

**Robert Chillida Taus**

**Control d'un PMSG accionat per OWC**

**TREBALL DE FI DE GRAU**

**dirigit pel Dr. José Antonio Barrado Rodrigo**

**Grau d' Enginyeria Elèctrica**



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

**Tarragona**

**2024**



## **Resum**

Aquest treball se centra en l'estudi i simulació d'un sistema de generació d'energia elèctrica basat en una columna d'aigua oscil·lant (OWC) connectada a un generador sincrònic d'imants permanents (PMSG), aplicant tècniques de control vectorial per a la seva optimització.

A partir d'un model detallat del sistema OWC, s'han implementat diverses estratègies de control, incloent el control de circuit obert i el mètode ZDC, per gestionar eficientment el corrent generat per la màquina. També s'ha analitzat la transformació dq0-abc per a sincronitzar el corrent generat amb el sistema de coordenades rotatives.

Les simulacions realitzades mitjançant PSIM han permès validar els resultats obtinguts, com ara la relació entre la velocitat del rotor, el parell generat i la potència elèctrica produïda pel PMSG.

Els resultats mostren una producció energètica significativa sota diferents condicions operatives, destacant l'eficàcia del sistema de control vectorial i la integració del sistema OWC. A més, es presenta un estudi sobre l'eficiència del sistema global i una estimació de la producció energètica sota condicions reals de funcionament.

## **Abstract**

This study focuses on the analysis and simulation of an electric energy generation system based on an Oscillating Water Column (OWC) connected to a Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG), employing vector control techniques for optimization.

A detailed model of the OWC system was developed, and various control strategies were implemented, including open-loop control and the ZDC method, to efficiently manage the current generated by the machine. Additionally, the dq0-abc transformation was analyzed to synchronize the generated current with the rotating coordinate system.

Simulations performed using PSIM validated the results, showing the relationship between rotor speed, generated torque, and the electrical power produced by the PMSG.

The results demonstrate significant energy production under different operating conditions, highlighting the effectiveness of the vector control system and the integration of the OWC system. Furthermore, an analysis of the overall system efficiency and an estimation of energy production under real operating conditions are presented.



# Índex

1.	Introducció.....	1
1.1	Context i motivació del projecte.....	1
1.2	Entorn de desenvolupament.....	1
1.3	Objectius i abast del treball.....	1
1.4	Estructura del treball.....	1
2.	Fonamentació teòrica dels sistemes OWC .....	2
2.1	Energia marina: introducció i tipus.....	2
2.2	Columna d'aigua oscil·lant (OWC) .....	2
2.2.1	Principi de funcionament .....	2
2.2.2	Components principals del sistema OWC.....	2
2.2.3	Procés de funcionament .....	3
2.2.4	Avantatges del sistema OWC.....	4
2.2.5	Limitacions i desafiaments.....	4
2.3	Potencial energètic dels sistemes OWC .....	5
2.3.1	Avaluació del recurs marí .....	5
2.3.2	Eficiència dels sistemes OWC .....	6
2.4	Configuracions i tipus d'OWC.....	7
2.4.1	Tipus d'instal·lació .....	7
2.4.2	Variants de disseny de la cambra .....	8
2.4.3	Aplicacions específiques .....	9
3.	Modelatge de la turbina Wells.....	10
3.1	Descripció de la turbina Wells.....	10
3.2	Característiques i comportament aerodinàmic.....	10
3.3	Model matemàtic de la turbina Wells.....	11
3.3.1	Equacions fonamentals.....	11
3.3.2	Simulació amb PSIM .....	12
4.	Modelatge del generador síncron d'imants permanents (PMSG).....	13
4.1	Descripció del PMSG .....	13
4.2	Principis de funcionament .....	13
4.3	Característiques.....	14
4.4	Model matemàtic del PMSG .....	15
4.4.1	Equacions fonamentals.....	15
4.4.2	Simulació amb PSIM .....	16
5.	Control vectorial.....	19
5.1	Descripció del control vectorial de circuit obert.....	19

