió inicial.

Serveix per comparar inversions, escollint la que tingui un pay-back més curt.

4.6.2. Valor actual net (VAN)

El VAN calcula el valor actual net dels fluxos de caixa generats pel projecte i mesura la rendibilitat de les inversions realitzades.

En aquest sentit, el VAN és la suma de valors positius (ingressos) i de valors negatius (costos) que es produeixen en diferents moments.

Així doncs, es tracta d'un criteri de selecció d'inversions que té en compte el valor del diner en el temps. Donat que el valor del diner varia amb el temps, és necessari descomptar de cada període un percentatge anual estimat com a valor perdut pel diner durant el període d'inversió. Un cop descomptat aquest percentatge, es poden sumar els fluxos positius i negatius. Si el resultat és major de zero, significarà que el projecte és rendible. Si és menor de zero, no ho serà.

La fórmula per calcular el VAN és la següent:

$$VAN = -Q_0 + \frac{Q_1}{1+k} + \frac{Q_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{Q_n}{(1+k)^n} = \sum_{t=0}^n \frac{Q_t}{(1+k)^t} \quad (15)$$

4.6.3. Taxa interna de rendibilitat (TIR)

La TIR mesura la taxa interna de rendibilitat de les inversions. Es tracta també d'un criteri de selecció que té en compte el valor del diner en el temps i es defineix com el valor de la taxa d'interès o descompte que iguala el VAN a zero, és a dir, el valor que iguala els fluxos econòmics futurs amb el valor de la inversió inicial.

Per calcular-ho, s'ha d'aïllar de la fórmula del VAN o anar donant valors a i fins assolir el VAN=0.

$$VAN = -Q_0 + \frac{Q_1}{1+r} + \frac{Q_2}{r^2} + \dots + \frac{Q_n}{(1+r)^n} = \sum_{t=0}^n \frac{Q_t}{(1+r)^t} = 0 \quad (16)$$

En aquest cas, per tal que un projecte sigui rendible, s'ha de complir $TIR > i$, sent i el tipus d'interès del passiu de l'empresa.

4.7. Amortització

L'annualitat d'amortització és la quantitat de diners que s'ha d'abonar periòdicament a una entitat financera per saldar un crèdit o préstec.

$$Q_a = \frac{C_f \cdot r \cdot (1+r)^t}{(1+r)^t - 1} \quad (17)$$

C_f =Capital finançat

r =interès del préstec

t =nombre d'annualitats

4.8. Diagrama a seguir per a la realització de la modelització

La realització del diagrama tindrà lloc en l'apartat de càlculs, serà la base per la programació posterior amb el programa Matlab.

CAPÍTOL 5:

XARXA DE POTÈNCIA

5.1. Descripció general

La instal·lació elèctrica d'un parc eòlic esta formada fonamentalment per:

- Instal·lació elèctrica de Baixa Tensió:
On es troben ubicades les línies entre generador i transformador, així com les línies de serveis auxiliars i el transformador de BT/MT.
- Instal·lació elèctrica de Mitja Tensió:
Formada per la totalitat de les línies de distribució del parc en Mitja Tensió que uneixen els transformadors de BT/MT amb la subestació.
- Subestació:
On es troba el transformador de MT/AT.

Dins de la instal·lació elèctrica de baixa tensió s'admeten diferents configuracions segons la utilització del transformador de BT/MT:

- Un transformador per a cada aerogenerador:
En aquest cas cada generador disposa del seu propi transformador de BT/MT de manera que es minimitzen les pèrdues, però augmenta el cost econòmic.
El transformador pot estar ubicat a la mateixa torre de l'aerogenerador o en un edifici annex a aquesta.
- Un transformador per a diversos aerogeneradors:
En aquest cas un transformador de BT/MT dona servei a un nombre determinat de generador de manera que disminueix el cost econòmic de la instal·lació però augmenten significativament les pèrdues de energia.

Usualment per a generadors de potencia inferior a 500kW un transformador de BT/MT dona servei a diversos generadors, mentre que, per a potencies superiors

a 500kW, cada aerogenerador disposa del seu propi transformador de BT/MT ja sigui dins de la torre com en un edifici annex.

Per a la determinació de la secció de tots els conductors de la instal·lació es seguiran els tres criteris reglamentaris:

- Criteri d'intensitat màxima admissible:

La temperatura del conductor del cable, treballant a plena carrega i en regim permanent, no podrà superar en cap moment la temperatura màxima admissible assignada dels materials utilitzats per l'aïllament del cable. Aquesta temperatura s'especifica a les normes particulars dels cables i acostuma a ser de 70C per a cables amb aïllament termoplàstic i de 90C per a cables amb aïllament termostables.

- Criteri de caiguda de tensió:

La circulació de corrent a través dels conductors, ocasiona una pèrdua de potencia transportada per el cable, i una caiguda de tensió o diferencia entre les tensions en l'origen i l'extrem de la canalització. Aquesta caiguda de tensió ha de ser inferior als límits marcats pel Reglament en cada part de la instal·lació, per a garantir el funcionament dels receptor alimentats pel cable.

- Criteri de la intensitat de curtcircuit:

La temperatura a la que pot arribar el conductor del cable, com a conseqüència d'un curtcircuit o sobreintensitat de curta duració, no pot sobrepassar la temperatura màxima admissible del cable. Aquesta temperatura s'especifica a les normes particulars dels cables i acostuma a ser de 160C per a cables amb aïllament termoplàstic i 250C per a cables amb aïllament termostable.

Les expressions de càlcul necessàries per al compliment d'aquest tres criteris es presenten al document de Càlculs a l'apartat 5.1.

5.2. Instal·lació elèctrica de Baixa Tensió

La instal·lació elèctrica de baixa tensió la componen els circuits de potencia (línies entre generador i transformador) i els circuit de control i serveis auxiliars.

En tota la instal·lació elèctrica de baixa tensió els conductors compliran les següents condicions:

- Els conductors seran de coure o alumini, aïllats, i amb una tensió assignada de 0,6/1kV.
- Els cables seran no propagadors d'incendi i amb emissió de fums i opacitat reduïda.
- La secció dels cables serà uniforme en tot el seu recorregut.
- La màxima caiguda de tensió serà de 5%.

Per al càlcul de les intensitats màximes admissibles es tindrà en compte la taula 1 de la ITC-BT-19 del reglament electrotècnic de baixa tensió, així com els factors de correcció establerts a la ITC-BT-07:

- Factor de correcció per a temperatura ambient diferent de 40°C

5.2.1. Connexió generador-transformador

Línia que uneix la sortida del generador ubicat a la gòndola, amb l'entrada del transformador de BT/MT.

Els cables de connexió del generador amb el transformador han d'oferir una flexibilitat que permeti el funcionament adequat del sistema d'orientació. Per això, s'utilitzen cables amb una rigidesa mecànica classe 5 o 6.

5.2.2. Dispositius de maniobra i protecció

En aquesta línia serà necessària la instal·lació d'un interruptor automàtic principal i d'un interruptor automàtic del generador.

L'interruptor automàtic principal dona servei, i ofereix la protecció magnetotèrmica, a la línia del generador i la dels serveis auxiliars.

