

Treball de Fi de Màster

Màster Universitari d'Enginyeria Industrial (MUEI)

Estudi de les oscil·lacions interàrea en la xarxa NTS

MEMÒRIA

16 de setembre de 2022


Autor: Raül Jarana Medina

Director: Marc Cheah Mañé

Convocatòria: 09/2022



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona

ETSEIB  UPC

Resum

L'objectiu principal d'aquest treball és l'estudi de les oscil·lacions interàrea. Per fer això s'ha hagut de realitzar una recerca àmplia d'aspectes més generals per poder tenir una idea clara sobre aquest tema. En el treball es mostren les idees més importants necessàries per poder entendre la part pràctica. En el treball es descriu la *Norma Técnica de Supervisión*, una norma per determinar si un generador es pot connectar a la xarxa. En el treball s'expliquen els components principals d'una xarxa elèctrica i més concretament els de la xarxa NTS (generador, controladors de turbines, sistemes d'estabilització, excitadors...). Aquesta xarxa serveix per poder realitzar simulacions i poder obtenir acreditacions per poder connectar un generador a la xarxa.

També s'estudia l'estabilitat de la xarxa centrant-se en els diferents tipus d'oscil·lacions que poden aparèixer quan hi ha canvis sobtats de les condicions del sistema (desconnexió d'un generador, caiguda d'una línia aèria...).

Un altre punt important ha sigut donar una visió general dels problemes que estan sorgint per la gran implantació de les fonts d'energies renovables i connexions a través d'electrònica de potència. S'han definit els principals problemes, s'has comentat alguns exemples de problemes reals que hi ha hagut i s'han explicat algunes de les solucions que hi ha actualment.

Finalment per estudiar les oscil·lacions s'ha implementat la xarxa proposada per la NTS per veure el comportament de les oscil·lacions interàrea en diferents casos. Les simulacions s'han realitzat amb *Matlab* més concretament amb l'eina *Simulink*, on s'han definit els diferents elements del sistema i s'han realitzat les simulacions. Al model base se li ha injectat potència activa i reactiva al nus 2 per veure si millora la resposta o amplifica aquestes oscil·lacions. S'han fet diferents simulacions modificant la inductància de la xarxa i la potència activa i reactiva injectada per estudiar el comportament d'aquest sistema i com afecta a les oscil·lacions interàrea.

Glossari

NTS: Norma Tècnica de Supervisió

MGE: Mòdul de Generació Elèctrica

CAMGE: Components Addicionals dels Mòduls de Generació Elèctrica

UGE: Unitats de Generació Elèctrica

TG: Transformadors de Generació

PCX: Punt de Connexió a la Xarxa

MGES: Mòduls de Generació Elèctrica Síncrons

MPE: Mòduls de Parcs Elèctrics

UE: Unió Europea

SMIB: Single Machine Infinite Bus

AVR: Active Voltage Regulator

DC: Direct Current

AC: Alternating Current

HVDC: High Voltage Direct Current

HVAC: High Voltage Alternating Current

PSS: Power System Stabilizers

VC: Vàlvules de control

IP: Vàlvules d'intercepció

VSC: Voltage Source Control

PLL: Phase Locked Loop

CLC: Current Loop Control

abc: Referència normalment utilitzada en trifàsic, en que cada variable de cada fase segueix una forma sinusoidal

qd0: Referència obtinguda de la transformació de Park a partir de la referència *abc*. Referència on dos fases són constants i una 0

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor

VREF : El voltatge de referència del MGES en pu

V_S : El voltatge que surt de l'estabilitzador en pu

V_T : El voltatge mesurat a la sortida del generador en pu

I_T : La intensitat mesurada a la sortida del generador en pu

$I f d_{pu}$: La intensitat del camp del generador mesurada en pu

TFG: Treball de Fi de Grau

IVA: Impuesto sobre el Valor Añadido

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

Índex

1	Introducció	9
1.1	Prefaci	9
1.2	Objectius del projecte	11
1.3	Motivació	12
2	Xarxa NTS	13
3	Estabilitat de la xarxa	17
4	Sistema a estudiar	21
4.1	Generador síncron	22
4.2	Excitador	23
4.3	Sistema d'Estabilització de Potència	24
4.4	Regulador de velocitat de turbina de vapor	24
4.5	MPE	25
5	Implementació dels diferents blocs a Simulink de Matlab	27
5.1	Generador	27
5.2	Excitador	29
5.3	Estabilitzador SM PSS2C	31
5.4	Governador	32
5.5	Transformador	33
5.6	Càrregues	34
6	Resultats	35
6.1	Simulació del model base	37
6.2	Simulació del model amb injecció de potència	43
6.2.1	Simulació amb potència activa constant	43
6.2.2	Simulació variant la potència activa injectada	47
6.2.3	Simulació variant la potència activa consumida	48
6.2.4	Simulació injectant potència activa i reactiva	50
6.3	Validació de les simulacions amb injecció de potència activa	54
6.3.1	Estudi temporal	54
6.3.2	Estudi fft	56
7	Pressupost	61
7.1	Cost de personal	61
7.2	Cost de llicències i subscripcions	61
7.3	Cost de material	62
7.4	Cost total del projecte	62
8	Impacte ambiental	63
9	Conclusions	65
	Agraïments	67
	Bibliografia	69

Índex de figures

1	Consum d'energia elèctrica al món del 1990 al 2019 [1]	9
2	Generació d'energia elèctrica al món del 1990 al 2019 [2]	9
3	Esquema general d'un Mòdul de Generació Elèctrica (MGE)[3]	14
4	Exemple d'un MGES (turbina de vapor) [4]	14
5	Exemple de MPE (parc fotovoltaic) [5]	15
6	Esquema del model NTS [3]	21
7	Bloc <i>Synchronous Machine pu Standard</i> de Matlab.	27
8	Bloc de l'excitador SM ST1C de Matlab.	29
9	Bloc de l'estabilitzador de potència del sistema SM PSS2C de Matlab.	31
10	Bloc del governador tipus 1 de Matlab.	32
11	Bloc del transformador de Simulink.	33
12	Bloc de la càrrega de Simulink.	34
13	Captura de la finestra del <i>Load Flow Analyzer</i>	35
14	Potència generada en el nus 2 amb una inductància de 0,01 pu	37
15	Potència generada en el Nus 2 amb una inductància de 0,1 pu sense inicialitzar correctament	38
16	Potència generada en el Nus 2 per una inductància de 0,1 pu sense PSS	38
17	Potència generada en el nus 2 per una inductància de 0,1 pu	39
18	Potència generada en el nus 2 per diferents valors d'inductàncies (de 0,01 a 0,25 pu).	40
19	Potència generada en el nus 2 per una inductància de 0,4 pu	41
20	Potència generada en el nus 2 per una inductància de 0,6 pu	41
21	Potència generada en el Nus 2 amb injecció de potència i una inductància de 0,025 pu	43
22	Detall de la potència generada en el nus 2 amb injecció i inductàncies de 0,1, 0,2 i 0,4 pu	44
23	Detall de la potència generada en el nus 2 injecció de potència i inductàncies de 0,3 i 0,4 pu	45
24	Potència generada en el nus 2 per una inductància de 0,1 pu i potències 0,9, 1, 1,15, 1,25 GW.	47
25	Potència generada en el nus 2 per inductàncies de 0,1, 0,2 i 0,4 pu i potència 1,25 GW.	48
26	Potència generada en el nus 2 per una inductància de 0,1 pu i potències 0,9, 1, 1,15 i 1,25 GW.	49
27	Potència generada en el nus 2 per inductàncies de 0,1, 0,2 i 0,4 pu i potència 1 GW.	49
28	Potència entregada en el nus 2 per inductàncies de 0,1, 0,2, 0,3 i 0,4 pu i potències activa i reactiva d'1, GW i 1 GVar.	50
29	Potència entregada en el nus per una inductància de 0,2 pu i potències actives d'1,15, 1,25 i 1,45 GW i potències reactives d'1,15, 1,25 i 1,45 GVar.	51
30	Potència entregada en el nus 2 per una inductància de 0,3 pu i potència activa i reactiva d'1,25 GW i i reactiva d'1,25GVar.	51
31	Potència generada en el nus 2 per una inductància de 0,1 pu i potències 0,9, 1, 1,15 i 1,25 GW.	52
32	Potència generada en el nus 2 per inductàncies de 0,1, 0,2, 0,3 i 0,4 pu i potència 1 GW.	53
33	Criteri d'acceptació segons la NTS	54

34	Resultat del FFT del model base i una inductància de 0,1 pu.	56
35	Resultat detall del FFT del model base i una inductància de 0,1 pu	57
36	Resultat detall del FFT del model amb injecció de potència i una inductància de 0,1 pu	58
37	Resultat detall del FFT del model amb injecció de potència i una inductància de 0,1 pu	59

Índex de taules

1	Valors de les variables del generador connectat al nus 4 [3]	27
2	Valors de les variables del generador connectat al nus 1 [3]	28
3	Valors de les variables de l'excitador SM ST1C del MGES del nus 4 [3]	30
4	Valors de les variables de l'excitador SM ST4C del MGES connectat al nus 1 [3]	30
5	Valors de les variables del PSS connectat al nus 1 [3]	31
6	Valors de les variables del sistema de regulació de velocitat i de turbina de vapor [3]	32
7	Valors de les variables del transformador [3]	33
8	Valors de les variables de les càrregues [3]	34
9	Valors dels paràmetres generals del sistema [3]	35
10	Valors de les potències base del sistema [3]	36
11	Valors característics de la potència generada al nus 2 del model base per diferents valors d'inductàncies	42
12	Valors característics de la potència generada al nus 2 del model amb injecció de potència activa per diferents valors d'inductàncies	46
13	Comparació entre els resultats del model base i del model amb injecció de potència	46
14	Resultats obtingut al realitzar el criteri proposat per la NTS	55
15	Pressupost del cost de personal	61
16	Pressupost del cost del programari i les subscripcions [25] [26]	61
17	Pressupost del cost del material	62
18	Pressupost general del projecte	62

1 Introducció

1.1 Prefaci

En els últims anys la demanda d'energia mundial ha augmentat considerablement, des del 1990 fins el 2019 el consum d'energia elèctrica ha augmentat un 100% com es pot veure en la figura 1. Això implica que la generació ha d'anar augmentant amb la mateixa proporció per poder satisfer la demanda, com s'observa en la imatge 2.

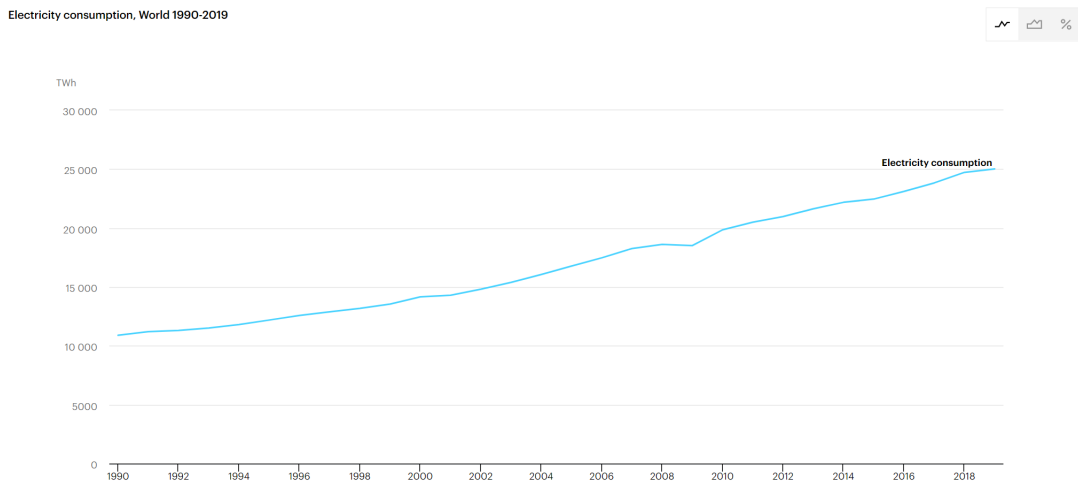


Figura 1: Consum d'energia elèctrica al món del 1990 al 2019 [1]

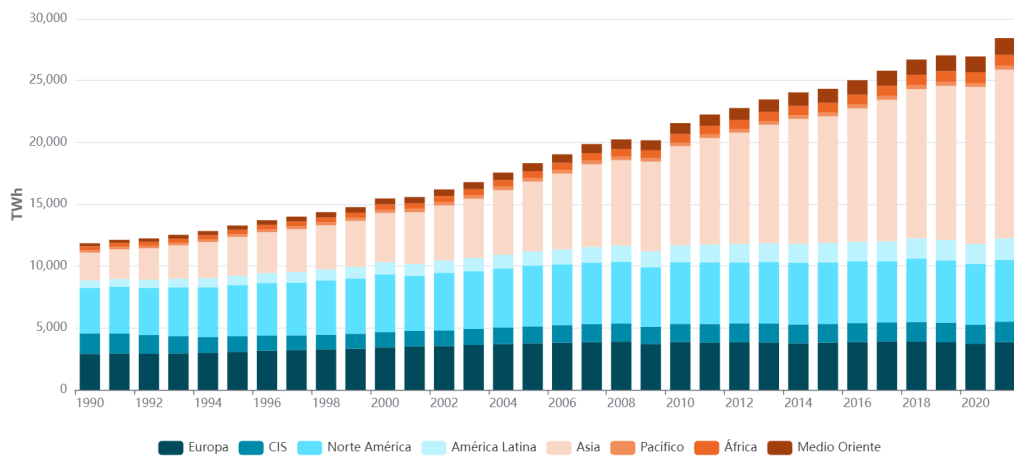


Figura 2: Generació d'energia elèctrica al món del 1990 al 2019 [2]

Aquest augment està fent que les xarxes canviïn ràpidament (xarxes més grans, xarxes més complexes, més interconnexions entre xarxes de diferents països o zones, zones amb connexions més dèbils, xarxes amb una major penetració de les energies renovables, fonts d'energia connectades amb electrònica de potència...) i això pot provocar un augment de la complexitat del control de les oscil·lacions electromecàniques que apareixen a la xarxa i, fins i tot, poden ajudar a amplificar-les. Si aquestes oscil·lacions no es controlen adequadament, poden generar la fallida del sistema i provocar danys irreparables en els components de la xarxa.

L'augment de les energies renovables és un punt important per l'estabilitat de la xarxa, ja que algunes d'aquestes energies, com la fotovoltaica, no tenen el sincronisme que tenen els generadors síncrons. També són fonts d'energia que no generen energia de manera constant ja que depenen de les condicions meteorològiques. A més aquesta energia es genera en continua i el control de l'inversor ha de ser l'adequat per entregar l'energia de forma correcta a la xarxa. Un altre punt important és que no tenen inèrcia i això provoca que la robustesa del sistema disminueixi i això fa que sigui més difícil el control en cas de fallida.

Un altre punt important és l'augment de les fonts d'energia que es connecten a la xarxa mitjançant electrònica de potència, ja que poden canviar les eines per garantir l'estabilitat de la xarxa. Pot ajudar a realitzar controladors més senzills perquè el control es podrà fer mitjançant la relació voltatge-corrent i no la relació parell-velocitat. Tot i això, actualment suposen un problema per l'estabilitat de la xarxa ja que poden generar i amplificar diferents oscil·lacions que poden provocar la fallida de la xarxa i malmetre els components d'aquesta.

Degut a aquestes raons, s'ha d'estudiar correctament aquest tipus d'oscil·lacions que poden generar fallides a la xarxa per poder implementar nous i millors sistemes d'estabilització.

1.2 Objectius del projecte

Un cop presentat el tema i haver llegit sobre el tema els objectius principals del treball són:

- Tenir una visió general de l'estabilitat de la xarxa
- Estudiar el comportament de les oscil·lacions inter-àrea
- Estudiar els components que s'utilitzen per estabilitzar la xarxa
- Implementar el model proposat per *Red Eléctrica Española* a la norma tècnica de supervisió de la conformitat dels mòduls de generació d'electrecitat segons el Reglament UE 2016/631.
- Realitzar diferents simulacions amb el model implementat per estudiar el seu funcionament
- Implementar un MPE per veure el comportament de la xarxa i comprovar que no augmenta les oscil·lacions

A part d'aquest objectius concrets també es tenien altres objectius més generals de caràcter més personal i relacionats amb la metodologia per dur a terme l'estudi.

- Saber interpretar una norma tècnica
- Millorar les habilitats amb el programa *Matlab* i *Simulink*
- Aprofundir en el funcionament dels blocs de *Simulink* per poder implementar els esquemes proposats.

1.3 Motivació

L'alumne sempre ha tingut interès pel món de l'energia elèctrica, la generació i l'emmagatzematge d'aquesta. Per això durant el grau es va realitzar el TFG sobre el control d'un convertidor per poder donar suport a una planta fotovoltaica emmagatzemant i cedint energia a la xarxa a través d'una bateria. Després durant el màster es va escollir l'especialitat Elèctrica i es va cursar una assignatura relacionada amb xarxes elèctriques i fluxos de càrrega. Això li va donar una visió molt àmplia sobre aquest tema i li va generar interès sobre aquest tema. Per això es van plantejar diferents opcions de treballs relacionats amb xarxes elèctriques: xarxes amb gran implementació d'energies renovables, *smart grids*, temes relacionats amb l'estabilitat de la xarxa elèctrica... També es volia realitzar un tema d'actualitat i que tingués una implementació real i pràctica per poder realitzar simulacions amb *Matlab* i *Simulink*.