5.2	Descripció del Mètode ZDC (Zero Direct Current) .....	20
5.2	Implementació del control vectorial .....	21
5.2.1	Transformació dq0-abc .....	21
5.2.2	Càlcul de l'angle .....	22
5.2.3	Càlcul del corrent de referència .....	23
5.2.4	Valors utilitzats en el control vectorial .....	25
5.3	Resultats de la simulació del control vectorial .....	26
6.	Estudi de la producció energètica .....	27
6.1	Introducció .....	27
6.1.1	Objectiu de l'estudi .....	27
6.1.2	Condicions de funcionament .....	27
6.2	Potència mecànica generada .....	27
6.2.1	Anàlisi de la potència mecànica obtinguda .....	27
6.2.2	Impacte de les variacions de la velocitat .....	29
6.2.3	Impacte de les variacions de la força de les onades .....	30
6.3	Potència elèctrica generada .....	31
6.4	Estimació de la producció anual .....	34
6.4.1	Mètode de càlcul .....	34
6.4.2	Escenaris de producció .....	35
6.4.3	Resultats de la producció anual .....	35
7.	Discussió i anàlisi de resultats .....	36
7.1	Comparativa amb altres sistemes de generació d'energia marina .....	36
7.2	Limitacions del sistema estudiat .....	36
7.3	Propostes de millora i treball futur .....	36
8.	Conclusions .....	37
8.1	Resum dels resultats principals .....	37
8.2	Aportacions del treball .....	37
8.3	Perspectives futures .....	37
9.	Annexos .....	38
9.1	Nomenclatures .....	38
9.2	Altres documents rellevants .....	38
	Referències .....	40

# Índex de figures

Figura 1. Esquema basic de funcionament d'un sistema OWC.....	2
Figura 2. Funcionament de la columna d'aigua oscil·lant.....	3
Figura 3. Turbina Wells. ....	10
Figura 4. Model de simulació del OWC a PSIM. ....	12
Figura 5. Parell generat per la turbina Wells en N·m. ....	12
Figura 6. Components principals d'un PMSG.....	13
Figura 7. Model de simulació del PMSG a PSIM.....	16
Figura 8. Tensió (en V) i corrent de la fase (en A) A del PMSG.....	17
Figura 9. Velocitat del rotor en rad/s. ....	18
Figura 10. Simulació PSIM del consum controlat de corrent del sistema. ....	21
Figura 11. Simulació PSIM de l'angle $\theta$ , en radiants. ....	22
Figura 12. Simulació PSIM del corrent de referència.....	23
Figura 13. Simulació PSIM de la transformació dq0 a abc.....	24
Figura 14. Comparació del corrent $I_s$ amb el corrent de fase del generador.....	26
Figura 15. Simulació PSIM de la potència mecànica. ....	27
Figura 16. Potència mecànica del generador.....	28
Figura 17. Potència mecànica simulada a 3.2 Hz.....	29
Figura 18. Potència mecànica simulada a 0.8 Hz.....	29
Figura 19. Potència mecànica simulada a 40 N. ....	30
Figura 20. Potència mecànica simulada a 10 N. ....	31
Figura 21. Simulació PSIM de la potència elèctrica. ....	32
Figura 22. Potència elèctrica simulada.....	33
Figura 23. Circuit PSIM complet. ....	38
Figura 24. Esquema del Convertidor AC/DC. ....	39

# Índex de taules

Taula 1. Característiques del PMSG a PSIM. ....	16
Taula 2. Valors de corrent i tensió de fase simulats.....	17
Taula 3. Valors de la velocitat del rotor simulats.....	18
Taula 4. Valors de les constants utilitzades en el control vectorial. ....	25
Taula 5. Valors del corrent de referència calculats en la simulació.....	26
Taula 6. Valors característics de la potència mecànica calculada en la simulació.	28
Taula 7. Valors de la potència mecànica a diferents velocitats.....	30
Taula 8. Valors de la potència mecànica a diferents forces de les onades.....	31
Taula 9. Valors de la potència elèctrica en la simulació.....	33
Taula 10. Valors de les constants utilitzades en el càlcul de la potència elèctrica.	33