L'interruptor automàtic del generador dona servei a la línia del generador.

L'elecció de l'interruptor automàtic més adequat esta basada en l'ajust de les corbes de dispar i la selecció dels paràmetres de ruptura: poder assignat de tall últim en curtcircuit, poder assignat de tall de servei en curtcircuit i la sol·licitació tèrmica.

Els criteris de selecció de les proteccions seran:

- La intensitat del dispositiu es trobarà entre la intensitat nominal de la línia i la intensitat màxima admissible.
- El poder de tall de la protecció ha de ser major a la intensitat de curtcircuit màxima que es pugui produir.
- El temps de tall de les proteccions ha de ser inferior al temps que el corrent de curtcircuit provoqui un augment de la temperatura per sobre dels límits del conductor.

Les proteccions de les línies de Baixa Tensió es trobaran ubicades en un quadre de proteccions situat a una alçada de entre 1,4 i 2 m segons la ITC-BT-17.

5.2.3. Transformador de BT/MT

El transformador de BT/MT estarà ubicat dins de la torre de cada aerogenerador o en un edifici annex on podrà donar servei a un únic aerogenerador o a més d'un.

Taula 1. Comparació entre centres de transformació interiors o exteriors a la torre

	Dins de la torre	Fora de la torre
Impacte visual	No	Si
Pèrdues a la xarxa de BT	Menors	Majors
Ample de la porta de la torre	Condiciona dimensions d'equips	No influeix
Disponibilitat d'espai	Condiciona dimensions d'equips	Major
Manteniment	Necessitat de desmuntar per a substituir	Mes fàcil

Serà necessari, doncs, determinar la utilització d'un transformador per generador o be d'un transformador per a diversos aerogeneradors.

El transformador mes utilitzat en els parc eòlics espanyols es del tipus sec, amb una relació de transformació de 0,69/20kV i una connexió triangle estrella Dy11.

Els càlculs necessaris per a la determinació del transformador es troben al document de Càlculs a l'apartat 5.2.3.

5.2.4. Proteccions del transformador

La protecció de la part de BT del centre de transformació depèn de l'ubicació d'aquest. En els situats a l'interior de la torre, degut a la curta longitud del cable que uneix el quadre de BT i el transformador, a vegades no es col·loca una altre protecció. L'alternativa es instal·lar un interruptor automàtic de caixa modelada situat al quadre de BT. Aquest interruptor pot estar enclavat elèctricament amb l'interruptor de protecció del transformador en MT i va equipat amb bobina de dispar i protecció diferencial amb ajust de sensibilitat.

Per a la protecció en MT s'utilitza un interruptor-seccionador que protegeix al transformador contra sobrecarregues, associat amb un fusible que realitza la protecció contra curtcircuits.

Així mateix es disposa d'un seccionador i d'un parallamps.

Les celes modulares dissenyades a tal efecte oferiran la protecció necessària.

Els criteris a seguir per a la determinació de les característiques de les proteccions seran els presentats a l'apartat 5.2.2.

5.3. Xarxa de mitja tensió

La connexió del aerogeneradors entre sí i a la subestació del parc eòlic es realitza mitjançant una xarxa de mitja tensió subterrània per a evitar l'impacte ambiental que tindria una xarxa aèria.

Els cables utilitzats seran unipolars amb aïllament de material sintètic: polietilè reticulat o etilè propilè . El cables han de complir la norma UNE 21123 i la recomanació UNESA 3305.

El traçat de la xarxa de MT dependrà de la disposició dels aerogeneradors.

Els cables s'instal·laran directament enterrats sent l'accés als aerogeneradors sota tub de plàstic encastat en el formigó del pedestal de la cimentació.

Per a l'elecció dels conductors es seguirà la norma UNE 20435 "Guia per a l'elecció de cables d'alta tensió".

La tensió nominal del cable dependrà de la tensió nominal de la xarxa a la que està connectat i de les característiques de les seves proteccions. La norma UNE 20435/2 aporta una taula que permet seleccionar la tensió nominal del cable en funció de la tensió nominal de la xarxa i de la categoria del nivell d'aïllament.

La secció del conductor s'estableix mitjançant els tres criteris indicats a l'apartat 5.1.

5.4. Subestació

La subestació d'interconnexió de la xarxa de mitja tensió del parc eòlic amb la xarxa d'alta tensió de la companyia sol se de tipus mixt interior-intemperie, prevista per a ampliacions futures. La seva composició es: cables o embarrats de MT, cel·les de MT, transformador AT/MT i cel·les d'interior (tall, aïllament, protecció dels transformadors de mesura i protecció).

Segons el transformador a instal·lar es determinar les dimensions de l'edifici de la subestació així com de la ventilació.

5.4.1. Transformador de MT/AT

El transformador de MT/AT me utilitzat es el de tipus submergit en dielèctric líquid, amb una relació de transformació de 20/220kV i una connexió Yd11.

El càlculs necessaris per a la determinació del transformador es presenten al document de càlculs a l'apartat 5.4.1.

5.4.2. Proteccions del transformador

La protecció del transformador a la part de Mitja Tensió, segons el regim de neutre aïllat, consistirà en protecció contra sobrecarregues i curtcircuits, protecció direccional del neutre amb reenganxat incorporat. Aquestes proteccions permeten detectar faltes trifàsiques i monofàsiques en cada línia d'aerogeneradors i disparen l'interruptor automàtic de la línia de MT. El relé direccional del neutre es retarda per esperar a una possible autoextinció de la falla.

Les proteccions del transformador de la part d'Alta Tensió son:

- Interruptor automàtic+fusibles
- Parallamps
- Relé diferencial que dispara ambdós interruptors de AT i MT simultàniament.

- Relé de sobrecarrega i curtcircuit de fases i neutre amb reenganxat tant en AT com en MT, disparant cada un l'interruptor automàtic del seu nivell de tensió
- Relé de dispar i rearmament manual activat per la protecció diferencial i el relé de sobrecarregues i curtcircuits de fases i neutre de la part de MT i per la protecció amb transformador de posta a terra si existeix.

Així mateix es disposa de dos transformadors de intensitat i dos de tensió a la celda de mesura de AT.

5.5. Canalitzacions

Les canalitzacions, a la part de Baixa Tensió, de les línies entre generadors i transformadors de BT/MT consistiran en tub de PVC en muntatge superficial.

Així seguiran les condicions indicades a l'apartat 1.2 de la ITC-BT-21 i compliran amb les característiques mínimes establertes a la Taula 1.

Les canalitzacions de xarxa de Mitja Tensió tindran una profunditat mínima de 0,8 metres. Seguiran el traçat més rectilini possible i es tindran en compte els radis mínims de curvatura que poden suportar els cables sense deteriorar-se.

La rasa tindrà la amplada suficient per a permetre el treball d'un home. Sobre el fons de la rasa es col·locarà una capa de sorra o d'un material amb característiques equivalents d'espessor mínim de 5cm. Per sobre del cable es disposarà d'una altra capa de sorra de 10cm d'espessor.

5.6. Element de mesura

Per a la mesura de la energia del parc eòlic es disposa, a més de la cel·la de mesura de la subestació, d'un comptador bidireccional que mesurarà l'energia generada així com l'energia consumida per els serveis auxiliars del parc.