Finalment el tutor va plantejar un tema d'actualitat relacionat amb les oscil·lacions de la xarxa ja que feia poc temps havia sortit una norma relacionada amb aquest tema. Per aquest motiu es va decidir realitzar aquest treball. A més també es podia relacionar amb el TFG que s'havia fet al grau, ja que es podia implementar un convertidor/inversor per reduir les oscil·lacions i poder millorar l'estabilitat de la xarxa.

2 Xarxa NTS

Qualsevol xarxa elèctrica està formada per un seguit d'elements interconnectats que formen un sistema gran i complex que genera i transporta l'energia. Aquest sistema està format per:

- **Mòduls de Generació Elèctrica (MGE):** conjunts d'elements necessaris per a la generació d'electricitat i adequar-la a les condicions pertinents per poder entregar-la correctament a la xarxa.
- **Linies de distribució:** són les encarregades de transportar l'energia des dels MGEs fins els llocs de consum.
- **Subestacions de reducció i elevació:** aquestes elements realitzen adequen les condicions elèctriques per poder transportar i entregar l'energia en les condicions correctes. Augmenten el voltatge a la sortida dels MGEs per poder transportar l'energia amb el mínim de pèrdues i reduïxen el voltatge per poder entregar l'energia al client.

Per poder realitzar simulacions i veure el comportament de la xarxa en diferents situacions *Red Eléctrica Española* ha creat una xarxa model definida en la NTS [3]. En aquesta norma es defineixen diferents criteris perquè l'usuari que vulgui connectar un generador a la xarxa pugui adquirir les certificacions corresponents. La xarxa definida serveix de model per poder validar diferents plantes generadores que es vulguin connectar a la xarxa. Si es volen connectar plantes a la xarxa primer s'han de realitzar un seguit de simulacions i veure que aquestes simulacions compleixen les normes establertes.

En aquesta norma es defineixen diferents criteris pel ventall de casuístiques possibles: tipus de connexió, tipus de generador, tipus de planta, diferents característiques de funcionament...

Els MGEs és l'element més important ja que és l'encarregat de generar l'energia que després serà transportada als diferents llocs de consum. Els MGEs estan formats per: Components Addicionals dels Mòduls de Generació Elèctrica (CAMGE), per les Unitats de Generació Elèctrica (UGE) i pels Transformadors de Generació (TG). Aquests MGEs es connecten a la xarxa en el Punt de Connexió a la Xarxa (PCX). Aquest sistema està descrit en la NTS on defineixen tots aquests elements i les seves funcionalitats.

- **Components Addicionals del Mòduls de Generació Elèctrica (CAMGES):** són tots els elements actius que poden afectar a aspectes tècnics, com per exemple: dispositius de control de potència activa i reactiva, compensadors síncrons i bateries...
- **Unitats de Generació Elèctrica (UGE):** es tracta de la unitat bàsica per generar l'energia. Un MGE pot tenir més d'un UGE. (El real decreto 647/2020 el defineix com la planta de generació principal.)
- **Transformador de Generació (TG):** transformadors encarregats de augmentar el voltatge fins el valor desitjat.

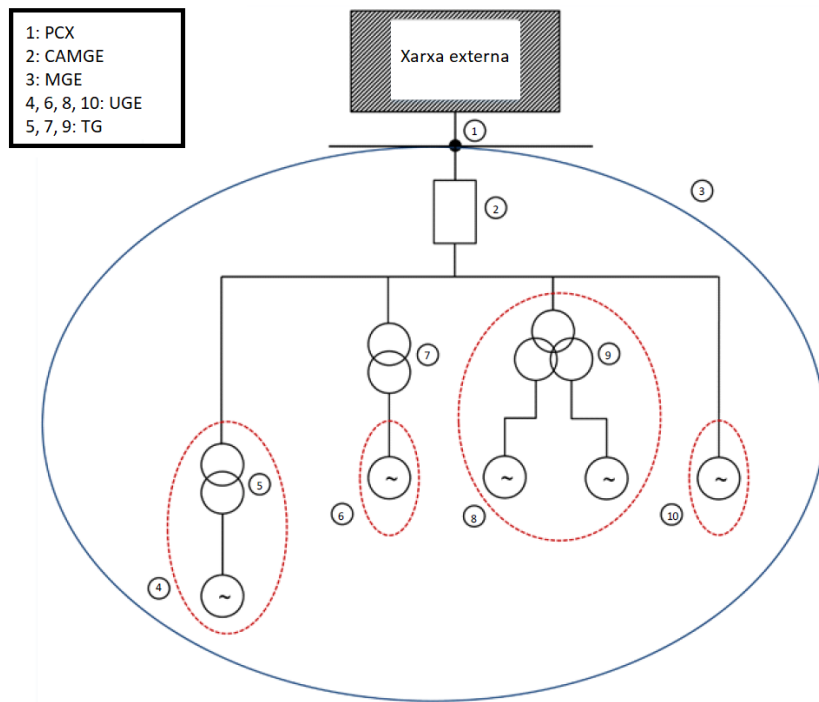


Figura 3: Esquema general d'un Mòdul de Generació Elèctrica (MGE)[3]

Adicionalment, els MGEs es poden classificar en Mòduls de Generació Elèctrics Síncrons (MGES) i en Mòduls de Parc Elèctric (MPE).

- **Mòduls de Generació Elèctrics Síncrons (MGES):** conjunt indivisible d'instal·lacions que poden produir energia elèctrica de manera que la freqüència de la tensió generada, la velocitat del generador i la freqüència de la tensió de la xarxa es mantinguin amb una relació constant, i conseqüentment, estiguin sincronitzades [3]. Un exemple de MGES podria ser una turbina de gas.



Figura 4: Exemple d'un MGES (turbina de vapor) [4]

- **Mòduls de Parcs Elèctrics (MPE):** una unitat o conjunt d'unitats que genera electricitat, que està connectat de forma no síncrona a la xarxa o que està connectat mitjançant electrònica de potència i que a més disposa només d'un únic punt de connexió a una xarxa de transport, una xarxa de distribució, incloses les xarxes de distribució tancades, o un sistema HVDC [3]. Un exemple de MPE podria ser una parc fotovoltaic o una bateria.



Figura 5: Exemple de MPE (parc fotovoltaic) [5]

3 Estabilitat de la xarxa

El l'actualitat un dels punts més importants a estudiar és l'estabilitat de la xarxa elèctrica ja que en els últims anys han anat creixent i canviant la seva naturalesa degut a l'augment de la demanda d'energia i a la implementació de grans quantitats d'energies renovables. Això complica l'amortiment de les oscil·lacions del sistema de potència que apareixen a la xarxa degut canvis sobtats de les condicions del sistema (normalment injecció de potència). Aquests canvis solen ser deguts a la desconexió d'un generador, pel tall d'una línia aèria o per la injecció sobtada de potència (llamp), per exemple.

Una de les problemàtiques principals que afecten a l'estabilitat de la xarxa són les oscil·lacions electromecàniques de baixa freqüència del sistema de potència que apareixen quan s'interconnecten generadors síncrons. Aquestes oscil·lacions es poden transmetre per la xarxa i afectar altres generadors. Una fallida en un generador pot generar oscil·lacions electromecàniques de baixa freqüència en altres generadors connectats a la xarxa i, si aquestes oscil·lacions no són correctament amortides, pot generar una inestabilitat a la xarxa i finalment provocar la fallida d'aquesta provocant danys irreparables en els components que la componen. Hi ha hagut diferents fallides en els últims anys més o menys importants que han afectat a diferents xarxes estatals [6]:

- Regne Unit (1980), oscil·lacions de freqüència 0,5 Hz
- Taiwan (1984, 1989, 1990, 1991 i 1992), oscil·lacions de freqüència entre 0,78 i 1,05 Hz
- Apagada a la Xina (març 2003), oscil·lacions de freqüència 0,4 Hz.
- Apagada a Estats Units d'Amèrica (agost 2003), oscil·lacions de freqüència 0,17 Hz.
- Apagada a Itàlia (setembre 2003), oscil·lacions de freqüència 0,55 Hz.

Les oscil·lacions de baixa freqüència es poden classificar en [7]:

- **Oscil·lacions Intraplanta (2-3 Hz):** aquest tipus d'oscil·lacions es produïxen per l'efecte de dos generadors connectats en la mateixa planta. Són oscil·lacions poc freqüents.
- **Oscil·lacions de mode local (0,7-1,6 Hz):** aquest tipus d'oscil·lacions es produeixen quan un generador síncron oscil·la contra un gran sistema, una única màquina (generador) connectada a un bus infinit amb tensió i angle fixats (*SMIB (Single Machine Infinite Bus)*).
- **Oscil·lacions de mode Interarea (0,2-0,7 Hz):** aquest tipus d'oscil·lacions es produeixen quan un grup de generadors síncrons d'una àrea oscil·len contra uns altre grup de generadors d'una altra àrea degut a una connexió dèbil o una connexió amb una línia de gran inductància.
- **Oscil·lacions de mode excitador (1,5-2,5 Hz):** aquest tipus d'oscil·lacions es produeixen pel bucle de l'excitador, també s'anomenen oscil·lacions elèctriques o megavar.

Les oscil·lacions del sistema de potència són degudes a una falta d'amortiment dels modes d'oscil·lacions electromecàniques del sistema de potència. Aquest pobre amortiment pot ser causat per una gran distància de la transmissió (inductància de la línia gran), una interconnexió feble de les diferents subxarxes i/o un amortiment negatiu degut a un gran guany i una constant

de temps baixa del AVR (*Active Voltage Regulator*). Una connexió feble fa referència a una xarxa que és sensible a la injecció de potència activa o reactiva i està relacionada amb la potència de curtcircuit del sistema. Un sistema amb potència de curtcircuit alta és més robust que un sistema amb potència de curtcircuit baixa.

L'augment de les energies renovables i la implementació de fonts d'energia connectades amb electrònica de potència és un altre punt que augmenta la complexitat de l'estabilitat de la xarxa ja que fa que el sistema tingui una potència de curtcircuit menor i, conseqüentment, farà que la xarxa sigui més feble. Al tenir una xarxa més feble, l'amortiment de les oscil·lacions interàrea no serà el correcte i això podrà donar lloc a problemes importants com la fallida de la xarxa, la desconexió elèctrica de diferents zones o danys importants als components de la xarxa (generadors, transformadors, inversors...). En l'estabilitat de la freqüència de la xarxa també és molt important la inèrcia del sistema ja que és la primera en actuar quan hi ha una variació de freqüència degut a una fallida. Si no es té una inèrcia prou gran, el canvi de la freqüència és molt superior i això pot afectar al sincronisme de la xarxa, deteriorant els components que la formen. Amb aquesta premissa, apareix un altre problema per aquests tipus de tecnologies que no tenen inèrcia (o molt mal aprofitada com la dels generadors eòlics): la xarxa no és tan robusta i apareixen problemes per poder controlar correctament el sistema. Això contrasta amb el comportament dels generadors síncrons, que al tenir una gran inèrcia és molt complicat variar el punt de treball.

Degut a la penetració d'aquestes fonts d'energia s'han documentat diferents inestabilitats de la xarxa on apareixien oscil·lacions que es comentaran a continuació[8]:

- Oscil·lacions en sistemes fotovoltaics amb ressonàncies harmòniques: aquestes oscil·lacions van ser documentades teòricament mitjançant simulacions (oscil·lacions al voltant de 549 Hz)
- Oscil·lacions en parcs eòlics amb HVDC i ressonàncies harmòniques: observades en el mar del Nord d'Alemanya (oscil·lacions al voltant de 549 Hz)
- Oscil·lacions en parcs eòlics i compensació en serie: documentades en un parc eòlic al nord de la Xina on apareixia ressonància per sota de la freqüència de sincronisme (oscil·lacions al voltant de 6-8 Hz)
- Oscil·lacions en parcs eòlics connectats a xarxes febles: oscil·lacions que van aparèixer per la interrupció del cable HVAC de transport

Una altra limitació és la naturalesa dels semiconductors que formen components electrònics ja que no poden suportar alts voltatges ni corrents durant grans períodes de temps. En canvi, els generadors convencionals si ho poden suportar. Això provoca que s'hagi de tenir molt controlat aquests sobrevoltatges i sobrecorrents perquè no facin malbé els components[9].

Per millorar la implementació de l'electrònica de potència i així, també les energies renovables, hi ha dos mètodes per controlar aquests dispositius [10]:

- **Grid Following:** és el més utilitzat actualment. Es basa en sincronitzar ràpidament els inversors amb la xarxa elèctrica. El problema d'aquest mètode es que si no aconsegueixen sincronitzar-se no poden mantenir el control

- **Grid Forming:** és més complex però més fiable. Es basa en mantenir un fasor de voltatge intern pugui respondre aquests canvis

Una altra problemàtica apareix quan s'ha de controlar una fallida important, ja que aquest control molt brusc pot provocar que apareguin més oscil·lacions en el sistema i empitjorar el problema inicial. A més, si aquesta fallida va a més i acaba per desconnectar totalment la xarxa, aquesta tecnologia no pot reiniciar el sistema.

4 Sistema a estudiar

Per estudiar les oscil·lacions de potència de baixa freqüència s'ha realitzat un estudi proposat per la *Norma técnica de supervisión de la conformidad de los módulos de generación de electricidad según el Reglamento UE 2016/631* [3]. Aquesta norma indica quines condicions ha de complir per poder connectar els MGEs a la xarxa per garantir l'estabilitat d'aquesta. Segons aquesta norma els MGEs es classifiquen en funció de la tensió al PCX i de la capacitat màxima [3].

- **Tipus A:** MGE amb punt de connexió inferior a 110 *kV* i la seva capacitat màxima està compresa entre 0,8 i 110 *kW*.
- **Tipus B:** MGE amb punt de connexió inferior a 110 *kV* i la seva capacitat màxima està compresa entre 110 *kW* i 5 *MW*.
- **Tipus C:** MGE amb punt de connexió inferior a 110 *kV* i la seva capacitat màxima està compresa entre 5 i 50 *MW*.
- **Tipus D:** MGE amb punt de connexió igual o superior a 110 *kV* i la seva capacitat màxima és superior a 50 *MW*.

En l'estudi proposat s'estudien les oscil·lacions interàrea implementant un model artificial que està format per dos generadors síncrons, un simula el sistema extern i l'altre és el generador a estudiar (generador tipus D segon la classificació de la NTS), connectats per una línia elèctrica, dues càrregues i dos transformadors per augmentar la tensió.

El MGES connectat al nus 1, que és el generador a estudiar, es modela amb un alternador, un regulador de tensió i un estabilitzador de potència. A continuació hi ha un transformador per augmentar la tensió i poder transportar l'energia amb les mínimes pèrdues possibles. Després hi ha una línia d'alta tensió per transportar l'energia d'un nus a un altre modelada amb una inductància. Entre els nusos 3 i 4 hi ha un altre transformador per tornar a modificar el valor de la tensió i, finalment, al nus 4 hi ha connectat un MGES, que simula el sistema extern, modelat amb un alternador, un sistema d'excitació i un regulador de velocitat i de turbina de vapor. En els nusos 2 i 3 hi ha connectades dues càrregues de corrent constant. Addicionalment hi ha un segon estudi que proposa la norma que es basa en connectar un MPE al nus 2 per injectar potència al sistema.

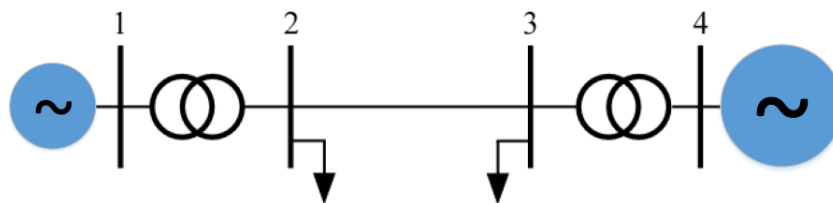


Figura 6: Esquema del model NTS [3]

4.1 Generador síncron

El generador és l'encarregat de transformar l'energia mecànica en energia elèctrica. El seu funcionament es basa en la llei de Faraday, en la que un camp magnètic variable induïx una força electromotriu que es tradueix en un corrent induït. El generador està format per dues parts clarament diferenciades: l'estator i el rotor.

El rotor és la part mòbil de l'alternador i està format per un nucli magnètic envoltat per una bobina (electroimant) o per un imant permanent. En el cas de l'electroimant, a la bobina se li fa passar corrent continua per generar un camp magnètic. L'estator és la part fixa del generador i està format per un debanat d'un conductor perquè circuli el corrent.

El funcionament del generador síncron és senzill, la turbina fa girar el rotor, el camp magnètic del rotor vist des de l'estator, varia al llarg del temps i degut a això i s'indueix un corrent altern a l'estator. En aquests tipus de generadors el camp magnètic de l'estator i del rotor estan sincronitzats, és a dir, giren a la mateixa velocitat. La rotació d'aquests generadors està relacionada amb la freqüència de la corrent amb la que s'alimenta i el seu voltatge:

$$n = \frac{60f}{P} \quad (1)$$

On n és la velocitat de sincronisme del generador, f és la freqüència de la xarxa a la que està connecta i P és el parell de pols que té el rotor.