## **1. Introducció**

### **1.1 Context i motivació del projecte**

La transició energètica cap a fonts renovables ha fet que l'energia de les onades marines sigui una opció prometedora per reduir la dependència dels combustibles fòssils. Les Columnes d'Aigua Oscil·lant (OWC) són una tecnologia clau per convertir l'energia de les onades en energia elèctrica mitjançant turbines com la Wells i generadors com els PMSG.

Aquest projecte busca optimitzar el control i el modelatge d'aquests sistemes per maximitzar la producció d'energia, contribuint al desenvolupament de tecnologies sostenibles i demostrant la viabilitat de l'energia marina en el context energètic actual.

### **1.2 Entorn de desenvolupament**

Per al desenvolupament del projecte, s'ha escollit realitzar les simulacions amb la versió 11.1.3 del PSIM, ja que és una eina senzilla i útil per a realitzar simulacions de circuits elèctrics i de control. Això ens permetrà dur a terme una simulació del control d'un OWC i analitzar els resultats en forma de gràfiques.

### **1.3 Objectius i abast del treball**

En el treball s'analitzarà l'estructura, el control i les prestacions d'un sistema de generació d'energia elèctrica basat en una columna d'aigua oscil·lant. Els objectius principals del treball són els següents:

- Analitzar el funcionament d'un sistema OWC i del seu potencial energètic.
- Modelat de la turbina Wells i del PMSG.
- Aplicar el control vectorial a un PMSG de velocitat variable polsant.
- Estudiar la producció energètica en el rang de funcionament considerat.

### **1.4 Estructura del treball**

El treball està dividit principalment en sis parts. La primera part analitza l'estructura d'un OWC. Les següents dues parts es dediquen al modelatge de la turbina Wells i del PMSG. La quarta part tracta l'explicació i simulació del control vectorial aplicat al sistema OWC. A la cinquena part es realitzarà l'estudi de la producció energètica del circuit i, finalment, a la sisena part, s'analitzaran els resultats obtinguts.

## 2. Fonamentació teòrica dels sistemes OWC

### 2.1 Energia marina: introducció i tipus

L'energia marina és una de les fonts d'energia renovable que aprofita el potencial dels oceans per generar electricitat. Hi ha diversos tipus d'energia marina [1], incloent-hi l'energia de les mareas, l'energia de les onades, l'energia tèrmica oceànica i l'energia dels corrents marins.

Aquest treball se centrarà en les columnes d'aigua oscil·lants, oferint una introducció general d'aquesta, destacant els seus principis de funcionament, avantatges i desafiaments tecnològics.

### 2.2 Columna d'aigua oscil·lant (OWC)

#### 2.2.1 Principi de funcionament

Una columna d'aigua oscil·lant (OWC) és un dispositiu que converteix l'energia de les onades del mar en energia elèctrica. El principi de funcionament es basa en la interacció de les onades amb una cambra d'aire parcialment submergida, produint oscil·lacions en el nivell de l'aigua dins de la cambra. Aquestes oscil·lacions generen un flux d'aire alternatiu que impulsa una turbina per produir energia elèctrica.