CAPÍTOL 6: XARXA DE TERRES

6.1. Aspectes generals

La xarxa de terres es una part essencial en les instal·lacions elèctriques i s'implanta amb l'objectiu de:

- Limitar la tensió que amb respecte a terra puguin presentar les masses metàl·liques de la instal·lació.
- Permetre l'actuació de les proteccions
- Eliminar o reduir el risc que suposa el que en una averia en el material utilitzat pogués fer transferir a la BT la tensió existent en AT.

En la xarxa de terres es diferencien dues instal·lacions:

- Xarxa de terres de protecció:
A la xarxa de terres de protecció es connecten les parts metàl·liques que normalment no estan sotmeses a tensió alguna
- Xarxa de terres de servei:
Posta a terra d'un element determinat del sistema per a permetre el seu funcionament. Principalment compren la posta a terra del neutre del transformador i del parallamps.

Les xarxes de terra de la instal·lació estaran formades per conductor nu enterrat i elèctrodes, i compliran amb les següents consideracions:

- Els conductors seran de coure o acer galvanitzat
- Els elèctrodes (piques) estaran constituïts preferentment per barres de coure amb una longitud mínima de 2 metres.

- Els elements de la instal·lació mantindran les seves característiques inalterables.
- La connexió del conductor de terra amb la presa de terra s'efectuarà de manera que no hi hagi perill de afluixar-se.
- La secció mínima del conductor principal de la terra de protecció serà de 35mm^2 en coure o de 100mm^2 en acer galvanitzat.
- La secció del conductor de la terra de servei serà de 50mm^2 en coure.

6.2. Tensió màxima admissible pel cos humà

El Reglament Electrotècnic d'Alta tensió estableix la tensió màxima admissible pel cos humà segons el temps de falla.

Aquesta tensió es aquella que es produeix entre mans i peus, i el seu càlcul es presenta al document de Càlculs a l'apartat 6.2.

6.3. Característiques del terreny

Per al càlcul de la xarxa de terres es necessari determinar dos paràmetres del terreny en el que es disposa la instal·lació:

- Resistivitat del terreny (Ωm)
- Resistivitat superficial el terreny (Ωm)

6.4. Tensions de pas i de contacte

Per a garantir que la tensió aplicada al cos humà no superi el valor màxim segons el temps de duració de la falla, es calcula la tensió de contacte entre mans i peus, mentre que per garantir que no superi 10 vegades el valor calculat es determina la tensió de pas (entre peus separats 1m)

En el cas de la tensió de pas pot ser que la resistivitat superficial de terreny sigui diferent per a cada peu. Aquesta situació es pot produir en els centres de transformació i es necessari determinar la tensió de pas en aquestes condicions.

Les expressions necessàries per al càlcul de les tensions de pas i contacte es presenten al document de Càlculs a l'apartat 6.4.

6.5. Xarxa de terres dels transformadors de

BT/MT

6.5.1. Terra de protecció

Per el càlcul de la terra de protecció es necessari determinar la resistència del sistema de posta a terra, la intensitat de defecte i la tensió de defecte.

Segons els resultats de l'apartat 6.5.1 del document de Càlculs, s'establirà:

- Configuració de la xarxa de protecció

- Profunditat
- Numero de elèctrodes i característiques

6.5.2. Terra de servei

A partir dels resultats obtinguts a l'apartat 6.5.2 del document de Càlculs es determinaran les característiques de la terra de servei.

6.5.3. Tensions a l'exterior de la instal·lació

Es mostraran les tensions de pas que es poden produir a l'exterior de la instal·lació com a resultat d'una derivació a terra.

6.5.4. Tensions a l'interior de la instal·lació

Es mostraran les tensions de contacte que es poden produir a l'interior de la instal·lació, calculades a l'apartat 6.5.4 del document de Càlculs.

6.5.5. Comprovació de les tensions de pas i contacte amb les màximes admissibles

Comprovació que els valors de tensió de pas i contacte no superen els valors límits.

6.6. Xarxa de terres de la subestació

6.6.1. Terra de protecció

Es determinaran les característiques de la terra de protecció de la subestació, calculades a l'apartat 6.6.1 de document de Càlculs.

6.6.2. Terra de servei

Es determinaran les característiques de la terra de servei de la subestació, calculades a l'apartat 6.6.2 de document de Càlculs.

6.6.3. Tensions a l'exterior de la instal·lació

Es presentarà el valor de les tensions de pas que es poden produir a l'exterior de la instal·lació

6.6.4. Tensions a l'interior de la instal·lació

Es presentaran el valor de les tensions de contacte que es poden produir a l'interior de la instal·lació

6.6.5. Comprovació de les tensions de pas i contacte amb les màximes admissibles

Es comprova que els valors de tensió de pas i contacte no superen els màxims indicats.

6.7. xarxa de terres dels aerogeneradors

Totes les parts metàl·liques internes i externes del aerogeneradors es connectaran a la xarxa de terres de protecció de transformador de BT/MT per complir el principi de equipotencialitat.

CAPÍTOL 7: BIBLIOGRAFIA

7.1. Bibliografia de consulta

Rodriguez Amenedo, José Luis, Burgos Diaz, Juan Carlos, Arnalte Gomez, Santiago. Sistemas eolicos de producción de energia electrica. Rueda 2003.

Gutiérrez Montes, José Luis, García Marí, Eugenio, Adrados Blaise-Ombrecht, Carlos, Gutiérrez Colomer, Rosa Penélope. El proyecto del centro de transformación. Universidad Politécnica de Valencia 2006.

ALSTOM <www.ecotecnia.es>

Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales i Tecnológicas. *Principios de conversión de la energia eólica*. Madrid, 2005. 1ª ed. 84-7834-492-6

Natural resources Canada <<http://www.retscreen.net/es/home.php>>

Portal d'accés obert al coneixement de la UPC <<http://upcommons.upc.edu/>>

Red electrica española <www.ree.es>

Servei Meteorologic de Catalunya <www.meteocat.net>

Siemens <www.siemens.com>

Web de l'estadística oficial de Catalunya <www.idescat.es>



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Càlculs



"APORTACIÓ AL DISSENY DE SISTEMES EÒLICS"

PFC presentat per optar al títol d'Enginyeria Tècnica Industrial especialitat ELECTRÒNICA, ELECTRICITAT per **Anna Mora Sánchez, Pau Sebastián Arcos**

Barcelona, 17 de Juny de 2010

Directors: Jordi de la Hoz Cases
Helena Martín Cañadas
Departament EE (709)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ÍNDEX CÀLCULS