4.2 Excitador

L'excitador és l'encarregat d'alimentar de corrent continu el bobinatge del camp magnètic del generador síncron. A més d'aquesta funció principal, l'excitador també pot controlar i protegir el generador regulant la tensió del camp i, conseqüentment, regulant el corrent del camp. Per realitzar les funcions de control l'excitador regula el voltatge i el flux de potència reactiva assegurant l'estabilitat de la màquina. En relació a la protecció, s'encarrega de que el generador no superi els límits de funcionament.

Per poder realitzar les funcions descrites anteriorment és necessari un sistema de control de l'excitador. Aquest sistema està format pels següents elements:

- **Excitador:** és l'element principal que alimenta el bobinatge del camp magnètic del generador síncron.
- **Regulador:** és l'encarregat d'adaptar les senyals d'entrada per poder controlar correctament l'excitador.
- **Transductor de tensió terminal i compensador de càrrega:** aquest element mesura el voltatge terminal del generador, el compara amb voltatge desitjat i envia la senyal al regulador. El compensador de càrrega serveix per fixar el valor del voltatge en algun punt del sistema allunyat de la sortida del generador.
- **Sistema d'estabilitzador de potència:** és un element per millorar l'amortiment de les oscil·lacions del sistema. Aquest element serà descrit en l'apartat 4.3.
- **Circuits limitadors i protectors:** aquests elements són els encarregats d'assegurar que el generador treballi dins dels límits de funcionament.

Segons la font d'energia utilitzada pel sistema d'excitació es poden classificar en:

- **Sistema d'excitació DC:** aquests sistemes utilitzen generadors de continua per obtenir el corrent del camp. La connexió al rotor es fa mitjançant uns anells lliscants.
- **Sistema d'excitació AC:** aquests sistemes utilitzen generadors d'alterna per obtenir el corrent del camp. Per obtenir el corrent en continua es transforma la senyal mitjançant rectificadors.
- **Sistema d'excitació estàtic:** aquests sistemes utilitzen rectificadors estàtics per proveir de corrent continu directament al camp mitjançant anells lliscants. L'energia s'obté directament del generador principal.

4.3 Sistema d'Estabilització de Potència

El Sistema d'Estabilització de Potència és un estabilitzador, que mitjançant un sistema de control, amorteix les oscil·lacions del rotor del generador a través de regular l'excitació del camp magnètic. Aquest sistema actua directament sobre l'excitador per variar el camp magnètic i generar un parell elèctric que compensi les desviacions de velocitat del rotor. Hi ha molts tipus de PSS i cada un té un diagrama diferent al qual se li han d'introduir unes senyals determinades. Tot i tenir formes diferents de calcular la senyal d'estabilització totes tenen les mateixes entrades, aquestes entrades solen ser: la potència elèctrica generada i la desviació de la velocitat del rotor (o la freqüència).

4.4 Regulador de velocitat de turbina de vapor

El regulador de velocitat de la turbina de vapor és l'element que regula la velocitat de la turbina de vapor controlant l'apertura de les vàlvules. Les grans turbines de vapor estan formades principalment per 4 vàlvules:

- Vàlvules de tancament d'entrada principal
- Vàlvules de control
- Vàlvules de tancament del reescalfador
- Vàlvules d'intercepció

Generalment el sistema de vàlvules està format per dues de cada tipus instal·lades en paral·lel i així tenir vàlvules de seguretat per si hi ha algun problema.

Sistema de control de la velocitat és pot dividir en tres parts: control de la velocitat/càrrega, control de la sobre-velocitat i l'aturada d'emergència.

El control de velocitat/càrrega és realitza mitjançant el control de les vàlvules de control que regula la posició de la vàlvula per controlar l'admissió de vapor a pressió a la turbina. Aquest control té permet una caiguda de velocitat d'entre un 4 i un 5% per facilitar que la turbina pugui treballar correctament en paral·lel amb altres unitats generadores i que hi hagi un correcte repartiment de càrrega entre les diferents unitats.

El control de sobre-velocitat és l'encarregat de protegir la turbina evitant l'augment descontrolat de la velocitat del rotor degut a un rebuig de la càrrega. Normalment el límit de velocitat de la turbina està al voltant del 120% de la velocitat nominal tot i que aquest control comença a treballar entre el 110 i 115% per evitar arribar al límit. Quan hi ha un excés de velocitat el control regula ràpidament les vàlvules CV i IP, ja que només tancant les vàlvules CV no seria suficient. Això és degut a que entre el 60 i 80% de l'energia és generada per les turbines de mitja i baixa pressió. A més, en el reescalfador que alimenta aquestes turbines s'acumula molt vapor i el generador seguiria treballant per sobre de la velocitat nominal.

L'aturada d'emergència es produeix quan falla el control anterior i realitza la funció de tancar les vàlvules d'aturada per reduir la velocitat del rotor fins a una velocitat segura.

4.5 MPE

Com ja s'ha comentat en l'apartat 2, el MPE és una unitat que genera electricitat i es connecta de forma no síncrona a la xarxa. Normalment aquesta unitat genera l'electricitat en continua i es necessita un inversor per poder connectar-se a la xarxa. Per poder realitzar correctament aquesta connexió s'ha de controlar adequadament l'inversor per obtenir el voltatge i el corrent en les condicions de la xarxa. Aquest tipus de control s'anomena VSC (*Voltage Source Control*)

Per poder realitzar el control de l'inversor es necessiten els següents blocs:

- **PLL (*Phase Locked Loop*)**: és l'encarregat d'obtenir l'angle de la xarxa per poder realitzar la transformada de *Park*.
- **Transformada de *Park***: transformada per canviar de la base *abc* a la base *qd0* una base més senzilla per realitzar el control.
- ***Reference Computation***: serveix per obtenir les intensitats de referència en base *qd0* a partir de la potència desitjada.
- **CLC (*Current Loop Control*)**: és l'encarregat d'obtenir els voltatges de referència en base *qd0* a partir de les intensitats mesurades de la xarxa i les intensitats de referència calculades en el *Reference Computation*.
- ***Voltage Modulation***: d'aquest bloc s'obté la senyal per controlar el tancament i apertura dels diferents IGBTs a partir dels voltatges de referència en la base *qd0*.

5 Implementació dels diferents blocs a Simulink de Matlab

5.1 Generador

Per implementar els MGES, s'ha utilitzat el bloc de *Matlab Synchronous Machine pu Standard* que simula un generador síncron. En aquest bloc s'introdueixen les variables de potència mecànica i de la tensió del camp i s'obté la tensió de les tres fases. També té una altra sortida (m) que dóna el valor de les diferents variables que defineixen el generador (tensió, corrent, velocitat, posició angular...).

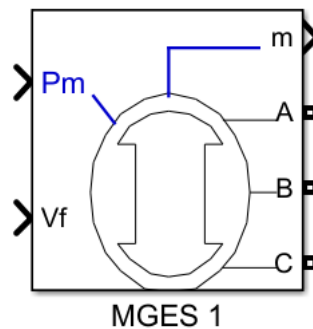


Figura 7: Bloc *Synchronous Machine pu Standard* de Matlab.

Per modelar el generador desitjat en la finestra de configuració s'ha d'indicar que el rotor és llis i que l'entrada mecànica ha de ser la potència mecànica. En la finestra de paràmetres s'han d'indicar els diferents valors que defineixen els generadors (valors que s'indiquen en les taules (1 i 2 i)). Selecciónt, tant en el d -axis com en el q -axis, l'opció *Open-circuit*. Finalment en la finestra de flux de càrregues s'ha de seleccionar el tipus de generador i la potència que generarà cadascú.

Paràmetre	Valor
H	6,175 s
D	0
T'_{d0}	8 s
T''_{d0}	0,03 s
T'_{q0}	0,4 s
T''_{q0}	0,05 s
x_d	1,8
x_q	1,7

Paràmetre	Valor
x'_d	0,3
x'_q	0,55
x''_d	0,25
x''_q	0,25
x_l	0,2
s_1	0,0392
s_2	0,2227

Taula 1: Valors de les variables del generador connectat al nus 4 [3]

Paràmetre	Valor
H	6,3 s
D	0
T'_{d0}	6,47 s
T''_{d0}	0,022 s
T'_{q0}	0,61 s
T''_{q0}	0,034 s
x_d	2,135
x_q	2,046

Paràmetre	Valor
x'_d	0,34
x'_q	0,573
x''_d	0,269
x''_q	0,269
x_l	0,234
s_1	0,1275
s_2	0,2706

Taula 2: Valors de les variables del generador connectat al nus 1 [3]

5.2 Excitador

Per implementar l'excitador del MGES1 s'ha utilitzat el bloc SM ST1C i pel MGES2 el bloc SM ST4C de la llibreria de *Simulink*. En el cas d'estudi al bloc només se li ha d'introduir les següents entrades:

- V_{REF} : El voltatge de referència del MGES en pu.
- V_S : El voltatge que surt de l'estabilitzador en pu.
- V_T : El voltatge mesurat a la sortida del generador en pu.
- I_T : La intensitat mesurada a la sortida del generador en pu.
- $I_{fd_{pu}}$: La intensitat del camp del generador mesurada en pu.

Les altres entrades no apliquen en l'excitador que es vol simular ja que serveixen per indicar diferents límits de les variables del generador.

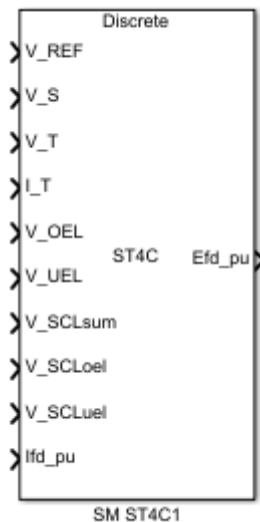


Figura 8: Bloc de l'excitador SM ST1C de Matlab.

En la finestra *General* s'han d'introduir els valors amb els que s'inicialitzaran les diferents variables del generador (tot en pu). En la següent finestra, la de *Pre-Control*, s'introdueixen els valors de les constants per realitzar la compensació de la corrent (R_C i X_C) i la constant de temps del filtre passa-baixos (T_R). En el cas estudiat no es realitzarà la compensació de corrent. Els valors de les constants del sistema de control de l'excitació s'introdueixen en la finestra *Control*. En l'última finestra (*Exciter*) s'indica i s'introdueixen els valors de les constants de la font d'alimentació de l'excitador. En aquest cas es seleccionarà la posició A per indicar que la font d'alimentació és derivada de la tensió terminal del generador.

Paràmetre	Valor
T_R	0,01 s
T_A	0
T_B	10
T_C	1
T_F	1
K_A	200

Paràmetre	Valor
K_C	0
K_F	0
V_{imax}	999
V_{imin}	-999
V_{Rmax}	999
V_{Rmax}	-999

Taula 3: Valors de les variables de l'excitador SM ST1C del MGES del nus 4 [3]

Paràmetre	Valor
T_R	0,02 s
T_A	0,02
T_B	10
T_C	1
T_F	1
K_A	200

Paràmetre	Valor
K_C	0
K_F	0
V_{Mmax}	1
V_{Mmin}	-0,87
V_{Rmax}	1
V_{Rmax}	-0,87

Taula 4: Valors de les variables de l'excitador SM ST4C del MGES connectat al nus 1 [3]

5.3 Estabilitzador SM PSS2C

Per implementar l'estabilitzador de potència del sistema s'ha utilitzat el bloc SM PSS2C de la llibreria de Simulink. En el cas d'estudi s'han introduït les següents entrades:

- V_{SI1} : La desviació de la velocitat angular del rotor en pu.
- V_{SI2} : La potència activa generada pel generador en pu.

Aquests valors s'obtidran de les dades que facilita el bloc *Synchronous Machine Standard*.

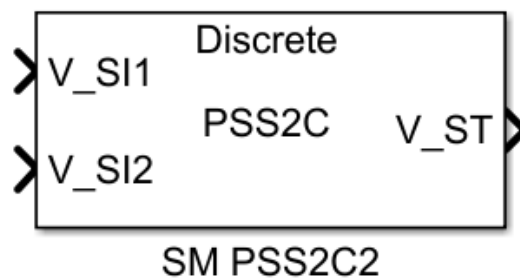


Figura 9: Bloc de l'estabilitzador de potència del sistema SM PSS2C de Matlab.

En la configuració del bloc s'introdueixen els valors de les constants per obtenir la senyal del voltatge que estabilitzarà la potència del sistema. Aquesta sortida serà la que s'introduirà al bloc de l'excitador.

Paràmetre	Valor	Paràmetre	Valor
T_{w1}	2	T_4	0,12
T_{w2}	2	T_5	0
T_{w3}	2	T_6	0
T_{w4}	0	T_7	2
K_{s1}	17,069	T_8	0
K_{s2}	0,158	T_9	0,1
K_{s3}	1	m	5
T_1	0,28	n	1
T_2	0,04	V_{sTmax}	0,1
T_3	0,28	T_{sTmin}	-0,1

Taula 5: Valors de les variables del PSS connectat al nus 1 [3]

5.4 Governador

Per implementar el governador s'ha utilitzat el bloc *Governor Type 1* de la llibreria de Simulink. En aquest bloc s'ha d'introduir la velocitat angular del rotor en pu i la potència de referència desitjada. Les sortides són la potència mecànica alta i baixa en pu. La potència alta serà la que s'introduirà a l'entrada de potència del bloc del generador.

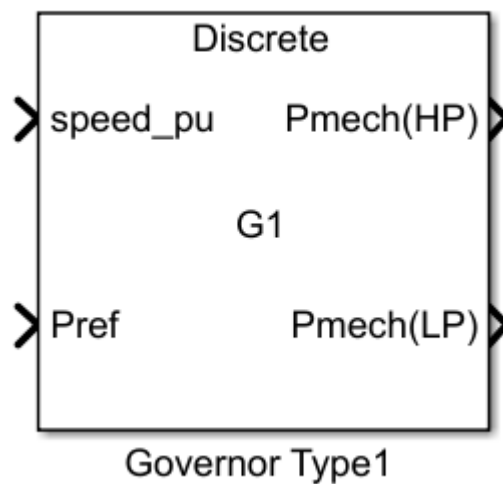


Figura 10: Bloc del governador tipus 1 de Matlab.

En la finestra *General* s'introdueixen els valors de la velocitat de referència i el torque inicial que s'obtéindrà de l'anàlisi del *Power Flow* de Matlab, totes dues en pu. En la finestra *Governor* s'introdueixen els valors de les constants del sistema que determina les potències de sortida.

Paràmetre	Valor	Paràmetre	Valor
K	20	T_2	0
K_1	0,3	T_3	0,1
K_2	0	T_4	0,3
K_3	0,3	T_5	7
K_4	0	T_6	0,6
K_5	0,4	T_7	0
K_6	0	U_0	0,5
K_7	0	U_C	-0,5
K_8	0	P_{max}	1
T_1	0	P_{min}	0

Taula 6: Valors de les variables del sistema de regulació de velocitat i de turbina de vapor [3]

5.5 Transformador

Per implementar els transformadors s'ha utilitzat el bloc *Three-phase Transformer* de la llibreria de Simulink. En la finestra *Configuration* s'han d'indicar el tipus de connexió dels dos bobinats i en la finestra *Parameters* els paràmetres que defineixen el transformador. Aquestes dades es poden observar en la taula 7.

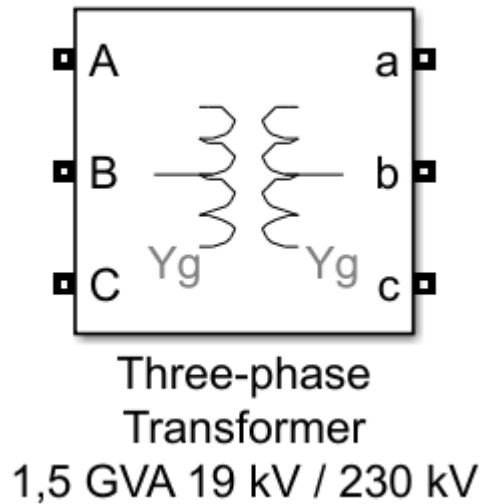


Figura 11: Bloc del transformador de Simulink.

Paràmetre	Valor
Potència Base	100 MW
Potència Nominal	1,5 GW
Freqüència	50 Hz
V_1	19 kV
V_2	230 kV
K_5	0,1 pu
K_6	0

Taula 7: Valors de les variables del transformador [3]

5.6 Càrregues

Per implementar les càrregues del sistema s'ha utilitzat el bloc *Three-Phase Parallel RLC Load* de la llibreria de Simulink. En la finestra *Parameters* s'han d'introduir les variables que defineixen la càrrega que es vol implementar. En la finestra *Load Flow* s'ha d'especificar el tipus de càrrega que es vol simular. Els valors que s'han introduït en aquest bloc es poden observar en la taula 8.

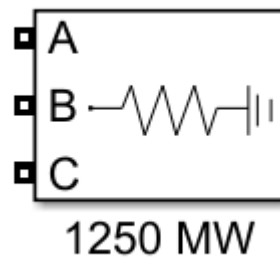


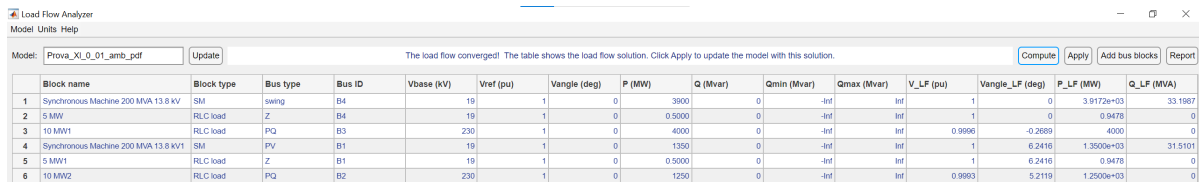
Figura 12: Bloc de la càrrega de Simulink.