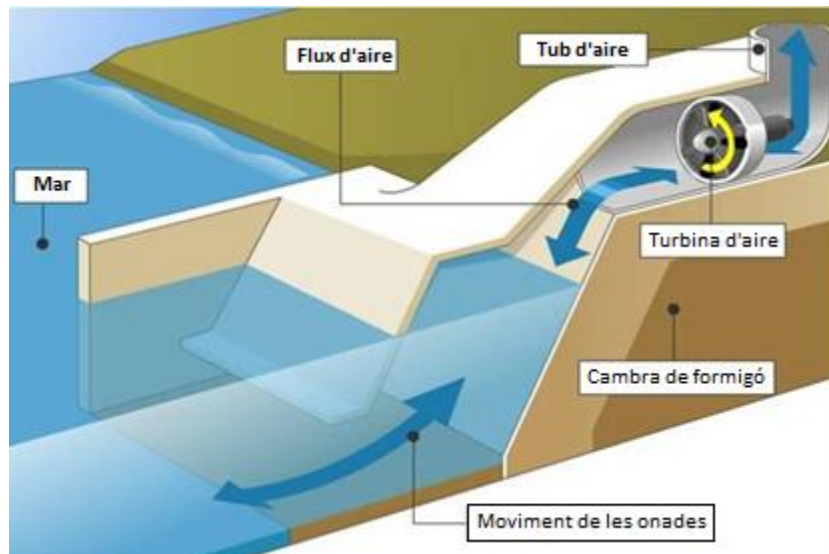


Figura 1. Esquema bàsic de funcionament d'un sistema OWC.

#### 2.2.2 Components principals del sistema OWC

- **Cambra d'aire**

La cambra d'aire és una estructura submergida amb una obertura a la part inferior per permetre l'entrada de l'aigua del mar. La part superior de la cambra està tancada, excepte per una obertura que connecta amb una turbina. Aquesta cambra actua com un dipòsit per a l'aigua que oscil·la amb el moviment de les onades.

- **Turbina Wells**

La turbina Wells és un tipus especial de turbina que gira en la mateixa direcció independentment de la direcció del flux d'aire. Aquesta característica és essencial perquè les onades provoquen un flux d'aire bidireccional (cap amunt i cap avall) dins de la cambra d'aire.

- **Generador elèctric**

El generador elèctric està acoblat a la turbina i converteix l'energia mecànica de la rotació de la turbina en energia elèctrica.

### 2.2.3 Procés de funcionament

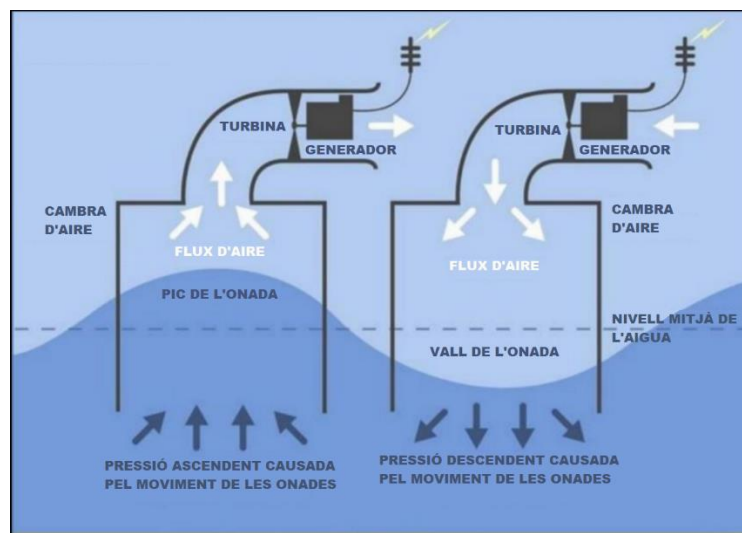


Figura 2. Funcionament de la columna d'aigua oscil·lant.

- **Entrada de les onades**

Quan una onada arriba a la cambra d'aire, l'aigua entra per l'obertura inferior, augmentant el nivell d'aigua dins de la cambra. Aquest augment del nivell de l'aigua comprimeix l'aire a l'interior de la cambra, forçant-lo a sortir per l'obertura superior cap a la turbina.

- **Flux d'aire cap amunt**

El flux d'aire comprimit surt de la cambra i passa a través de la turbina Wells, fent que aquesta giri. La turbina està dissenyada per convertir l'energia del flux d'aire en energia mecànica de manera eficient, independentment de la direcció del flux.