Índex càlculs	53
Capítol 1: introducció	57
1.1. Objecte	57
Capítol 2: Estudi del recurs eòlic.....	59
2.1. Introducció	59
2.2. Selecció de l'emplaçament	59
2.3. Dades meteorològiques de la zona.....	59
2.4. Variació a llarg termini i turbulència. Valors mitjos.....	59
2.5. Caracterització dels valors mitjos. Corbes de distribució i rosa dels vents	60
2.6. Models d'avaluació del potencial eòlic.....	61
2.7. Variació de la velocitat del vent segons la disposició dels aerogeneradors.....	61
2.8. Diagrama a seguir per a la realització del recurs eòlic.....	62
Capítol 3: Selecció de l'aerogenerador	63
3.1. Introducció	63
3.2. Potència extraïble del vent	63
3.3. Tecnologies de generació	65
3.4. Característiques de l'aerogenerador a escollir.....	65
3.5. Models comercials.....	65
3.6. Model escollit i les seves característiques	65
3.7. Diagrama a seguir per a la selecció d'un aerogenerador	65
Capítol 4: Modelització	67
4.1. Descripció	67
4.2. Nombre de generadors	67
4.3. Cost energia elèctrica	67
4.4. Cost aerogeneradors	67

4.5.	Beneficis anuals	67
4.6.	Mètode inversió: Pay-back, VAN, TIR	68
4.7.	Amortització	68
4.8.	Diagrama a seguir per a la realització de la	68
	modelització	68
Capítol 5:	Xarxa de potència.....	71
5.1.	Descripció general	71
5.2.	Instal·lació elèctrica de Baixa Tensió	73
5.2.1.	Connexió generador-transformador	73
5.2.2.	Dispositius de maniobra i protecció	73
5.2.3.	Transformador de BT/MT	73
5.2.4.	Proteccions del transformador	74
5.3.	Xarxa de mitja tensió	74
5.4.	Subestació.....	75
5.4.1.	Transformador de MT/AT	75
5.4.2.	Proteccions del transformador	75
5.5.	Canalitzacions.....	75
5.6.	Elements de mesura	75
Capítol 6:	Xarxa de terres.....	77
6.1.	Aspectes generals.....	77
6.2.	Tensió màxima admissible pel cos humà.....	77
6.3.	Característiques del terreny.....	78
6.4.	Tensions de pas i de contacte	78
6.5.	Xarxa de terres dels transformadors de.....	79
	BT/MT.....	79
6.5.1.	Terra de protecció	79
6.5.2.	Terra de servei	79
6.5.3.	Tensions a l'exterior de la instal·lació.....	79
6.5.4.	Tensions a l'interior de la instal·lació	80
6.5.5.	Comprovació de les tensions de pas i contacte amb les màximes admissibles	80
6.6.	Xarxa de terres de la subestació	80
6.6.1.	Terra de protecció	80
6.6.2.	Terra de servei	80
6.6.3.	Tensions a l'exterior de la instal·lació.....	80
6.6.4.	Tensions a l'interior de la instal·lació	81

6.6.5. Comprovació de les tensions de pas i contacte amb les màximes admissibles	81
6.7. xarxa de terres dels aerogeneradors	81

CAPÍTOL 1: INTRODUCCIÓ

1.1. Objecte

L'objecte és la mostra de resultats de forma quantitativa, ja que ja s'ha mostrat qualitativament en la memòria.

Val a dir, que en l'entrega del PFC1 no ens serà possible la mostra resultats numèrics, però es procedirà a la generació de diagrames de flux per a cada apartat o mòdul estudiat.

De la mateixa manera, es mostraran les fórmules a utilitzar en cada capítol, de manera que quedi ben il·lustrat el procediment a realitzar posteriorment en el PFC2.

CAPÍTOL 2: ESTUDI DEL RECURS EÒLIC

2.1. Introducció

Aquest mòdul parteix de les dades atmosfèriques i finalment obté, l'alçada i la velocitat del vent necessaris.

2.2. Selecció de l'emplaçament

L'emplaçament serà escollit per l'empresa o client, en aquest cas el nostre director de projecte.

2.3. Dades meteorològiques de la zona

S'obtindran dades del servei meteorològic de la Generalitat de Catalunya. (http://www.meteo.cat/mediamb_xemec/servmet/marcs/marc_dades.html) o d'algun altre que en pugui facilitar-nos informació del vent i freqüència en l'emplaçament a estudiar. Es requereixen dades horàries, diàries, mensuals i anuals. I

2.4. Variació a llarg termini i turbulència. Valors mitjos

Per tal d'obtenir els valors mitjos es requerirà la següent expressió:

$$v_w(t_0) = \frac{1}{T} \int_{t_0 - \frac{T}{2}}^{t_0 + \frac{T}{2}} v_{ix}(t) dt \quad (1)$$

On:

- v_w = Velocitat promig del vent
- T = Període de temps d'estudi
- v_{ix} = Velocitat instantània

2.5. Caracterització dels valors mitjos. Corbes de distribució i rosa dels vents

Seràn necessaris els càlculs de la distribució de Weibull, generació del gràfic de la rosa dels vents i l'obtenció del càlcul entre l'alçada i la velocitat.

a) L'expressió de la distribució de Weibull és:

$$F(V_0) = P(V_0 < V_w) = \exp\left(-\frac{V_0}{C}\right)^k \quad (2)$$

La funció de densitat de probabilitat es calcula:

$$f(V_w) = k \cdot \frac{V^{k-1}}{C^k} \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right) \quad (3)$$

Per al càlcul de la distribució de Weibull és necessari obtenir els valors dels paràmetres C y k. Aquest es poden obtenir a partir de les dades de velocitat mitjana i les freqüències de classe de cada sector.

El procediment a seguir consisteix en ajustar per mínims quadrats les dades a la recta:

$$Y = Y_0 + kX \quad (4)$$

$$Y = \ln(-\ln(F)) \quad (5)$$

$$X = \ln(V_0) \quad (6)$$

El valor del pendent de la recta correspon al paràmetre k, metre que la seva intersecció amb l'eix Y permet calcular Y_0 i així determinar C:

$$Y_0 = -k \cdot \ln(C) \quad (7)$$

b) Es realitzarà el diagrama de la rosa dels vents amb el Matlab.

c) Per calcular la velocitat del vent a diferents alçades es necessària l'expressió:

$$V_h = V_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad (8)$$

On:

- V_h = Velocitat del vent a l'altura escollida
- V_0 = Velocitat del vent a l'altura de referència (10m)
- h = Altura
- h_0 = Altura de referència (10m)

El paràmetre α fa referència a la rugositat del terreny i es determina amb la taula:

Taula 1. Rugositat del terreny

Tipus de terreny	de	Coeficient de rugositat
Gel		10 ⁻⁵ a 3·10 ⁻⁵
Aigua		10 ⁻⁴ a 3·10 ⁻⁴
Herba		10 ⁻³ a 10 ⁻²
Terreny rocós		10 ⁻² a 5·10 ⁻²
Pastures		0,1 a 0,3
Suburbis		0,5 a 1
Boscós		0,1 a 1
Ciutats		1 a 5