Paràmetre	Càrrega 1	Càrrega 2
Voltatge	230 <i>kV</i>	230 <i>kV</i>
Freqüència	50 <i>Hz</i>	50 <i>Hz</i>
Potència activa	1,25 <i>GW</i>	4 <i>GW</i>
Potència reactiva inductiva	0 <i>VAR</i>	0 <i>VAR</i>
Potència reactiva capacitiva	0 <i>VAR</i>	0 <i>VAR</i>
Tipus de càrrega	PQ	PQ

Taula 8: Valors de les variables de les càrregues [3]

6 Resultats

Les simulacions s'han realitzat seguint una mateixa metodologia per assegurar que els resultats obtinguts eren els correctes. Primer de tot es va muntar el model inicial i es van caracteritzar tots els elements del sistema, introduint les variables que els definien i les potències actives i reactives dels components actius (en la finestra *Load Flow*). Seguidament es van indicar els nusos que hi havia en el sistema indicant el seu número i el mòdul i l'angle del voltatge, en *pu* i graus respectivament. A continuació s'havia de realitzar el càlcul del flux de càrregues per poder inicialitzar el model en el punt de funcionament adequat. El flux de càrregues es realitzava amb l'eina de *Simulink*, *Load Flow Analyzer*, la qual calcula el punt de funcionament a partir de les potències actives i reactives dels generadors i de les càrregues del model. En la pantalla d'aquesta eina surten els valors de cada nus de les diferents variables que defineixen el sistema. Un cop realitzat el càlcul s'han d'aplicar els resultats al model, aquest pas es realitza automàticament en tots els blocs excepte en 3 (en el governador i els 2 excitadors) que salta un error i s'han d'introduir i inicialitzar a mà. Aquest punt feia que el procés d'obtenció de dades no es pogués fer automàticament i augmentés considerablement el temps per realitzar les simulacions.



Block name	Block type	Bus type	Bus ID	Vbase (kV)	Vref (pu)	Vangle (deg)	P (MW)	Q (Mvar)	Qmin (Mvar)	Qmax (Mvar)	V_LF (pu)	Vangle_LF (deg)	P_LF (MW)	Q_LF (MVA)
1 Synchronous Machine 200 MVA 13.8 kV	SM	swing	B4	19	1	0	3900	0	-inf	inf	1	0	3.9172e+03	33.1587
2 5 MW	RLC load	Z	B4	19	1	0	0.5000	0	-inf	inf	1	0	0.9478	0
3 10 MW1	RLC load	PQ	B3	230	1	0	4000	0	-inf	inf	0.9996	-0.2689	4000	0
4 Synchronous Machine 200 MVA 13.8 kV1	SM	PV	B1	19	1	0	1350	0	-inf	inf	1	6.2416	1.3500e+03	31.5101
5 MW1	RLC load	Z	B1	19	1	0	0.5000	0	-inf	inf	1	6.2416	0.9478	0
6 10 MW2	RLC load	PQ	B2	230	1	0	1250	0	-inf	inf	0.9983	5.2119	1.2500e+03	0

Figura 13: Captura de la finestra del *Load Flow Analyzer*

Les simulacions realitzades al programa de Simulink de Matlab s'han realitzat amb els següents paràmetres de simulació:

- Mode de simulació: Discret
- Temps de mostreig: 10^{-4} s
- Model de simulació: ode1
- Temps de simulació: 50 s

Els paràmetres generals que defineixen el sistema s'indiquen en les següents taules:

	Tensió (kV)	Potència activa (MW)	Potència reactiva (MVA)
MGES1	19	1350	0
MGES2	19	3900	0
MPE	19	1350	0
Càrrega nus 2	230	1250	0
Càrrega nus 3	230	4000	0

Taula 9: Valors dels paràmetres generals del sistema [3]

	Sistema	MGES1	MGES2
Potència base (MVA)	100	1500	5000

Taula 10: Valors de les potències base del sistema [3]

L'estudi del sistema es farà analitzant la potència entregada al nus 2, ja que és el punt de connexió del MGES a la xarxa. A més, perquè apareguin les oscil·lacions interàrea en el sistema, es reduirà un 2% el voltatge de referència del MGES del nus 4 per forçar un canvi sobtat en les condicions inicials del sistema.

6.1 Simulació del model base

Primer de tot es va realitzar la simulació amb el valor de la inductància de 0,01 pu per veure la seva dinàmica. Com es pot observar en la figura 14, el valor de la potència s'estabilitza al cap d'uns 30 segons. També s'observa un sobre pic i un baix pic bastant importants un cop es realitza el canvi de voltatge. El valor del sobre pic és de 1.355 GW i el del baix pic de 1,3175 GW. La freqüència d'oscil·lació d'aquesta simulació es de 0,05 Hz, per tant no es pot considerar que hi hagi oscil·lacions interàrea.

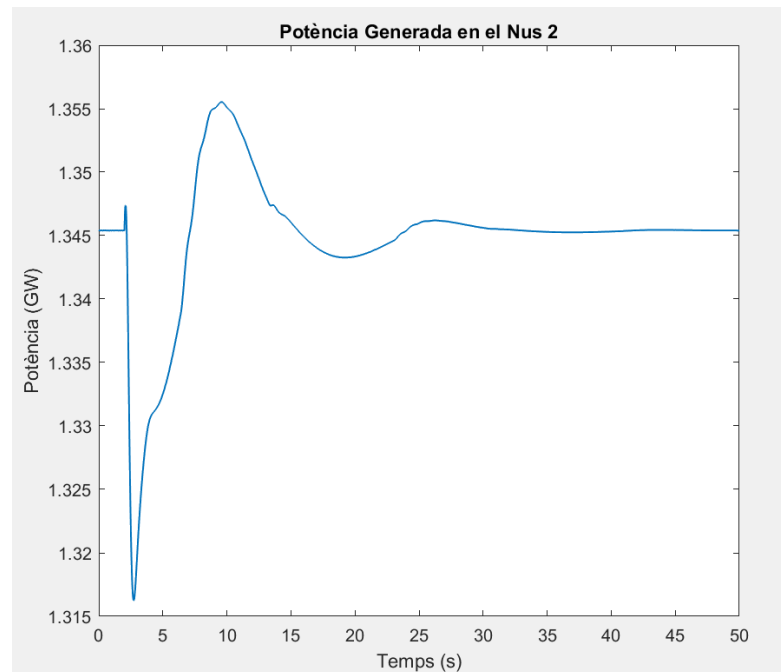


Figura 14: Potència generada en el nus 2 amb una inductància de 0,01 pu

Cal destacar que l'inicialització és molt important ja que si no s'inicialitza correctament el resultat és molt diferent al correcte com és pot observa en la següent figura 15, amb més oscil·lacions i sobre pics més importants.

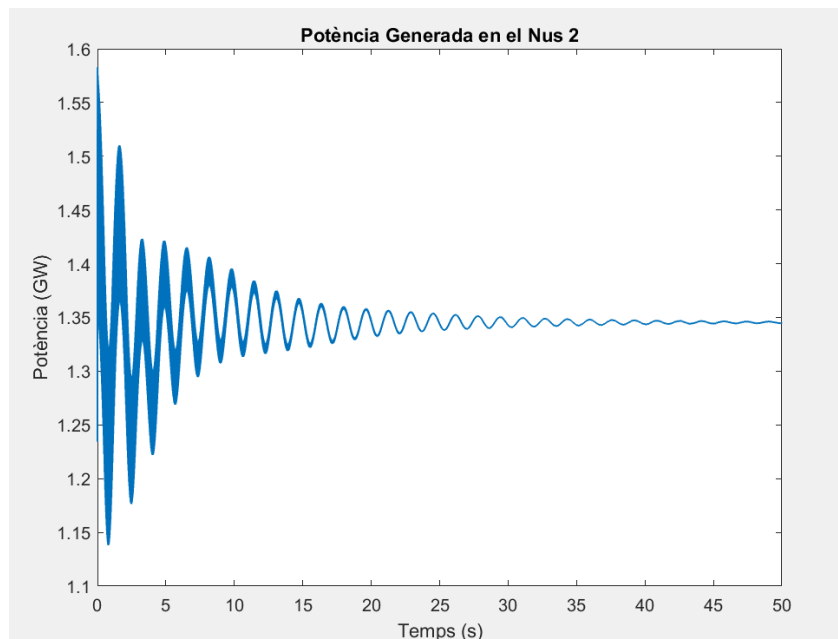


Figura 15: Potència generada en el Nus 2 amb una inductància de 0,1 pu sense inicialitzar correctament

També cal remarcar la importància del PSS ja que és l'element que estabilitza el generador reduint les oscil·lacions de baixa freqüència. En la següent figura 16 es pot observar com la dinàmica sense PSS té moltes més oscil·lacions i triga molt en estabilitzar-se.

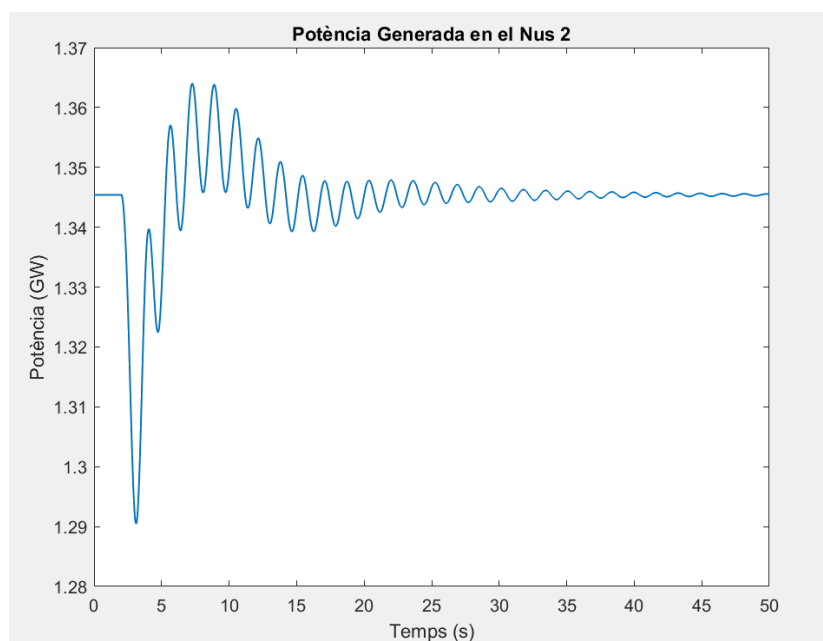


Figura 16: Potència generada en el Nus 2 per una inductància de 0,1 pu sense PSS

Seguidament es va canviar el valor de la inductància de la línia per un valor més gran de $0,2 pu$ per veure com afectava al resultat aquest canvi. Com es s'observa en la figura 17, la tendència que segueix la potència és igual al resultat amb la inductància de $0,01$ però apareixen les oscil·lacions interàrea. Ara el sistema té dues oscil·lacions: la principal amb freqüència de $0,05 Hz$ i la interàrea amb una freqüència de $0,33 Hz$. També es pot observar que el primer sobre pic no apareix i triga uns 5 segons més a estabilitzar-se.

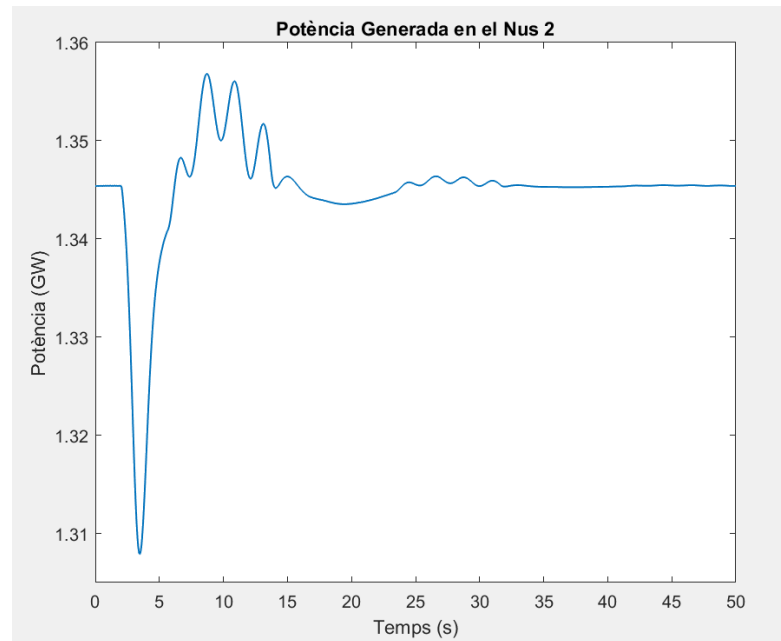


Figura 17: Potència generada en el nus 2 per una inductància de $0,1 pu$

Finalment s'han realitzat diferents simulacions canviant el valor de la inductància de la línia i s'ha representat en la mateixa finestra per tenir una visió general de com canvia el resultat en funció del canvi d'inductància. Per representar els resultats s'han fet les simulacions començant amb un valor d'inductància de $0,01 pu$, després de $0,025 pu$ i s'ha anat augmentant el valor en $0,025$.

Com es pot veure en la imatge 18, les oscil·lacions interàrea es fan més grans a mesura que s'augmenta la inductància. També es pot observar que el valor del primer sobrepic mínim es va desplaçant cap a la dreta, és a dir triga més en arribar a aquest sobrepic. També cal destacar que la variació inferior respecte el valor estabilitzat va augmentant, el baix pic cada vegada té un valor més baix. El primer sobrepic es va reduint fins desaparèixer (en les primeres simulacions hi ha un petit sobrepic que desapareix a partir de la inductància de valor $0,15 pu$). El sobrepic va augmentant a mesura que s'augmenta la inductància ja que hi ha més oscil·lacions. Amb més o menys oscil·lacions, a partir del segon 25 el sistema s'estabilitza (triga uns 20 segons en estabilitzar-se).

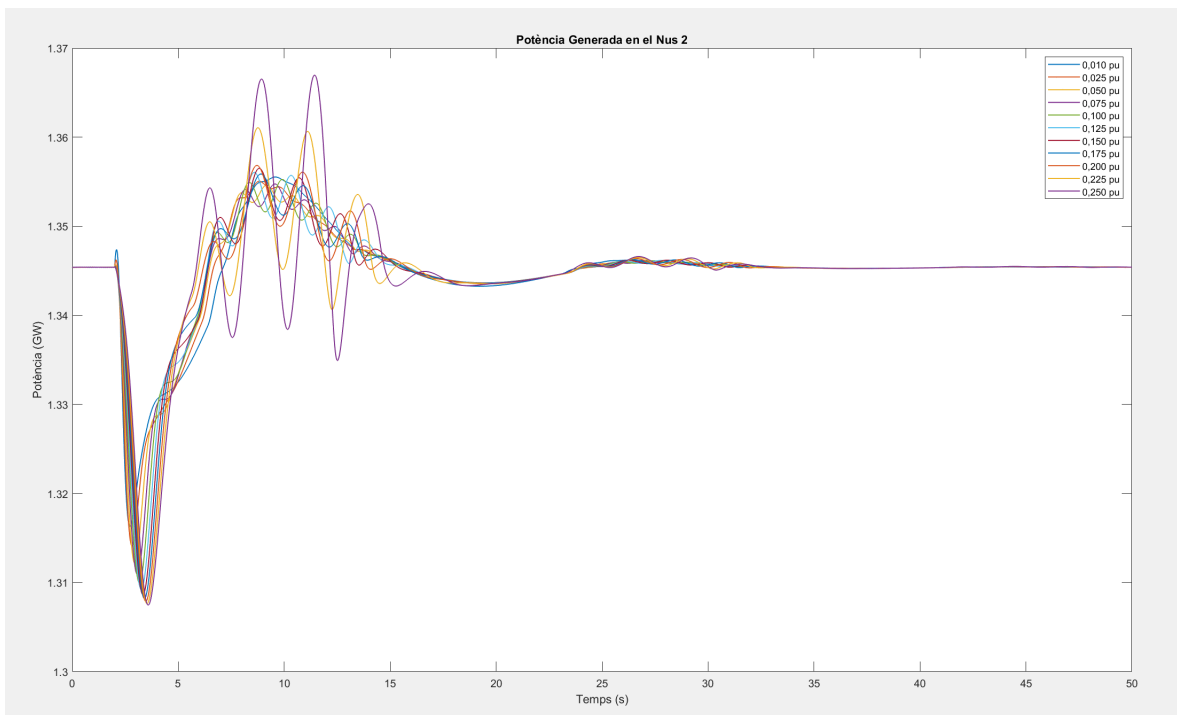


Figura 18: Potència generada en el nus 2 per diferents valors d'inductàncies (de $0,01$ a $0,25 pu$).

A partir d'un valor de la inductància de $0,3 pu$ la dinàmica comença a ser diferent que els casos anteriors. Com s'observa en la imatge 19, l'ona ja no segueix el mateix perfil degut a que les oscil·lacions interàrea són més grans. Tot i això, el sistema s'estabilitza en uns 30 segons.