- **Descens de l'onada**

Quan l'onada retrocedeix i el nivell d'aigua dins de la cambra baixa, es crea una depressió a la cambra que fa que l'aire torni a entrar-hi per l'obertura superior. Aquest flux d'aire cap avall també passa a través de la turbina Wells, mantenint la rotació en la mateixa direcció.

- **Generació d'electricitat**

La rotació constant de la turbina Wells, impulsada per les oscil·lacions del nivell d'aigua i el flux d'aire bidireccional, s'acobla a un generador elèctric. El generador converteix l'energia mecànica de la turbina en energia elèctrica, que es pot transmetre a la xarxa elèctrica.

#### 2.2.4 Avantatges del sistema OWC

- **Simplicitat mecànica:** Les OWC no tenen components mòbils en contacte directe amb l'aigua de mar, la qual cosa redueix el desgast i la necessitat de manteniment mecànic en comparació amb altres sistemes com les turbines submergides.
- **Baix impacte ambiental:** Comparats amb altres formes de generació d'energia marina, els OWC tenen un impacte ambiental relativament baix, ja que no interfereixen tant amb la vida marina ni modifiquen dràsticament l'entorn natural.
- **Integració costanera:** Les OWC poden ser instal·lades prop de la costa o fins i tot integrades en infraestructures costaneres, com ports o esculls artificials, cosa que facilita el seu accés i manteniment.
- **Durabilitat:** Amb un bon disseny, les OWC poden tenir una llarga vida útil, resistint condicions marines dures amb relativament poc desgast.
- **Eficiència en la conversió del flux d'aire bidireccional:** La turbina Wells és capaç de convertir eficientment el flux d'aire bidireccional generat per les oscil·lacions de l'aigua en energia mecànica, contribuint a augmentar el rendiment global del sistema OWC.

#### 2.2.5 Limitacions i desafiaments

- **Dependència de les condicions de les onades:** L'eficiència d'un sistema OWC depèn de la constància i intensitat de les onades. En zones amb onades irregulars o insuficients, la producció d'energia pot ser menys consistent.
- **Manteniment:** Encara que els OWC tenen menys components mòbils, el manteniment d'un sistema marí encara és complicat i costós a causa de l'entorn hostil, que inclou corrosió, tempestes i altres condicions adverses.
- **Costos inicials:** La construcció i instal·lació d'un sistema OWC requereixen una inversió inicial elevada, especialment a causa de la seva ubicació en el medi marí i les necessitats d'enginyeria especialitzada.
- **Limitacions de localització:** Les OWC només són viables en llocs amb una activitat d'onades significativa, limitant la seva aplicació a certes àrees costaneres.
- **Impacte estètic i d'integració en el paisatge:** En alguns casos, les OWC instal·lades prop de la costa poden alterar el paisatge, generant preocupació en àrees turístiques o protegides.

## 2.3 Potencial energètic dels sistemes OWC

Els sistemes de columna d'aigua oscil·lant (OWC) tenen un gran potencial per generar energia renovable a partir de les onades marines. Avaluar i entendre aquest potencial és essencial per dissenyar, implementar i optimitzar aquests sistemes. Aquest apartat es divideix en dues seccions principals: l'avaluació del recurs marí i l'eficiència dels sistemes OWC.

### 2.3.1 *Avaluació del recurs marí*

Per determinar el potencial energètic d'un sistema OWC, és crucial avaluar les condicions de les onades a la localització on es planeja instal·lar el sistema. Aquesta avaluació implica diverses etapes:

#### a) *Mesura de les onades*

- **Boies oceanogràfiques:** Instal·lació de boies equipades amb sensors per mesurar l'alçada, el període i la direcció de les onades en temps real. Aquestes dades proporcionen informació detallada sobre les condicions de les onades en diferents èpoques de l'any.
- **Satèl·lits i radar:** Utilització de tecnologia satel·litària i radar per obtenir dades sobre les onades a gran escala. Aquests mètodes complementen les mesures locals i ofereixen una visió més àmplia del recurs marí.