2.6. Models d'avaluació del potencial eòlic

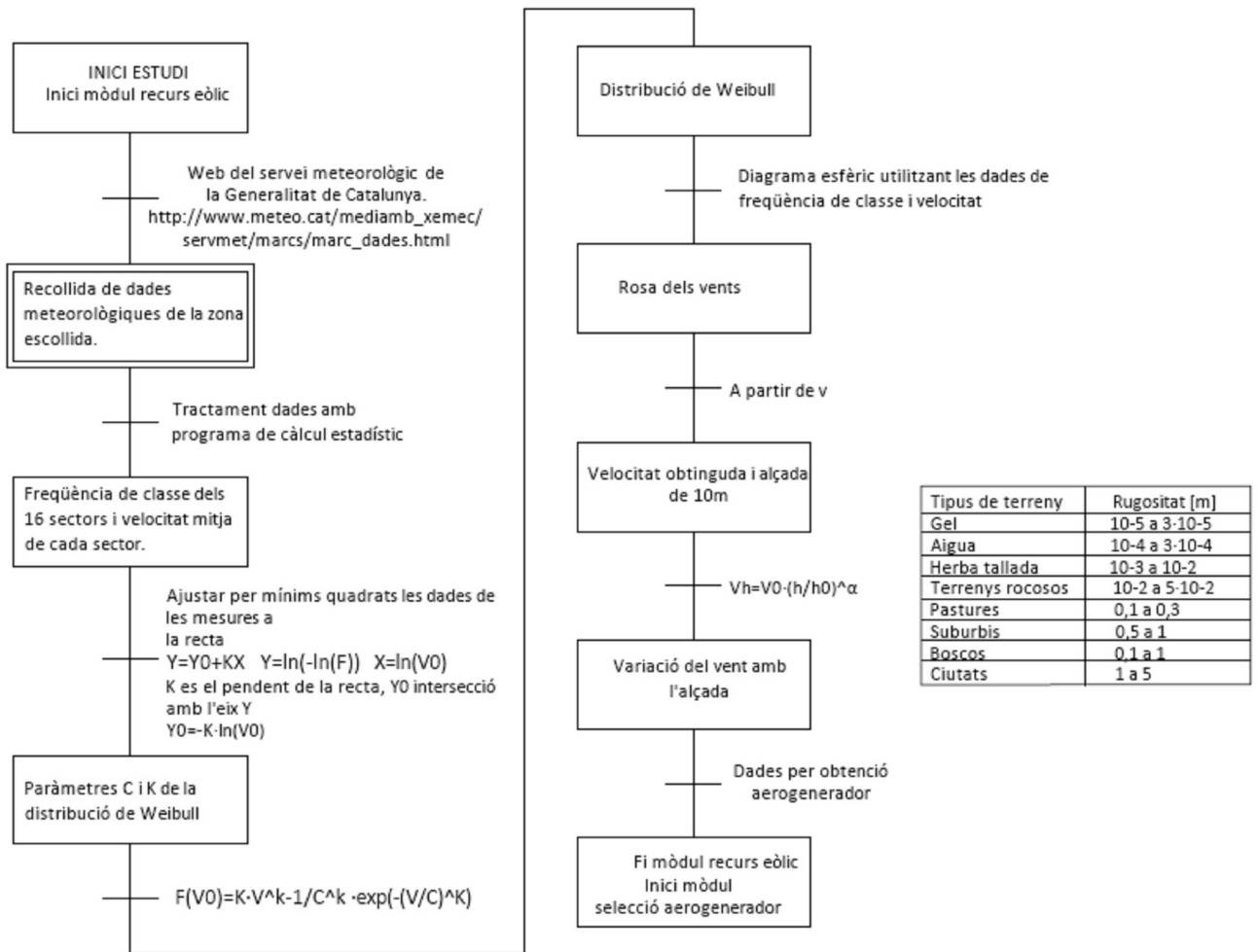
En funció de les dades obtingues el servei meteorològic de la Generalitat de Catalunya es realitzarà segons un model o altre.

2.7. Variació de la velocitat del vent segons la disposició dels aerogeneradors

Es valorarà quina es la millor disposició segons el terreny, si es té un mapa topogràfic es podrà valorar la millor opció de disposició.

2.8. Diagrama a seguir per a la realització del recurs èdic

Seguidament es mostra el diagrama de flux del mòdul *recurs èdic*:



CAPÍTOL 3: SELECCIÓ DE L'AEROGENERADOR

3.1. Introducció

En aquest capítol, es partirà de la relació altura vent per finalment obtenir un aerogenerador determinat i les seves característiques.

3.2. Potència extraïble del vent

La potencia teòrica continguda en el vent ve donada per la velocitat d'aquest.

- L'energia cinètica del vent és:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_w^2 \quad (9)$$

Tenint en compte que la massa d'aire per unitat de temps pot ser expressada com:

$$m = \rho \cdot A \cdot V \quad (10)$$

On A és l'àrea que abracen les pales de la turbina i ρ és la densitat de l'aire en Kg/m^3 .

Així la potencia teòrica del vent al accionar la turbina:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_w^3 \quad (11)$$

- *Potència màxima*

La potència màxima aprofitable és:

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V_w^3 \cdot C_p \quad (12)$$

On:

C_p =coeficient de potència

El coeficient de potència expressa la fracció de potència extreta en el rotor, i és en funció de cada màquina, de la velocitat del vent, $C_p=C_p(v)$.

El màxim teòric de C_p a partir de la teoria del rotor és 16/27 (0,59). Conegut com el Limit de Benz.

Algunes estimacions de potencial eòlic aprofitable es basen en el promig de l'expressió assumint un coeficient de potencia mitg C_p :

$$\frac{P_a}{A} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V_w^3 \cdot C_p \quad (13)$$

Un procediment més fiable es a partir de la corba característica i de la funció de probabilitats de vent 'un lloc, $p(v)$:

$$\bar{P}_a = \frac{1}{2} \rho \cdot A \int_0^{\infty} V_w^3 \cdot P(v) C_p(v) dv \quad (14)$$

El factor de capacitat, C_f , és la relació entre la potència eòlica mitja aprofitable i la potència nominal durant un període considerant:

$$C_f = \int_0^{\infty} \frac{C_p(v) \cdot V_w^3 \cdot P(v) dv}{[C_p(v_n) \cdot V_w^3]} \quad (15)$$

A vegades l'energia eòlica extraïble es pot expressar mitjanant la producció específica mitjançant "Hores equivalents de producció=(Energia total subministrada/Potencia nominal instal·lada) per a un període determinat (anual o mensual), així també es pot predir el factor de capacitat.

- *Factor de potència*

La potencia màxima és el valor més favorable de potència, si bé s'ha de calcular el factor de potencia real, segons el diàmetre de les pales de la turbina:

$$C_p = \frac{P_{\max}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot V_w^3} \quad (16)$$

- *Potència útil*

Finalment la potència útil per a la generació elèctrica és:

$$P_u = P_{\max} \cdot C_p \quad (17)$$

3.3. Tecnologies de generació

Dependrà de l'aerogenerador escollit, encara que els que hi ha majoritàriament al mercat són asíncrons.

3.4. Característiques de l'aerogenerador a escollir

Vindran determinades per l'aerogenerador escollit.

El programa contindrà un base de dades de diferents aerogeneradors amb les seves característiques, a l'escollir-ne un es mostraran les seves característiques.

3.5. Models comercials

En la base de dades dels AG anteriorment citats, formaran part de diferents models comercials per tal de poder cobrir diverses necessitats. Es pretén realitzar una base de dades heterogènia, amb una bona representació dels diferents models comercials del moment.