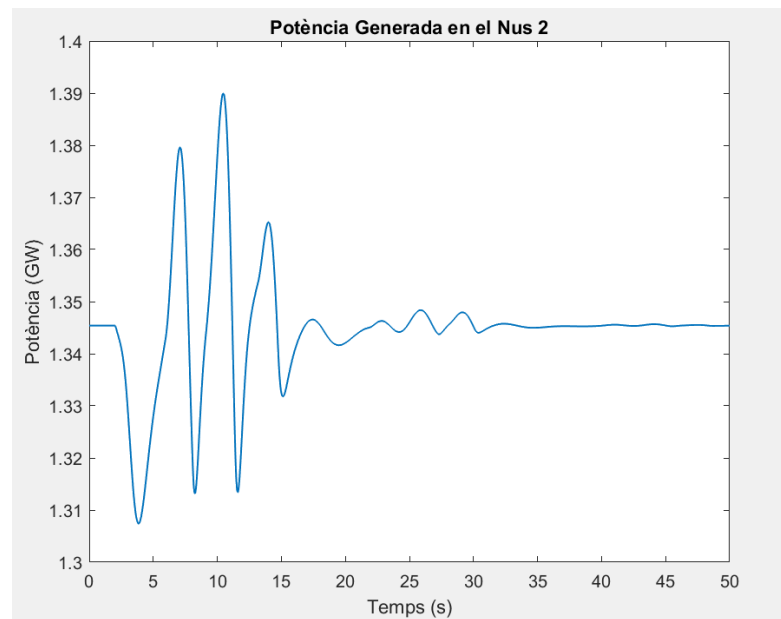


Figura 19: Potència generada en el nus 2 per una inductància de $0,4 pu$

A partir d'una inductància de valor de $0,5 pu$ la dinàmica del sistema és totalment diferent, triga molt a establir-se i l'amplitud màxima és més gran. També cal destacar que en els altres casos la dinàmica començava amb un baix pic i en aquest comença amb un sobre pic. Un altre aspecte a remarcar és que aquestes oscil·lacions ja són inferiors a $0,2 Hz$ i ja no serien oscil·lacions interàrea.

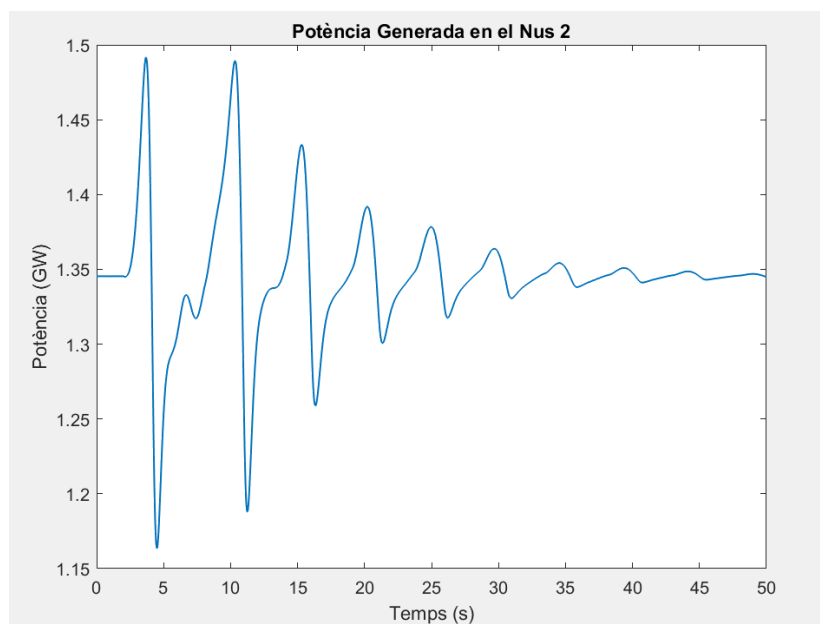


Figura 20: Potència generada en el nus 2 per una inductància de $0,6 pu$

En la següent taula 11 s'indiquen les dades més característiques de les ones per cada valor d'inductància. En la taula s'indiquen les amplituds superior i inferior, el percentatge d'aquests valors respecte el valor estabilitzat (1,345 GW) i les freqüències 1-2 i 2-3. Aquestes freqüències es refereixen a la freqüència entre el primer i el segon màxim i entre el segon i el tercer, respectivament.

Valor inductància (pu)	Amplitud inferior (GW)	Amplitud inferior (%)	Amplitud superior (GW)	Amplitud superior (%)	Freqüència 1-2 (Hz)	Freqüència 2-3 (Hz)
0,05	1,31217	2,470	1,35459	0,683	0,815	0,834
0,10	1,31002	2,630	1,35524	0,731	0,629	0,637
0,15	1,30868	2,729	1,35648	0,824	0,517	0,531
0,20	1,30791	2,787	1,35689	0,854	0,423	0,430
0,25	1,30748	2,818	1,36697	1,603	0,396	0,403
0,30	1,30744	2,821	1,37770	2,401	0,352	0,375
0,35	1,30739	2,825	1,38397	2,867	0,314	0,326
0,40	1,30740	2,824	1,38994	3,311	0,284	0,289
0,45	1,30757	2,812	1,39488	3,678	0,257	0,263
0,50	1,10505	17,865	1,55795	15,798	0,213	0,224

Taula 11: Valors característics de la potència generada al nus 2 del model base per diferents valors d'inductàncies

Un cop analitzades totes les dades es pot observar que el baix pic va disminuint i el sobre pic va augmentant, fent que l'amplitud total es vagi augmentant a mesura que augmenta la inductància. També destaca que tant la freqüència 1-2 i com la 2-3 van disminuint a mesura que s'augmenta la inductància (comença amb un valor de 0,8 Hz i acaba amb un valor de 0,2 Hz). Les dues freqüències són molt semblants però les freqüències 2-3 són superiors a les freqüències 1-2 per tots els valors de la inductància. L'amplitud inferior respecte el valor estable varia entre un 2 i 4% menys per la inductància de 0,5 pu, que el valor es dispara fins pràcticament un 18% (a partir d'aquest valor d'inductància el sistema deixa de ser estable). En canvi l'amplitud superior respecte el valors varia entre un 0,751 i 3,678%, un rang més gran que en l'amplitud inferior. Com en el cas anterior per una inductància de 0,5 pu es dispara fins un 16%. En canvi les freqüències van disminuint a mesura que s'augmenta la inductància.

6.2 Simulació del model amb injecció de potència

6.2.1 Simulació amb potència activa constant

Un cop s'havia simulat i estudiat el model base s'ha procedit a realitzar una simulació per veure com afecta injectar potència a la resposta temporal del MGES del nus 1. Per això s'ha fet una primera simulació implementant un MPE ideal sense control per injectar 1,35 GW de potència activa i 0 VAR de potència reactiva a la xarxa en el nus 2. S'ha simulat amb una font de corrent alterna a la qual se li ha indicat la potència activa que injecta a la xarxa. Per realitzar la simulació s'ha dut a terme la mateixa metodologia que en l'apartat anterior.

Com s'observa en la figura 21 el resultat varia considerablement quan s'injecta potència amb el MPE amb inductàncies petites. Primer de tot es veu que la silueta que segueix la potència no és igual, hi ha més oscil·lacions però l'amplitud és molt inferior al del model base. Tot i tenir més oscil·lacions el sistema s'estabilitza al voltant del segon 25.

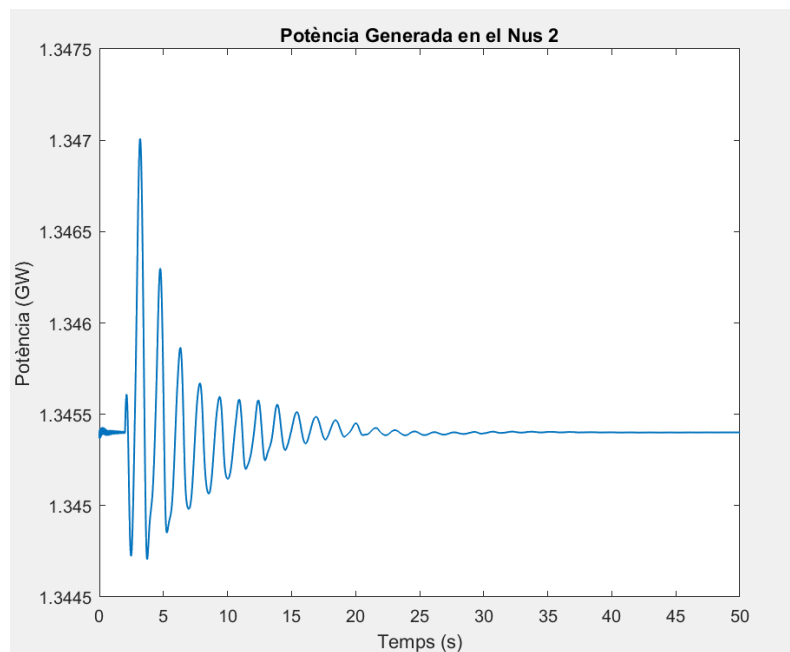


Figura 21: Potència generada en el Nus 2 amb injecció de potència i una inductància de 0,025 pu

A continuació s'ha realitzat un escombrat de diferents valors de la inductància per veure com canvia el comportament del sistema. Aquest escombrat s'ha realitzat des d'un valor de la inductància de $0,05 pu$ fins a un valor de $0,6 pu$ augmentant-la de $0,025$ en $0,025$. Com s'observa en la figura 22 a mesura que s'augmenta la inductància la freqüència va disminuint com en el cas sense injecció de potència. També s'observa que l'amplitud disminueix amb l'augment de la inductància però el temps que triga en establitzar-se es major. En la següent imatge es pot observar la representació de la potència en el nus 2 només d'algunes inductàncies ja que s'ha cregut convenient no representar-les totes per poder observar millor el resultat. Tot i així, amb aquests valors ja es pot observar la tendència que segueix en augmentar la inductància.

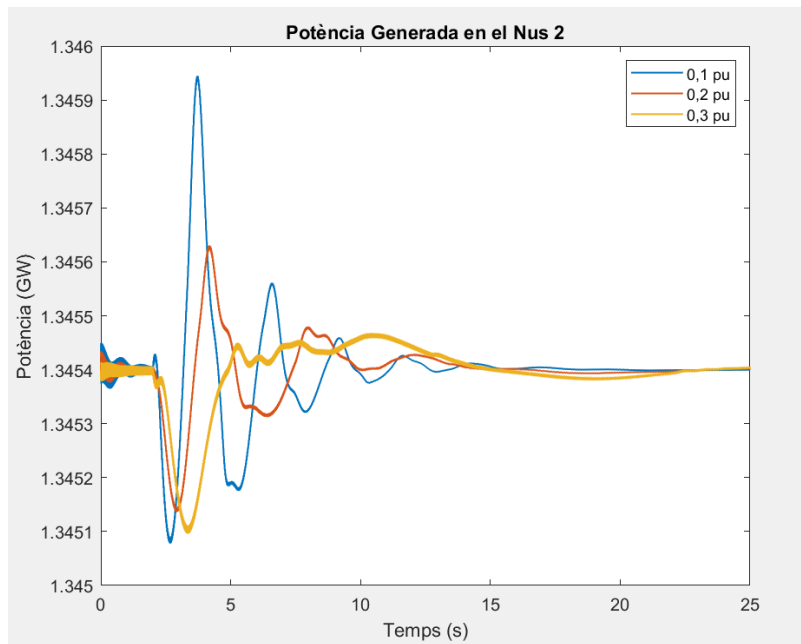


Figura 22: Detall de la potència generada en el nus 2 amb injecció i inductàncies de $0,1$, $0,2$ i $0,4 pu$

En aquestes simulacions s'ha observat que per les inductàncies amb un valor proper a $0,3 pu$ ($0,275, 0,3$ i $0,325 pu$) el resultat no comença en el mateix valor que en les altres simulacions i l'amplitud és molt més gran que en els altres casos. Això pot ser degut a un problema de ressonància del sistema amb la inductància. Per això no s'ha representat en la gràfica anterior i s'ha representat en una gràfica a part.

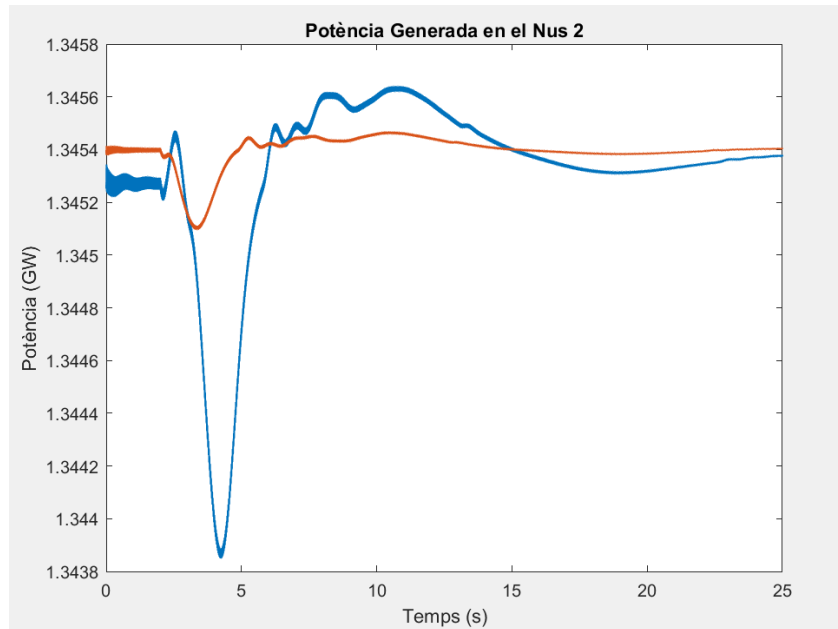


Figura 23: Detall de la potència generada en el nus 2 injecció de potència i inductàncies de $0,3$ i $0,4 pu$

Valor inductància (pu)	Amplitud inferior (GW)	Amplitud inferior (%)	Amplitud superior (GW)	Amplitud superior (%)	Freqüència 12 (Hz)	Freqüència 23 (Hz)
0,05	1,34494	0,0342	1,34640	0,0743	0,347	0,389
0,10	1,34508	0,0238	1,34594	0,0401	0,347	0,389
0,15	1,34512	0,0208	1,34574	0,0253	0,290	0,287
0,20	1,34514	0,0193	1,34563	0,0171	0,265	0,245
0,25	1,34514	0,0193	1,34556	0,0119	0,224	0,234
0,30	1,34385	0,115	1,34564	0,0178	0,390	0,387
0,35	1,34385	0,115	1,34564	0,0178	0,385	0,454
0,40	1,34510	0,0223	1,34455	0,00372	0,420	0,352
0,45	1,34507	2,0245	1,34548	0,00223	0,333	0,480

Taula 12: Valors característics de la potència generada al nus 2 del model amb injecció de potència activa per diferents valors d'inductàncies

Un cop realitzades les simulacions s'ha realitzat una taula comparativa entre el model base i el model amb injecció de potència. Com s'observa en la taula la reducció quan s'implanta el MPE és considerable, la reducció de l'amplitud inferior varia entre 33 i 38 MW que es tradueix en uns percentatges d'entre un 2,5 i un 2,9%. La reducció va augmentant quan s'augmenta la inductància fins que arriba a un valor d'inductància de 0,3 pu que baixa degut a la dinàmica anòmla que té. L'amplitud superior té la mateixa dinàmica però el rang de variació es més gran (de 8 a 49 MW que significa uns percentatges de 0,6 a 3,54%)

Valor inductància (pu)	Reducció amplitud inferior (MW)	Reducció amplitud inferior (%)	Reducció amplitud superior (MW)	Reducció amplitud superior (%)
0,05	32,73	2,49	8,19	0,60
0,10	35,06	2,68	9,30	0,69
0,15	36,442	2,78	10,74	0,79
0,20	37,23	2,85	11,26	0,83
0,25	37,66	2,88	21,41	1,57
0,30	36,41	2,78	32,06	2,33
0,35	36,46	2,79	38,33	2,77
0,40	37,70	2,88	45,39	3,27
0,45	37,50	2,87	49,40	3,54

Taula 13: Comparació entre els resultats del model base i del model amb injecció de potència

6.2.2 Simulació variant la potència activa injectada

Per veure el comportament del sistema quan s'injecten diferents valors de potència a la xarxa, s'han realitzat les simulacions variant la potència entregada pel MPE ideal pels diferents valors d'inductància. Per poder veure l'efecte del canvi de potència s'ha realitzat les simulacions pels valors de potència de 0,9, 1, 1,15, 1,25, 1,35 i 1,45 GW i per les inductàncies de 0,1, 0,2, 0,3 i 0,4 pu. Com es pot observar en la figura 24 a mesura que s'augmenta la potència l'amplitud de les oscil·lacions disminueix. Per potències menors a 0,9 GW i majors de 1,25 GW el sistema ja no és estable.