#### b) *Anàlisi estadística*

- **Distribució de les onades:** Anàlisi de la distribució de les onades per determinar la freqüència i la intensitat de les onades més comunes. Aquesta informació és vital per dissenyar el sistema OWC que pugui operar de manera eficient en les condicions més freqüents.
- **Anàlisi de la persistència i variabilitat:** Estudi de la persistència de certes condicions d'onades i la seva variabilitat temporal. Això ajuda a preveure la producció d'energia i a planificar la capacitat d'emmagatzematge i distribució de l'energia generada.

#### c) *Simulacions numèriques*

- **Models de predicció:** Utilització de models matemàtics i de simulació per predir el comportament de les onades en diferents condicions climàtiques i estacionals. Aquests models ajuden a optimitzar el disseny del sistema OWC per maximitzar la captura d'energia.
- **Estudis de cas:** Anàlisi de casos d'estudi de sistemes OWC instal·lats en localitzacions similars per obtenir informació sobre el rendiment esperat i els desafiaments específics de la zona.

### 2.3.2 *Eficiència dels sistemes OWC*

L'eficiència dels sistemes OWC depèn de diversos factors, incloent-hi el disseny de la cambra, la turbina i els sistemes de control. Aquest apartat explora els factors clau que afecten l'eficiència del sistema i com es poden optimitzar.

#### **Factors que afecten l'eficiència**

##### *a) Disseny de la cambra d'aire*

- **Forma i dimensió de la càmera:** La geometria de la cambra influeix directament en l'amplificació de les oscil·lacions de l'aigua. Una càmera ben dissenyada maximitza el flux d'aire a través de la turbina.
- **Posició i orientació:** La ubicació de la cambra en relació amb les onades predominants pot afectar significativament l'eficiència del sistema. Cal optimitzar la posició per captar el màxim nombre d'onades.

##### *b) Turbina Wells*

- **Disseny de les pales:** La configuració i l'angle de les pales de la turbina Wells són crucials per convertir el flux d'aire bidireccional en energia mecànica eficientment.
- **Velocitat de rotació:** La velocitat de la turbina ha de ser adequada per a les condicions del flux d'aire, maximitzant l'energia capturada i minimitzant les pèrdues.

##### *c) Sistemes de control*

- **Control de flux d'aire:** Els sistemes de control que regulen el flux d'aire a través de la turbina poden augmentar l'eficiència del sistema, adaptant-se a les condicions canviants de les onades.
- **Optimització en temps real:** Implementació de sistemes de control avançats que ajusten els paràmetres operatius en temps real per maximitzar la producció d'energia.

#### **Eficiència energètica**

##### *a) Coeficient de potència*

- **Definició i càlcul:** El coeficient de potència és una mesura de l'eficiència amb què el sistema converteix l'energia de les onades en energia mecànica i, finalment, en energia elèctrica.
- **Comparació amb altres tecnologies:** Anàlisi de com els sistemes OWC es comparen amb altres tecnologies d'energia marina en termes de coeficient de potència i eficiència general.

**b) Rendiment operatiu**

- **Estudis de camp:** Presentació de dades de rendiment de sistemes OWC en funcionament, incloent-hi l'energia generada i la seva eficiència durant diferents condicions de les onades.
- **Models de rendiment:** Desenvolupament de models per predir el rendiment operatiu en diverses condicions, ajudant a planificar la producció energètica i la integració a la xarxa elèctrica.

**c) Impacte de les condicions ambientals**

- **Variabilitat climàtica:** Estudi de com les condicions climàtiques i estacionals afecten l'eficiència dels sistemes OWC.
- **Adaptabilitat del sistema:** Estratègies per adaptar els sistemes OWC a condicions ambientals canviants per mantenir una eficiència òptima.