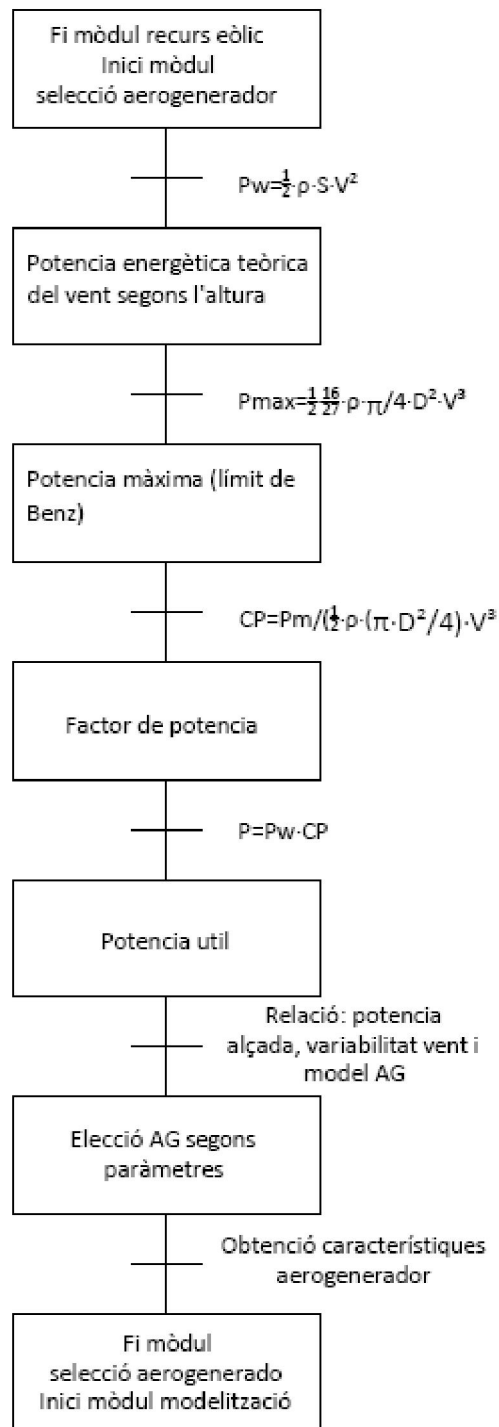
Per actualitzar el programa, només seria necessari actualitzar les bases de dades.

3.6. Model escollit i les seves característiques

Es mostrarà l'aerogenerador escollit amb les seves característiques.

3.7. Diagrama a seguir per a la selecció d'un aerogenerador

Seguidament es mostra el diagrama de flux del mòdul *selecció d'un aerogenerador*:



CAPÍTOL 4: MODELITZACIÓ

4.1. Descripció

En aquest mòdul es partirà de les característiques d'un aerogenerador fins a obtenir el guany econòmic, finançament, amortització,...finals. Es tracta d'ajustar les diferents variables que relacionen l'energia generada per una aerogenerador determinat amb el guany econòmic.

4.2. Nombre de generadors

És una variables a estudiar, amb les qual es jugarà. Com ja s'explica en la memòria, és un factor a definir en funció del guany.

4.3. Cost energia elèctrica

Ve fixat pel BOE núm. 315. Es realitzarà l'estudi per tarifa regulada i per tarifa de mercat, per finalment veure quina és la que obté més beneficis.

4.4. Cost aerogeneradors

És un valor donat per la selecció d'un aerogenerador, on es valoraran les diferents característiques d'aquest per tal d'aconseguir el millor paràmetre qualitat/preu.

4.5. Beneficis anuals

Es tracta d'un càlcul molt simple, es farà la diferència entre els ingressos i les despeses. Unes despeses vindran donades pel pressupost i d'altres per variables escollides en el mateix mòdul o programa informàtic que es dissenyarà. Els

ingressos seran una variable a estudiar en aquest mòdul, que estarà caracteritzada per diferents paràmetres.

4.6. Mètode inversió: Pay-back, VAN, TIR

a) Amb el mètode Pay-back: El període de recuperació s'obté restant de la inversió inicial els fluxos de caixa obtinguts en anys successius, fins que els fluxos generats igualin o superin la inversió inicial.

b) Amb el mètode VAN:

$$VAN = -Q_0 + \frac{Q_1}{1+k} + \frac{Q_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{Q_n}{(1+k)^n} = \sum_{t=0}^n \frac{Q_t}{(1+k)^t} \quad (18)$$

c) Amb el mètode TIR:

$$VAN = -Q_0 + \frac{Q_1}{1+r} + \frac{Q_2}{r^2} + \dots + \frac{Q_n}{(1+r)^n} = \sum_{t=0}^n \frac{Q_t}{(1+r)^t} = 0 \quad (19)$$

4.7. Amortització

Es tracta d'una altra variable d'aquest mòdul, es caracteritza amb la següent equació:

$$Q_a = \frac{C_f \cdot r \cdot (1+r)^t}{(1+r)^t - 1} \quad (20)$$

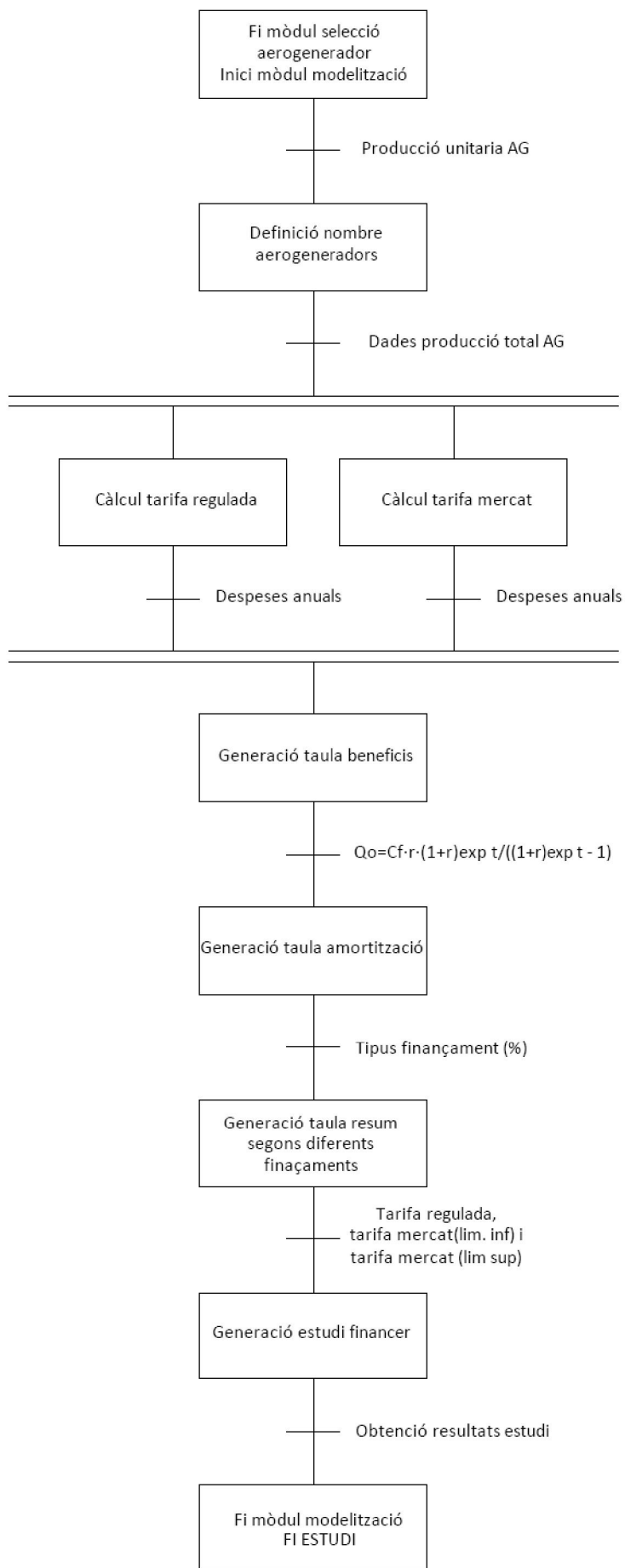
C_f =Capital finançat

r =interès del préstec

t =nombre d'anualitats

4.8. Diagrama a seguir per a la realització de la modelització

Seguidament es mostra el diagrama de flux del mòdul *modelització*:



CAPÍTOL 5:

XARXA DE POTÈNCIA

5.1. Descripció general

Segons la potencia nominal dels aerogeneradors del parc eòlic es necessari determinar les seccions de les diverses línies així com les seves proteccions i les característiques dels transformadors necessaris.

Es presentaran, doncs, en cada apartat de la xarxa de potencia, els càlculs realitzats i els resultats obtinguts.

Les expressions necessàries per a determinar la secció dels conductors en tota la instal·lació seguint els criteris establerts a la memòria son:

- Expressions necessàries segons criteri d'intensitat màxima admissible:

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V_n \cdot \cos\varphi} \quad (21)$$

$$T = T_0 + (T_{\max} - T_0) \left(\frac{I_n}{I_{\max}} \right)^2 \quad (22)$$

On:

- I_n = Intensitat nominal (A)
- V_n = Tensió nominal (V)
- P_n = Potència nominal (W)
- $\cos\varphi$ = Factor de potència
- T = Temperatura real estimada en el conductor (°C)
- T_0 = Temperatura ambient (°C)

- T_{\max} = Temperatura màxima admissible per el conductor segons el tipus d'aïllament
 - I_{\max} = Intensitat màxima admissible per el conductor (A)
- Expressions necessàries segons criteri de màxima caiguda de tensió:

$$\Delta V_{III} = (R + X \cdot \tan \varphi) \left(\frac{P_n}{V_n} \right) \quad (23)$$

$$R = c \cdot R_{icc} = c \cdot \rho_{\theta} \cdot \frac{L}{S} \quad (24)$$

$$\rho_{\theta} = \rho_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta - 20)] \quad (25)$$

On:

- ΔV_{III} = Caiguda de tensió en circuit trifàsic (V)
 - R = Resistència de la línia (Ω)
 - X = Reactància de línia (Ω)
 - c = Increment de la resistència en alterna ($c=1,2$)
 - R_{icc} = Resistència del conductor en corrent continu (Ω)
 - L = Longitud de la línia (m)
 - S = Secció de la línia (mm^2)
 - ρ_{θ} = Resistivitat del conductor a temperatura θ ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)
 - ρ_{20} = Resistivitat del conductor a 20°C ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)
 - α = coeficient de variació de resistència específica per temperatura del conductor
- Expressions necessàries segons el criteri de intensitat de curtcircuit:

$$S > \frac{I_{cc} \cdot \sqrt{t}}{K} \quad (26)$$

On:

- I_{cc} = Intensitat de curtcircuit (A)
- t = Temps de dispar de les proteccions (s)
- K = Coeficient tèrmic del conductor

$$I_{cc} = \frac{0,8 \cdot V}{R} \quad (27)$$

$$S = \frac{c \cdot \rho_{\theta} \cdot P_n \cdot L}{\Delta V_{III} \cdot V_n} \quad (28)$$

5.2. Instal·lació elèctrica de Baixa Tensió

A partir de la potència de l'aerogenerador es determina la secció de la línia de connexió entre generador i transformador i les seves característiques.

5.2.1. Connexió generador-transformador

Seguint les expressions de càlcul necessàries pel compliment del tres criteris es determinarà la secció de línia, la intensitat nominal i màxima admissible i la caiguda de tensió.

5.2.2. Dispositius de maniobra i protecció

Per a la determinació de les característiques dels elements de protecció indicats a l'apartat 5.2.2 de la memòria, es seguiran els criteris de selecció indicats al mateix apartat.

Serà necessària la següent expressió per al compliment de l'últim criteri:

$$\sqrt{t} = k \cdot \frac{S}{I_{cc}} \quad (29)$$

Així es determinarà per a cada protecció la seva intensitat nominal, el seu poder de tall i la seva sensibilitat.

5.2.3. Transformador de BT/MT

La potència del transformador be determinada per la potència de l'aerogenerador, mentre que la relació de transformació es de 0,69/20kV amb una connexió triangle estrella Dy11.

Els càlculs necessaris per a l'elecció del transformador de BT/MT son:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot r_t \quad (30)$$

$$P_p = \sqrt{3} \cdot V_{LP} \cdot I_{LP} \cdot \cos \varphi_p \quad (31)$$

$$P_s = \sqrt{3} \cdot V_{LS} \cdot I_{LS} \cdot \cos \varphi_s \quad (32)$$

$$\eta = \frac{P_s}{P_p} \cdot 100 \quad (33)$$

Suposant transformador ideal:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{I_{LS}}{I_{LP}} \quad (34)$$

$$S = \sqrt{3} \cdot V_{LS} \cdot I_{LS} \quad (35)$$

On:

- r_t = relació de transformació
- V_{LP} = tensió de línia en el primari
- V_{FP} = tensió de fase en el primari
- V_{LS} = tensió de línia en el secundari
- V_{FS} = tensió de fase en el secundari
- I_{LP} = Intensitat de línia en el primari
- I_{LS} = Intensitat de línia en el secundari
- P_p = Potencia en el primari
- P_s = Potencia en el secundari
- $\cos\varphi_p$ = factor de potencia del primari
- $\cos\varphi_s$ = factor de potencia del secundari
- η = rendiment del transformador
- S = potencia aparent del transformador

5.2.4. Proteccions del transformador

Per a la determinació de les característiques dels elements de protecció indicats a l'apartat 5.2.4 de la memòria, es seguiran els criteris de selecció indicats a l'apartat 5.2.2 de la memòria.

Així es determinarà per a cada protecció la seva intensitat nominal, el seu poder de tall i la seva sensibilitat.

5.3. Xarxa de mitja tensió

Per a la determinació de les seccions dels conductors de mitja tensió es seguiran els criteris i expressions indicats a l'apartat 5.1.

Es determinarà per a cada tram de la xarxa de mitja tensió:

- Secció del conductor a instal·lar
- Intensitat nominal
- Intensitat màxima admissible
- Caiguda de tensió

5.4. Subestació

5.4.1. Transformador de MT/AT

La relació de transformació del transformador de MT/AT es de 20/220kV amb una connexió yd11.