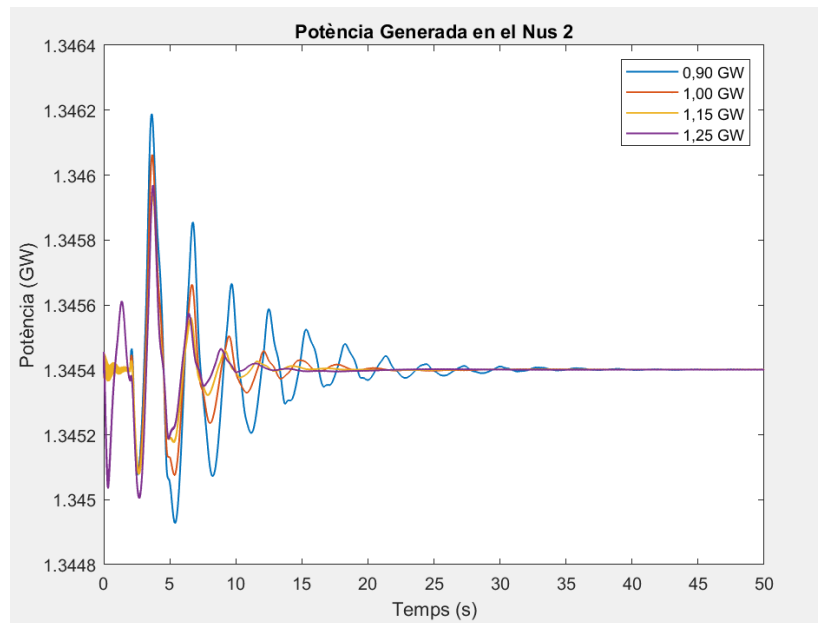


Figura 24: Potència generada en el nus 2 per una inductància de 0,1 pu i potències 0,9, 1, 1,15, 1,25 GW.

Com s'observa en la figura 25 a mesura que s'augmenta la inductància l'amplitud de les oscil·lacions disminueix però a partir de la inductància de 0,4 pu la resposta canvia completament i el sistema deixa de ser estable.

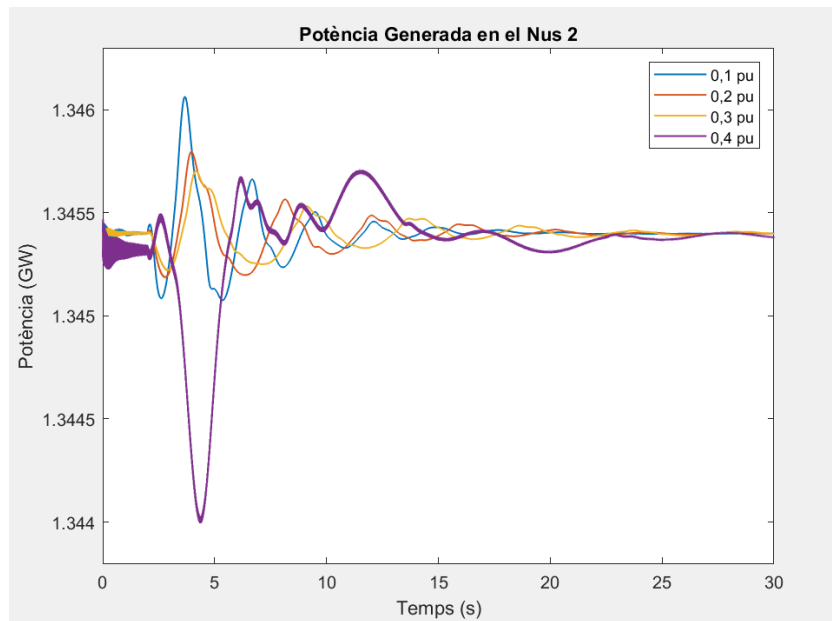


Figura 25: Potència generada en el nus 2 per inductàncies de 0, 1, 0, 2 i 0, 4 pu i potència 1, 25 GW.

6.2.3 Simulació variant la potència activa consumida

Per veure el comportament del sistema quan es consumeixen diferents valors de potència a la xarxa, s'han realitzat les simulacions variant la potència consumida pel MPE ideal pels diferents valors d'inductància. Per poder veure l'efecte del canvi de potència i inductància s'han realitzat dues simulacions: la primera fixant la inductància i variant la potència (figura 26) i la segona variant la inductància i fixant la potència (figura 27). S'han realitzat les simulacions amb els valors de potència de 0, 9, 1, 1, 15, 1, 25 GW i els valors d'inductància de 0, 1, 0, 2, 0, 3 i 0, 4 pu.

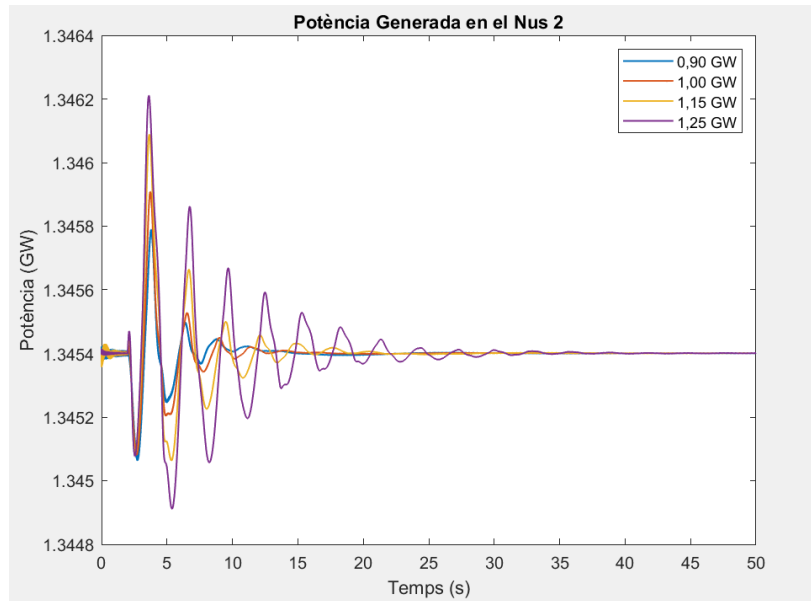


Figura 26: Potència generada en el nus 2 per una inductància de 0,1 pu i potències 0,9, 1, 1,15 i 1,25 GW.

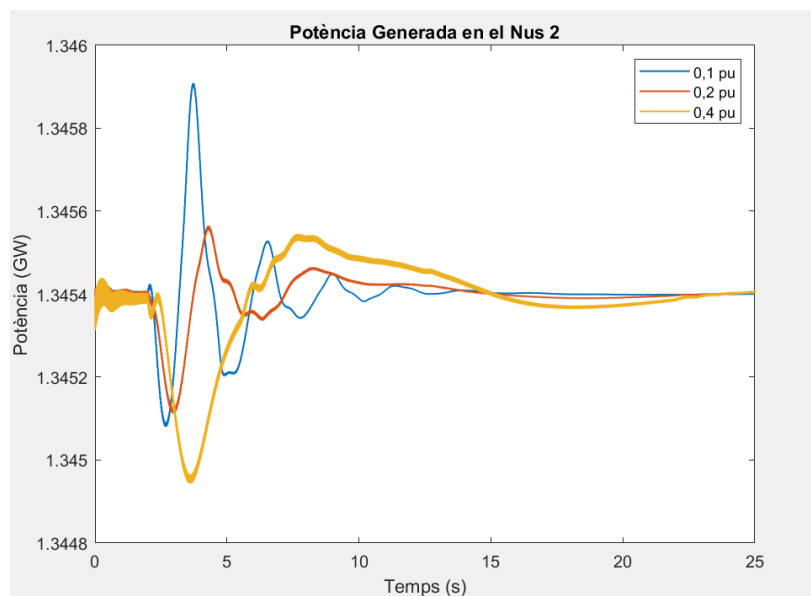


Figura 27: Potència generada en el nus 2 per inductàncies de 0,1, 0,2 i 0,4 pu i potència 1 GW.

Com s'observa en la figura 26 a mesura que s'augmenta la potència que consumeix el MPE l'amplitud de les oscil·lacions es van augmentant considerablement. En la figura 27 es pot observar que si s'augmenta la inductància les oscil·lacions es van reduint, encara que pel valor de 0,3 pu el sistema es comporta diferent ja que l'amplitud de les ones és molt superior a les altres. Amb aquestes simulacions es pot observar que per inductàncies menors a 0,1 pu i superiors a 0,4 pu el sistema deixa de ser estable. També s'observa que a partir d'una potència de 1,25 GW i per sota de 0,9 pu el sistema deixa de ser estable per tots els valors d'inductàncies.

6.2.4 Simulació injectant potència activa i reactiva

Per observar el comportament del sistema quan s'injecta potència activa i reactiva al nus 2 mitjançant el MPE s'ha realitzat diferents simulacions injectant diferents valors de potència activa (1, 15, 1, 25, 1, 35 i 1, 45 *GW*) i reactiva (1, 15, 1, 25, 1, 35 i 1, 45 *GVar*) per les diferents inductàncies (0, 1, 0, 2, 0, 3 i 0, 4 *pu*). Com s'observa en la figura 28 a mesura que s'augmenta la inductància l'ona té més oscil·lacions però l'amplitud disminueix. Per inductàncies baixes (0, 1 i 0, 2 *pu*) el sistema s'acaba estabilitzant però pels altres valors no acaba d'estabilitzar-se del tot i segueix oscil·lant.

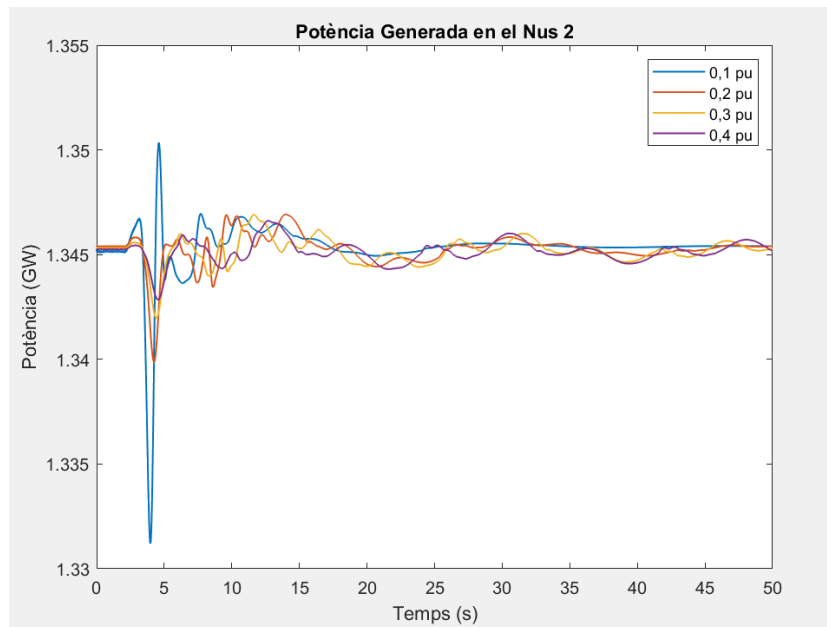


Figura 28: Potència entregada en el nus 2 per inductàncies de 0, 1 0, 2, 0, 3 i 0, 4 *pu* i potències activa i reactiva d' 1, *GW* i 1 *GVar*.

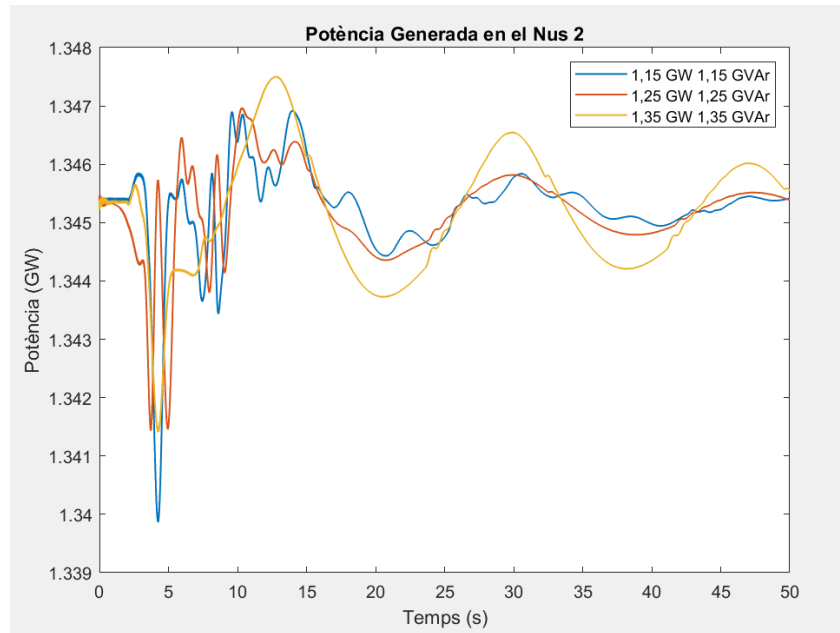


Figura 29: Potència entregada en el nus per una inductància de $0,2 pu$ i potències actives d' 1, 15, 1, 25 i 1, 45 GW i potències reactives d' 1, 15, 1, 25 i 1, 45 GVar.

A partir d'inductàncies de valor superior a $0,2 pu$ el sistema oscil·la molt i no s'acaba estabilitzant. Aquesta dinàmica es pot observar en la següent imatge.

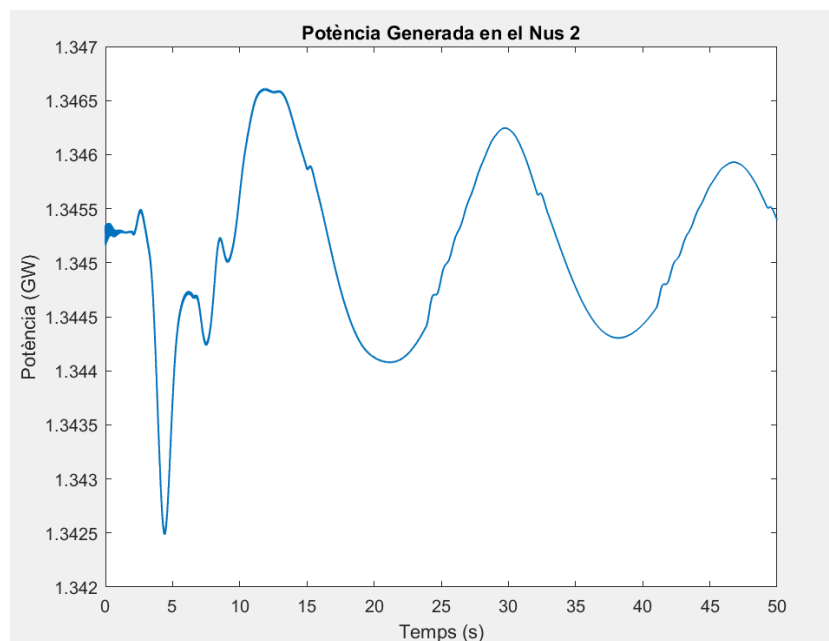


Figura 30: Potència entregada en el nus 2 per una inductància de $0,3 pu$ i potència activa i reactiva d' 1, 25 GW i i reactiva d'1, 25GVar.

subsubsectionSimulació variant la potència activa i reactiva consumida

Per veure el comportament del sistema quan es consumeixen diferents valors de potència a la xarxa, s'han realitzat les simulacions variant la potència consumida pel MPE ideal pels diferents valors d'inductància. Per poder veure l'efecte del canvi de potència i inductància s'han realitzat dues simulacions: la primera fixant la inductància i variant la potència (figura 26) i la segona variant la inductància i fixant la potència (figura 27). S'han realitzat les simulacions amb els valors de potència de 0,9, 1, 1, 15 i 1,25 *GW* i els valors d'inductància de 0, 1, 0, 2, 0, 3 i 0, 4 *pu*.

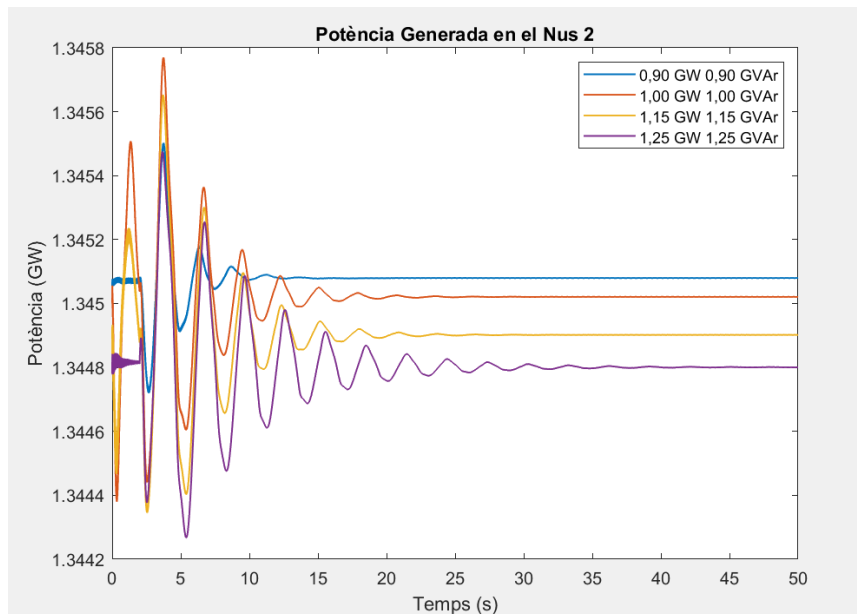


Figura 31: Potència generada en el nus 2 per una inductància de 0, 1 *pu* i potències 0,9, 1, 1, 15 i 1,25 *GW*.

Com s'observa en la figura 31 a mesura que s'augmenta la potència que consumeix el MPE el sistema s'inicia en un valor inferior de potència. També s'observa que hi ha més oscil·lacions i triga més temps en estabilitzar-se. En la figura 32 es pot observar que si s'augmenta la inductància les oscil·lacions es van reduint. Amb les simulacions realitzades es pot observar que per inductàncies menors a 0, 1 *pu* i superiors a 0, 4 *pu* el sistema deixa de ser estable. També s'observa que a partir d'una potència de 1,25 *GW* i per sota de 0,85 *GW* el sistema deixa de ser estable per tots els valors d'inductàncies.

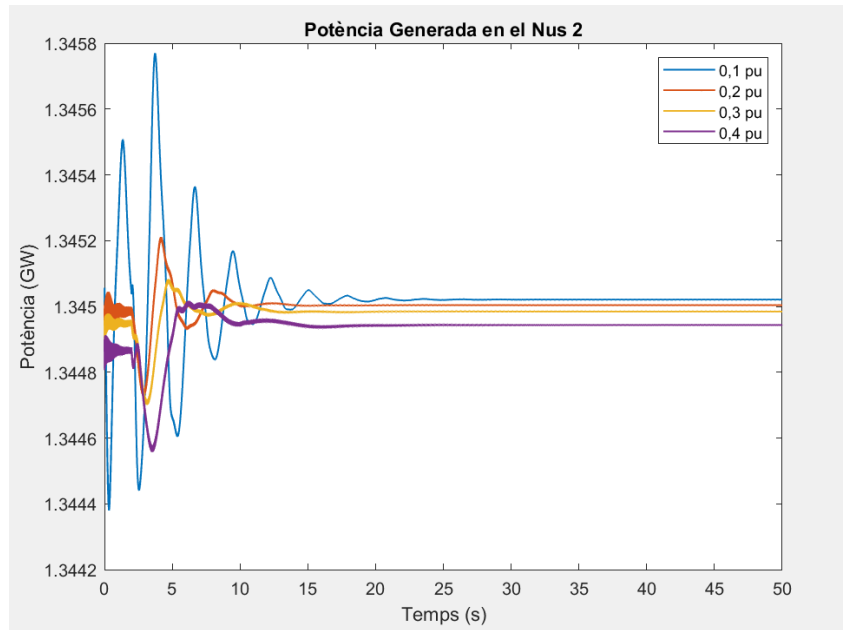


Figura 32: Potència generada en el nus 2 per inductàncies de 0,1, 0,2, 0,3 i 0,4 pu i potència 1 GW.

6.3 Validació de les simulacions amb injecció de potència activa

6.3.1 Estudi temporal

Un cop s'han realitzat les simulacions amb el MPE s'ha de comprovar si es poden acceptar els resultats obtinguts. Per comprovar si l'amortiment es acceptable s'utilitzarà el criteri d'acceptació per simulacions en el domini del temps que s'explica en el NTS. En els casos que s'injectava potència activa Aquest criteri segueix la següent metodologia [NTS]:

- S'uneixen tots el mínims (M1 a M6) i tots el màxims (P1 a P5) amb línies.
- No es contemplarà el primer mínim (M1) si la primera oscil·lació es decreixent o el primer màxim (P1) si es creixent.
- Es considera el primer cycle d'oscil·lació entre M1 i M2.
- Es mesurarà la magnitud $\Delta P1M1$ com s'indica en la figura 33: des del punt P1 es traça una línia vertical fins la intersecció amb la línia que uneix M1 i M2.
- Es mesurarà la magnitud $\Delta P5M5$ com s'indica en la imatge: des del punt P5 es traça una línia vertical fins la intersecció amb la línia que uneix M5 i M6.

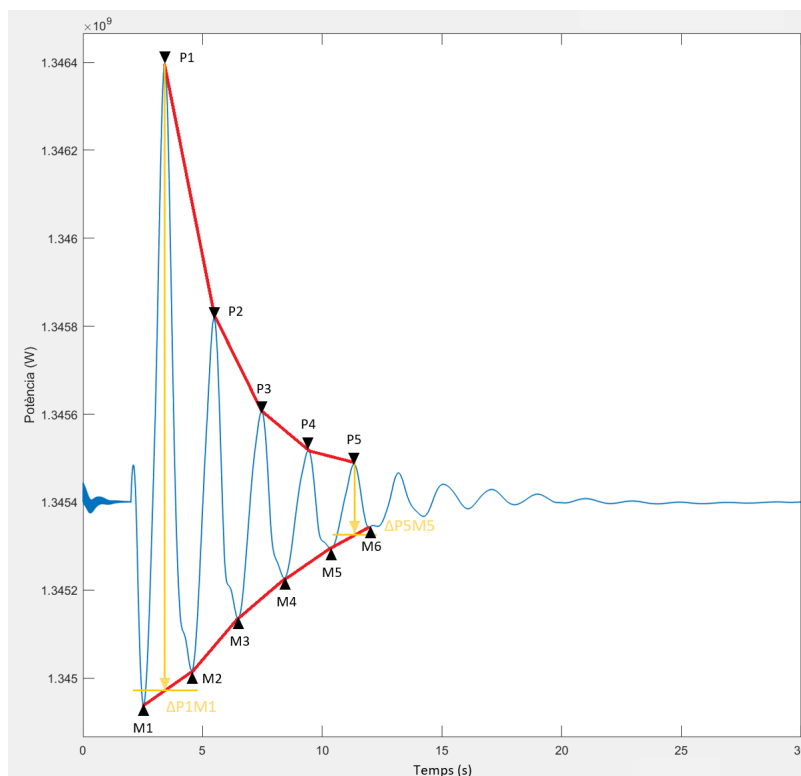


Figura 33: Criteri d'acceptació segons la NTS

El resultat és acceptable si es compleix que:

$$\Delta P5M5 < 0,25 \times \Delta P1M1 \quad (2)$$

En la següent taula es poden observar els resultats d'aquesta comprovació:

Potència injectada (GW)	Inductància (pu)	$\Delta P1M1$ (GW)	$\Delta P5M5$ (GW)	$\Delta P1M1 \times 0,25 > \Delta P5M5$
1,15	0,10	0,850	0,010	SÍ
1,15	0,20	0,380	0,001	NO
1,15	0,30	–	–	NO
1,15	0,40	–	–	INESTABLE
1,25	0,10	0,970	0,040	SÍ
1,25	0,20	0,600	0,030	SÍ
1,25	0,30	0,480	0,020	SÍ
1,25	0,40	1,540	0,030	SÍ
1,35	0,10	0,850	0,010	SÍ
1,3	0,20	0,380	0,001	SÍ
1,315	0,30	-	-	-
1,35	0,40	-	-	-
1,45	0,10	0,860	0,030	SÍ
1,45	0,20	0,410	0,020	SÍ
1,45	0,30	-	-	-
1,45	0,40	-	-	-

Taula 14: Resultats obtingut al realitzar el criteri proposat per la NTS

Les cel·les en gris no tenen resultats degut a que l'ona no té una dinàmica suficientment oscil·latòria i no es pot aplicar el criteri descrit anteriorment. Tot i això, visualitzant les gràfiques es podia arribar a la conclusió que l'amortiment era el correcte ja que el resultat tenia poques oscil·lacions i s'estabilitzava ràpidament.

6.3.2 Estudi fft

Com que per algunes simulacions el criteri anteriorment definit no es podia aplicar, s'ha buscat una eina alternativa per poder veure com afecta la injecció de potència a la xarxa. Finalment s'ha decidit utilitzar la Transformada Ràpida de Fourier (o FFT, de l'anglès Fast Fourier Transform) per veure la freqüència de les ones de potència anteriorment representades. Aquesta eina és un algoritme que serveix per calcular la Transformada de Fourier d'una senyal i la transforma del domini del temps al domini freqüencial.

Cal destacar que les senyals obtingudes no són ones periòdiques i les resultats s'han d'interpretar de manera comparativa. Tot i això, l'eina serveix per poder tenir una idea del comportament oscil·latori del sistema i sobretot pot ajudar a mostrar les diferències entre les dinàmiques del sistema amb injecció de potència i sense.

En la imatge 34 es s'observa el resultat obtingut al realitzar la FFT a l'ona de la potència entregada al nus dos amb una inductància de la xarxa de $0,1 pu$ (figura 17). Aquest anàlisi mostra dos pics en les freqüències de 50 i 100 Hz (valors important ja que 50 Hz és la freqüència de la xarxa). Si s'amplia la senyal en les freqüències baixes, com es pot veure en la imatge 35, també es pot observar com hi ha un pic en la freqüència de 0,1 i 0,65 Hz aproximadament. El valor de la freqüència de 0,65 també s'havia calculat manualment a partir d'analitzar l'ona en el domini temporal (com es veu en la taula 11).

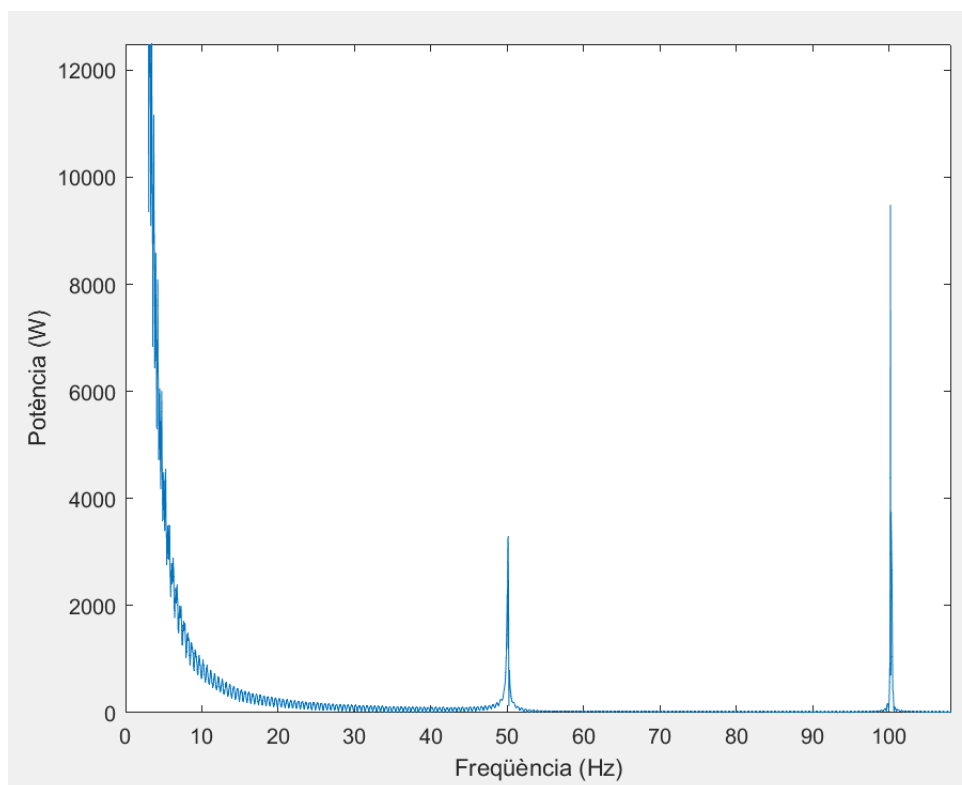


Figura 34: Resultat del FFT del model base i una inductància de $0,1 pu$.

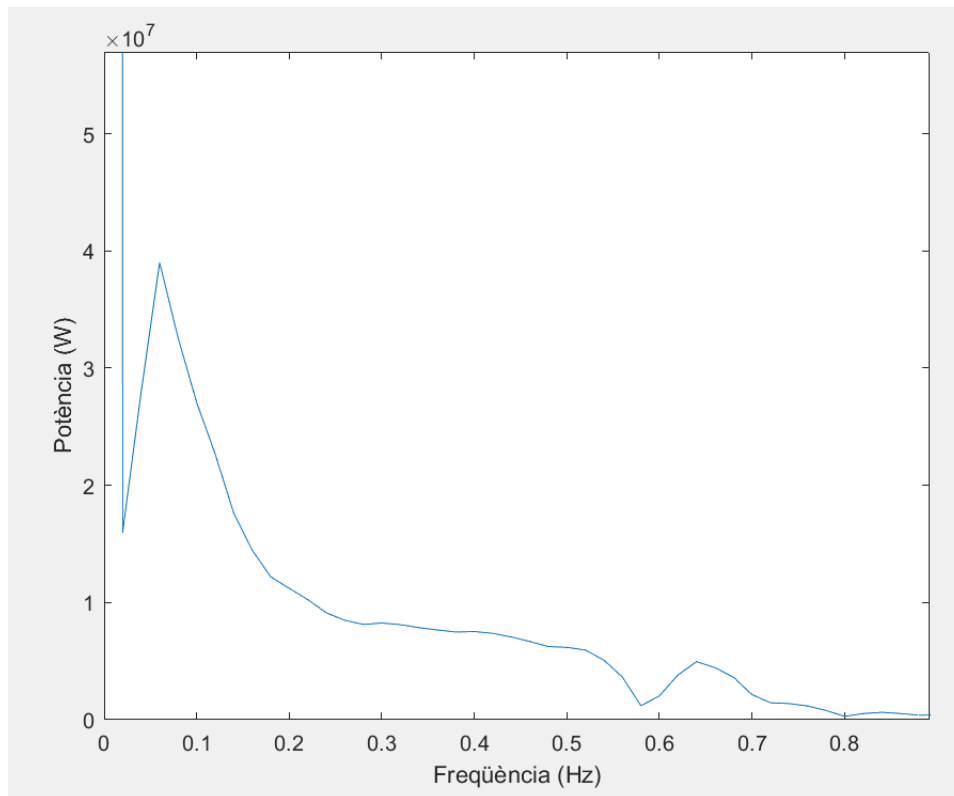


Figura 35: Resultat detall del FFT del model base i una inductància de 0,1 pu

Pel sistema amb injecció de potència activa també s'ha realitzat l'estudi de la *FFT* i s'ha pogut observar que les oscil·lacions de $0,1\text{ Hz}$ i 100 Hz s'atenuen i no apareixen. Les oscil·lacions que apareixen són les de $0,38$ i de 50 Hz , el primer valor és el mateix que el calculat en el domini del temps i el segon és la freqüència de la xarxa.

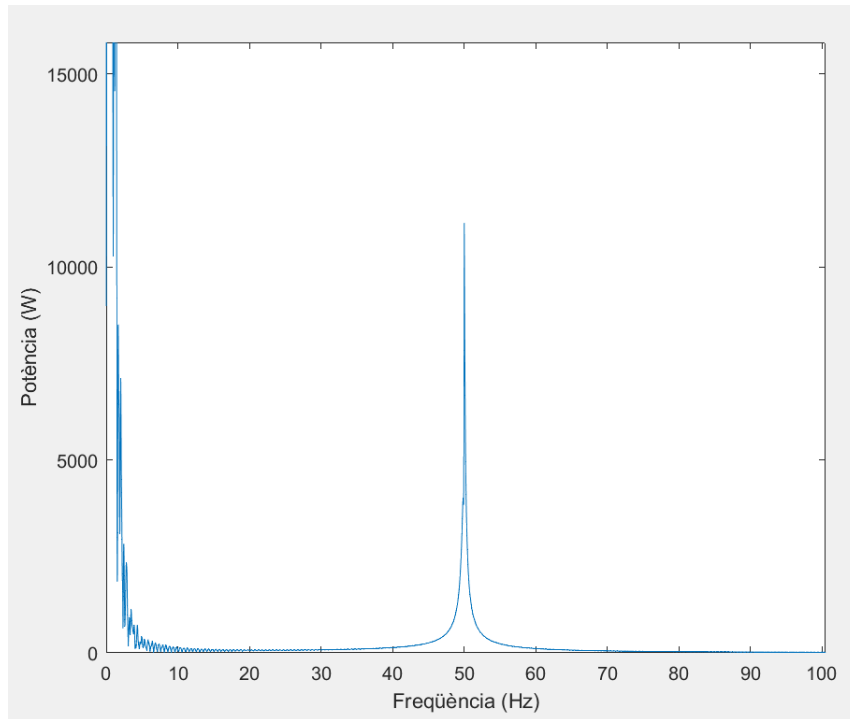


Figura 36: Resultat detall del FFT del model amb injecció de potència i una inductància de $0,1\text{ pu}$

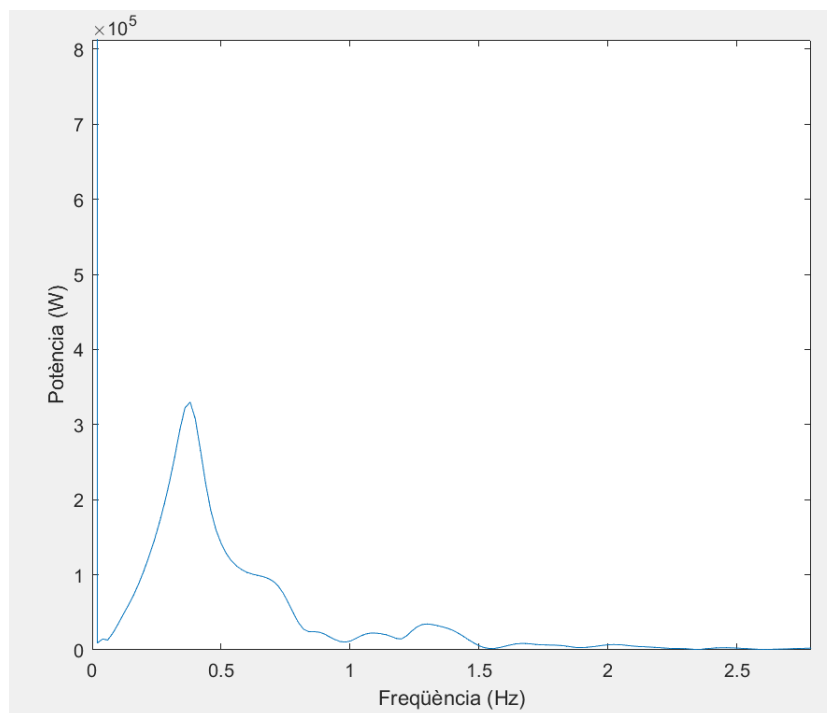


Figura 37: Resultat detall del FFT del model amb injecció de potència i una inductància de 0,1 pu

7 Pressupost

7.1 Cost de personal

Les feines executades durant el treball s'han classificat segons la dificultat i les capacitats necessàries per dur-les a terme per poder assignar-les un preu. Aquestes tasques es classifiquen en: recerca bibliogràfica, disseny i implementació, anàlisi dels resultats i redacció de la memòria. Per les activitats més tècniques que necessiten una major formació se li han assignat un preu de 40 €/hora, en canvi, per les activitats que no necessiten una formació tan tècnica se li han assignat un preu de 30 €/hora.