Les expressions necessàries per el càlcul del transformador de MT/AT son:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \sqrt{3} \cdot r_t \quad (36)$$

$$P_p = \sqrt{3} \cdot V_{LP} \cdot I_{LP} \cdot \cos \varphi_p \quad (37)$$

$$P_s = \sqrt{3} \cdot V_{LS} \cdot I_{LS} \cdot \cos \varphi_s \quad (38)$$

$$\eta = \frac{P_s}{P_p} \cdot 100 \quad (39)$$

Suposant transformador ideal:

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{I_{LS}}{I_{LP}} \quad (40)$$

$$S = \sqrt{3} \cdot V_{LS} \cdot I_{LS} \quad (41)$$

5.4.2. Proteccions del transformador

Es seguiran els criteris establerts a l'apartat 5.2.2 de la memòria per a determinar les característiques de les proteccions necessàries del transformador.

5.5. Canalitzacions

El diàmetre dels tubs de les línies de Baixa Tensió estarà determinat per la secció dels conductors allotjats al seu interior.

Les dimensions de les rases per les que recorreran les línies de Mitja Tensió seguiran les condicions establertes a l'apartat 5.5 de la Memòria.

5.6. Elements de mesura

Es determinaran les característiques del elements de mesura segons la intensitat nominal de la línia d'Alta Tensió .

CAPÍTOL 6: XARXA DE TERRES

6.1. Aspectes generals

A partir de la tensió nominal de la instal·lació i del temps d'actuació de les proteccions es determinaran les característiques de les terres de protecció i servei.

Per al càlcul de la xarxa de terres, se segueix el mètode desenvolupat per la Comissió de Reglaments d' UNESA: " Método de cálculo y proyecto de instalaciones de puesta a tierra para centros de transformación de tercera categoría".

6.2. Tensió màxima admissible pel cos humà

La tensió màxima admissible en el cos humà entre mans i peus be terminada per l'expressió:

$$V_{ca} = \frac{K}{t^n} \quad (42)$$

On:

- V_{ca} = Tensió aplicada (V)
- t = Duració de la falta (s)
- K, n = Constants en funció del temps

Taula 2. Tensió en funció del temps de falta

Temps de falta (s)	K	n	V_{ca} (V)
$0,9 \geq t > 0,1$	72	1	$V_{ca} = \frac{K}{t^n}$
$3 \geq t > 0,9$	78,5	0,18	$V_{ca} = \frac{K}{t^n}$
$5 \geq t > 3$			64
$t > 5$			50

6.3. Característiques del terreny

Es presentaran les característiques del terreny necessàries per al càlcul de les tensions de pas i contacte.

6.4. Tensions de pas i de contacte

Les expressions per al càlcul de les tensions de pas i contacte màximes son:

$$V_c = \frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{1,5 \cdot \rho_s}{1000} \right) \quad (43)$$

$$V_p = \frac{10K}{t^n} \left(1 + \frac{6 \cdot \rho_s}{1000} \right) \quad (44)$$

On:

- V_c = Tensió de contacte (V)
- V_p = Tensió de pas (V)
- ρ_s = Resistivitat superficial el terreny (Ωm)

L'expressió necessària en el cas que la resistivitat del terreny sigui diferent en cada peu es:

$$V_{p(acc)} = \frac{10K}{t^n} \left(1 + \frac{3\rho_s + 3\rho'_s}{1000} \right) \quad (45)$$

6.5. Xarxa de terres dels transformadors de BT/MT

6.5.1. Terra de protecció

Les expressions necessàries per al seu càlcul seran:

$$R_t = K_r \cdot \rho \quad (46)$$

$$I_d = \frac{V}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R_n + R_t)^2 + X_n^2}} \quad (47)$$

$$V_d = R_t \cdot I_d \quad (48)$$

On:

- R_t = Resistència del sistema de posta a terra (Ω)
- ρ = Resistivitat del terreny (Ωm)
- I_d = Intensitat de defecte (A)
- R_n = Resistència de posta a terra del neutre (Ω)
- V_d = Tensió de defecte (V)
- X_n = Reactància de la posta de terres del neutre (Ω)

En el cas mes favorable es pot suposar $R_n=0$ i $X_n= 25$, de manera que:

$$I_d = \frac{V}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_t^2 + 25^2}} \quad (49)$$

Seguint el mètode anteriorment indicat, es necessari escollir un format de geometria de la instal·lació de posta a terra de protecció, i obtenir el paràmetres característics K_r , K_p i K_c que permeten calcular les expressions anteriors.

6.5.2. Terra de servei

A partir de les expressions indicades a la terra de protecció, es necessari escollir una geometria per a obtenir el paràmetre K_r i així determinat la resistència de posta a terra del neutre.

$$R_n = K_r \cdot \rho \quad (50)$$

6.5.3. Tensions a l'exterior de la instal·lació

Les tensions de pas que es poden presentar a l'exterior de la instal·lació es determinen mitjançant la següent fórmula:

$$V_p = K_p \cdot \rho \cdot I_d \quad (51)$$

6.5.4. Tensions a l'interior de la instal·lació

Les tensions de contacte que es poden presentar a l'interior de la instal·lació son:

$$V_c = K_c \cdot \rho \cdot I_d \quad (52)$$

6.5.5. Comprovació de les tensions de pas i contacte amb les màximes admissibles

L'últim pas per al disseny de la instal·lació de posta a terra es comprovar que els valor obtingut amb el càlcul de tensió de pas i contacte no superin els valors límits calculats inicialment

6.6. Xarxa de terres de la subestació

6.6.1. Terra de protecció

Son necessàries les següent equacions per el càlcul de la terra de protecció:

$$R_t = K_r \cdot \rho \quad (53)$$

$$I_d = \frac{V}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R_n + R_t)^2 + X_n^2}} \quad (54)$$

$$V_d = R_t \cdot I_d \quad (55)$$

Seguint el mètode anteriorment indicat, es necessari escollir un format de geometria de la instal·lació de posta a terra de protecció, i obtenir el paràmetres característics K_r , K_p i K_c que permeten calcular les expressions anteriors.

6.6.2. Terra de servei

A partir de les expressions indicades a la terra de protecció, es necessari escollir una geometria per a obtenir el paràmetre K_r i així determinat la resistència de posta a terra del neutre.

$$R_n = K_r \cdot \rho \quad (56)$$

6.6.3. Tensions a l'exterior de la instal·lació

Les tensions de pas que es poden presentar a l'exterior de la instal·lació es determinen mitjançant la següent fórmula:

$$V_p = K_p \cdot \rho \cdot I_d \quad (57)$$

6.6.4. Tensions a l'interior de la instal·lació

Les tensions de contacte que es poden presentar a l'interior de la instal·lació son:

$$V_c = K_c \cdot \rho \cdot I_d \quad (58)$$

6.6.5. Comprovació de les tensions de pas i contacte amb les màximes admissibles

Es comprova que els valors de tensió de pas i contacte no superen els màxims indicats.

6.7. xarxa de terres dels aerogeneradors

Les parts metàl·liques dels aerogeneradors es connecten a la terra de protecció del transformador de BT/MT.