Cost de personal			
Activitat	Hores	Preu hora (€/h)	Cost total (€)
Recerca bibliogràfica	80	30	2400
Disseny i implementació	250	40	10000
Anàlisi dels resultats	75	40	3000
Redacció de la memòria	100	30	3000
Hores totals	505	Subtotal cost de personal	18400

Taula 15: Pressupost del cost de personal

7.2 Cost de llicències i subscripcions

Per poder realitzar el treball s'ha hagut d'utilitzar el software *Matlab*, especialment l'eina *Simulink*, per poder modelar, simular i estudiar el sistema elèctric proposat. En relació al processador de text no ha suposat cap cost ja que s'ha utilitzat el processador de llicència oberta *LATEX*. Per fer la recerca bibliogràfica s'han visitat diferents pàgines de lliure accés però també s'ha hagut de visitar la pàgina web de *IEEE* que per poder accedir al material és necessari subscriure's.

Cost de programari i subscripcions				
Programari/ Subscripció	Unitats	Cost (€/any)	Temps utilitzat (mesos)	Cost (€)
<i>Matlab</i>	1	800	7	466,67
<i>IEEE explore</i>	1	27	3	6,75
Subtotal cost programari				473,42

Taula 16: Pressupost del cost del programari i les subscripcions [25] [26]

7.3 Cost de material

Per realitzar el treball s'ha utilitzat el portàtil personal i el seu cost està especificat en la següent taula:

Cost de material					
Material	Unitats	Cost (€)	Vida útil (anys)	Temps amortització (mesos)	Cost amortització (€)
LG Gram 17Z90Q	1	1400	5	7	163,33
Subtotal cost material					163,33

Taula 17: Pressupost del cost del material

7.4 Cost total del projecte

Com es pot observar en la taula 18 el projecte costaria un total d'uns 23000 €.

Cost total	
Tipus de cost	Preu (€)
Subtotal cost de personal	18400
Subtotal cost material	163,33
Subtotal cost programari	473,42
Total sense IVA	19036,75
Total amb IVA (21%)	23034,47

Taula 18: Pressupost general del projecte

Per poder realitzar el projecte la llicència del *Matlab* i la subscripció a l'IEEE han sigut aportades per la UPC.

8 Impacte ambiental

L'augment de la demanda d'energia i els recursos finits del planeta Terra fan que si es vol seguir augmentant la població i el creixement econòmic s'han de millorar i optimitzar els processos d'obtenció d'energia. Per això, aquest treball pot ajudar positivament a l'optimització d'aquests processos ja que si s'afegeix un MPE al sistema base explicat, l'amplitud de les oscil·lacions es redueixen considerablement. Aquesta reducció pot ajudar a que no es produeixin fallides en el sistema i que el sistema elèctric sigui més estable. El treball també serveix per veure per quines condicions el sistema és inestable i si això es té controlat, es poden evitar fallides a la xarxa que tenen una gran implicació en la pèrdua d'energia, ja que la posada en marxa de plantes com aquesta costen molt. També pot ser una via per veure que la implementació de les energies connectades per electrònica de potència pot ajudar a l'estabilitat de la xarxa i fer que el control sigui més senzill i més eficient.

La implementació d'aquest MPE segurament es faci amb un parc fotovoltaic o una bateria de gran capacitat alimentada per una font d'energia renovable, fonts d'energies que no generen gasos d'efecte hivernacle. Tot i això, la contaminació ambiental no és 0, ja que els processos de fabricació dels elements que componen les plantes fotovoltaïques o les bateries sí contaminen. Tenen un efecte important en l'ecosistema (extracció de minerals pels panells fotovoltaïcs i les bateries) i els processos generen gasos d'efecte hivernacle (extracció de minerals amb maquinària pesada, transport dels minerals i dels productes intermedis i finals). També s'ha de tenir en compte els residus que generen aquests aparells electrònics, ja sigui durant el procés de fabricació com al final de la seva vida útil.

El sistema base està format per dos generadors síncrons, formats per turbines de vapor d'aigua. L'energia necessària per obtenir el vapor d'aigua s'obté de la crema de combustibles fòssils que, en funció del que s'utilitzi, contaminen més o menys. Si s'utilitza carbó és el més contaminant i és pot considerar utilitzar altres combustibles, com gas natural. Cal destacar que el treball està enfocat en la implementació d'un MPE per poder reduir l'energia que aporten aquests tipus de centrals que contaminen molt. També es volia donar a conèixer que la implantació de fonts d'energia connectades a la xarxa amb electrònica de potència pot ser molt beneficiosa si es realitza correctament (actualment no es tenen els coneixements ni les eines per poder tenir una xarxa amb generació total d'energies renovables). Això permetrà millorar el control d'aquestes plantes i així millorar l'eficiència energètica.

9 Conclusions

Un cop realitzades les simulacions i analitzat els resultats es poden extreure diferents conclusions. En relació amb l'estudi de l'estabilitat de la xarxa es poden extreure les següents conclusions:

- Les oscil·lacions electromecàniques, provocades per un canvi sobtat en les condicions del sistema, s'han d'estudiar en profunditat ja que si no s'aconsegueixen amortir correctament poden provocar al fallida de la xarxa.
- La connexió a la xarxa de fonts d'energia mitjançant electrònica de potència (generalment les energies renovables i bateries de gran capacitat) afecta negativament al control de l'estabilitat de la xarxa, ja que provoquen que la xarxa sigui més feble i no es puguin amortir correctament les oscil·lacions electromecàniques. Això pot provocar fallides i afectacions als components de la xarxa.
- En un futur amb millors controladors la connexió de fonts d'energia amb aquest tipus de connexió pot ser molt important i millorar la implementació de les energies renovables i fins i tot millorar el control de les xarxes.

En relació a la simulació del model base es pot concloure que:

- Quan s'introdueix un canvi del 2% en el voltatge de referència del MGES2 apareixen oscil·lacions interàrea que van des de 0,8 a 0,2 Hz per valors d'inductància de la línia de transport de 0,05 a 0,50 pu.
- Tot i això el model es suficientment fort per poder amortir les oscil·lacions interàrea. El sistema és estable i realitza un bon amortiment per valors d'inductàncies de 0,05 fins a 0,45 pu. A partir de 0,6 pu el sistema deixa d'amortir les oscil·lacions i es torna inestable.
- Quan s'injecta potència activa a la xarxa idealment el sistema redueix considerablement l'amplitud màxima de les oscil·lacions (entre un 3 i un 5,5%) però en canvi el rang d'inductàncies per les quals el sistema és estable es redueix, a partir de 0,45 pu el sistema deixa de ser estable. Les freqüències es redueixen i passen d'estar compreses entre 0,8 i 0,3 Hz a estar entre 0,25 i 0,5 Hz.
- Per valors de la inductància propers a 0,3 pu apareix una pertorbació i el sistema es comporta una mica diferent ja que la dinàmica de les altres simulacions són semblants (tant per valors superiors com inferior) Aquesta anomalia fa que s'inicialitzi en un valor diferent, que l'amplitud sigui molt superior i que la dinàmica descendent de les freqüències es trenqui i fa que per aquests valors la freqüència augmenti.
- El rang de potències per les quals el sistema és estable és 1,15 i 1,45 GW, fora d'aquestes potències el sistema deixa de ser estable
- Amb el criteri proposat a la NTS es pot observar que la majoria de casos d'injecció de potència són acceptables en canvi quan es varia la potència alguns casos ho deixen de ser.
- Gràcies a l'eina FFT s'ha pogut comparar els resultats de forma freqüencial i veure com pel model base apareixen les freqüències de baixa freqüència calculades analíticament (les

freqüències interària compreses entre $0,3$ i $0,8 pu$) i freqüències més altes de valor 50 i $100 Hz$ relacionades amb la freqüència de la xarxa. En canvi gràcies a injectar potència activa s'aconsegueix amortir les oscil·lacions de $0,1$ i $100 Hz$.

- De caràcter general s'ha conclòs que és important el control i amortiment de les oscil·lacions interàrea per garantir l'estabilitat de la xarxa.
- S'ha de tenir un control molt acurat ja que variacions del sistema, com canvis de potències injectades o consumides, pot afectar negativament a l'estabilitat de la xarxa.

Agraïments

M'agradaria agrair al tutor Marc Cheah per haver-me proposat realitzar aquest treball ja que finalment ha sigut un treball que s'ha ajustat a les inquietuds i objectius que es tenien inicialment. Agrair-li que s'hagi implicat activament en resoldre'm els dubtes que sorgien durant la realització del treball, que hagi contestat els correus el més aviat possible i estar disposat a tenir reunions quan era necessari per poder resoldre els dubtes. També li volia agrair a la Paula i al Joan per haver-me donat suport moral durant la realització del treball quedant per anar a la biblioteca per fer el treball en companyia. També li volia agrair a la Paula els consells que m'ha donat per la realització del treball i el suport anímic en els moments més difícils. També agrair a la meva família per estar sempre al meu costat, haver-me donat suport durant la realització del treball i per haver-me donat l'educació i els medis necessaris per poder haver dut a terme aquest treball. Agrair als meus amics per haver-me fet passar bons moments durant la realització d'aquest treball. Finalment agrair a l'ETSEIB i a la UPC per haver-me donat l'educació acadèmica durant els anys que he estudiat en aquest centre per poder realitzar aquest treball i ser l'enginyer que sóc avui en dia.

Bibliografia

- [1] IEA (2022), <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Electricity%20and%20heat&indicator=TotElecCons> Consultat: (16/06/2022)
- [2] ENERDATA (2022), <https://datos.enerdata.net/electricidad/estadisticas-mundiales-produccion-electricidad.html> Consultat: (16/06/2022)
- [3] NORMA TÉCNICA DE SUPERVISIÓN DE LA CONFORMIDAD DE LOS MÓDULOS DE GENERACIÓN DE ELECTRECIDAD SEGÚN EL REGLAMENTO UE 2016/631
- [4] SIEMENS-ENERGY (2017), <https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:931c620f-8679-4d27-9208-9cec98c4e94f/width:1125/crop:0,006:0,04673:0,991:0,74633/quality:high/cf130743b.jpg> Consultat: (10/05/2022)
- [5] EL INDEPENDIENTE (2018), <https://www.elindependiente.com/wp-content/uploads/2018/11/fotovoltaica-ep-1440x808.jpg> Consultat: (10/05/2022)
- [6] SOUMYADEEP MAITY, R.RAMYA, *A Comprehensive Review of Damping of Low Frequency Oscillations in Power Systems*, Blue Eyes Intelligence Engineering & Sciences Publications, 2019.
- [7] PRABHA KUNDUR, JOHN PASERBA, VENKAT AJJARAPU, GÖRAN ANDERSSON, ANJAN BOSE, CLAUDIO CANIZARES, NIKOS HATZIARGYRIOU, DAVID HILL, ALEX STANKOVIC, CARSON TAYLOR, THIERRY VAN CUTSEM I VIJAY VITTAL , *Definition and Classification of Power System Stability*, IEEE Transaction on power systems, 2004.
- [8] F. ACKERMANN, N. BIHLER AND S. ROGALLA, *Stability prediction and stability enhancement for large-scale PV Power plants*, in 7th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Vancouver, 2016.
- [9] JIAN SUN, FELLOW, IEEE, MINGJIE LI, ZHIGANG ZHANG, TAO XU, JINGBO HE, HAIJIAO WANG I GUANGHUI LI, *Renewable Energy Transmission by HVDC Across the Continent: System Challenges and Opportunities*, CSEE Journal of power and Energ Systems, 2017.
- [10] BY JULIA MATEVOSYAN, JASON MACDOWELL, NICK MILLER, BABAK BADRZADEH, DEEPAK RAMASUBRAMANIAN, ANDREW ISAACS, RYAN QUINT, ECKARD QUITMANN, RALPH PFEIFFER, HELGE URDAL, THIBAUT PREVOST, VIJAY VITTAL, DENNIS WOODFORD, SHUN HSIEN HUANG, AND JON O'SULLIVAN , *A Future With Inverter-Based Resources*, IEEE power & energy magazine, 2021.
- [11] MOHAMMADREZA HATAMI, MOHAMMADREZA FARROKHIFARD I MOSTAFA PARNIANI, *A Non-Stationary Analysis of Low-Frequency Electromechanical Oscillations Based on a Refined Margenau-Hill Distribution*, IEEE Transaction on power systems , 2016.
- [12] HAIFENG WANG, WENJUAN DU, *Active and reactive power control of grid connected distributed generation systems*, Springer, New York, 2016, pp. 1–13.
- [13] ROSSANO MUSCA , FRANCISCO GONZALEZ-LONGATT I CESAR A. GALLEGO SÁNCHEZ , *Power System Oscillations with Different Prevalence of Grid-Following and Grid-Forming Converters*, MDPI,

Suïssa, 2022.

- [14] PRABHA KUNDUR, JOHN PASERBA, VENKAT AJJARAPU, GÖRAN ANDERSSON, ANJAN BOSE, CLAUDIO CANIZARES, NIKOS HATZIARGYRIOU, DAVID HILL, ALEX STANKOVIC, CARSON TAYLOR, THIERRY VAN CUTSEM I VIJAY VITTAL , *Definition and Classification of Power System Stability*, IEEE Transaction on power systems, 2004.
- [15] A. EGEA-ALVAREZ, A. JUNYENT-FERRÉ, AND O. GOMIS-BELLMUNT, *Active and reactive power control of grid connected distributed generation systems*, 2012, pp. 47–81.
- [16] JIAN SUN, FELLOW, IEEE, MINGJIE LI, ZHIGANG ZHANG, TAO XU, JINGBO HE, HAIJIAO WANG I GUANGHUI LI, *Renewable Energy Transmission by HVDC Across the Continent: System Challenges and Opportunities*, CSEE Journal of power and Energty Systems, 2017
- [17] ŁUKASZ KOCEWIAK, RAMON BLASCO-GIMENEZ, CHRISTOPH BUCHHAGEN, JUN BUM KWON, YIN SUN, ARAMIS SCHWANKA TREVISAN, MATS LARSSON I XIONGFEI WANG , *Overview, Status and Outline of Stability Analysis in Converter-based Power Systems*, 19th Int'l Wind Integration Workshop, 2020
- [18] NIKOS HATZIARGYRIOU , JOVICA MILANOVIC, CLAUDIA RAHMANN, VENKATARAMANA AJJARAPU, CLAUDIO CANIZARES, ISTVAN ERLICH, DAVID HILL, IAN HISKENS INNOCENT KAMWA, BIKASH PAL , POUYAN POURBEIK, JUAN SANCHEZ-GASCA, ALEKSANDAR STANKOVIC, THIERRY VAN CUTSEM, VIJAY VITTAL I COSTAS VOURNAS, *Definition and Classification of Power System Stability – Revisited & Extended*, IEEE Transaction on power systems, 2021
- [19] P.KUNDUR, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc., New York, 1993.
- [20] IKRAM NACEF, KHADIJA BEN KILANI I MOHAMED ELLEUCH, *Understanding Interarea Oscillations in Power Systems Integrating Wind Power*, 3rd CISTEM'18, Algeria, 2018.
- [21] IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY, *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*, USA, 2016.
- [22] N. JANSSENS I A. KAMAGATE, *Interarea oscillations in Power Systems*, Bèlgica, 2016.
- [23] M.KLEIN, G.J. ROGERS I P. KUNDUR, *A fundamental study of inter-area oscillations in Power Systems*, Canadà, 2016.
- [24] OLIVIER ANTOINE I JEAN-CLAUDE MAUN, *Inter-area oscillations: identifying causes of poor damping using phasor measurement units*, Belgium, 2016.
- [25] MATHWORKS (2020), *Pricing and Licensing*, MathWorks, lloc web: <https://www.mathworks.com/pricing-licensing.html?prodcode=ML&intendeduse=comm>, Consultat: (10/09/2022).
- [26] IEEE (2020), *Memberships and Subscriptions Catalog*, IEEE, lloc web: <https://www.ieee.org/membership-catalog/productdetail/showProductDetailPage.html?product=MEMPE031&refProd=MEMPE031>, Consultat (10/09/2022).