## 2.4 Configuracions i tipus d'OWC

Els sistemes de columna d'aigua oscil·lant (OWC) poden presentar diverses configuracions i dissenys, cadascun amb les seves pròpies característiques i avantatges. Aquest apartat descriu les diferents configuracions d'OWC, incloent-hi els tipus d'instal·lació, les variants de disseny de la cambra i les turbines, així com les aplicacions específiques de cada configuració.

### 2.4.1 Tipus d'instal·lació

Les OWC poden ser instal·lades en diferents entorns segons les condicions de les onades, la profunditat de l'aigua i la proximitat a la costa. Els principals tipus d'instal·lació són:

**a) OWC costaners**

- **Descripció:** Instal·lats directament a la costa, aprofitant les estructures naturals o artificials com els penya-segats, molls o espigons.
- **Avantatges:** Facilitat d'accés per a la instal·lació i manteniment, menor cost de construcció, i connexió més senzilla a la xarxa elèctrica.
- **Desafiaments:** Major impacte visual i ambiental, limitat a localitzacions específiques on les condicions de les onades són favorables.

**b) OWC flotants**

- **Descripció:** Instal·lats en estructures flotants que poden ser ancorades en mar obert. Aquestes estructures poden ser unitats individuals o part de parcs d'energia marina.
- **Avantatges:** Flexibilitat en la ubicació, poden ser instal·lats en zones amb condicions d'onades òptimes, impacte ambiental reduït.

- **Desafiaments:** Major complexitat en el disseny i manteniment, costos més elevats per a l'ancoratge i la connexió a la xarxa elèctrica.

#### *c) OWC en aigües profundes*

- **Descripció:** Instal·lats en el fons marí en aigües profundes, utilitzant estructures submergides fixes.
- **Avantatges:** Menor impacte visual, poden aprofitar onades de major energia en aigües profundes.
- **Desafiaments:** Dificultat en la instal·lació i el manteniment, costos més elevats, requisits tècnics més avançats per a la connexió a la xarxa elèctrica.

### **2.4.2 Variants de disseny de la cambra**

La cambra d'aire és un component crucial en el sistema OWC, i el seu disseny pot variar segons la configuració i els objectius del projecte [5]. Les principals variants de disseny inclouen:

#### *a) Cambres simples*

- **Descripció:** Consisteixen en una sola cambra d'aire que captura l'energia de les onades. Són les més comunes i senzilles de dissenyar i construir.
- **Avantatges:** Senzillesa en el disseny i la construcció, facilitat de manteniment.
- **Desafiaments:** Limitada capacitat de captura d'energia, pot ser menys eficient en condicions d'onades variables.

#### *b) Cambres múltiples*

- **Descripció:** Configuracions amb múltiples cambres interconnectades que permeten capturar energia de les onades de manera més eficient.
- **Avantatges:** Major capacitat de captura d'energia, poden ser més eficients en condicions d'onades variables.
- **Desafiaments:** Complexitat en el disseny i la construcció, costos més elevats, manteniment més complicat.

#### *c) Cambres ressonants*

- **Descripció:** Dissenyades per ressonar amb una freqüència específica de les onades, maximitzant la captura d'energia en condicions òptimes.
- **Avantatges:** Alta eficiència en condicions ressonants, major producció d'energia.
- **Desafiaments:** Eficàcia limitada a una gamma específica de freqüències d'onades, complexitat en el disseny i la construcció.

### 2.4.3 *Aplicacions específiques*

Els sistemes OWC es poden aplicar en diverses situacions i amb diferents objectius:

#### *a) Generació d'energia a petita escala*

- **Aplicacions:** Sistemes OWC costaners per subministrar energia a comunitats costaneres o infraestructures marines.
- **Beneficis:** Font d'energia renovable local, redueix la dependència de combustibles fòssils.

#### *b) Parcs d'energia marina*

- **Aplicacions:** Instal·lacions a gran escala en mar obert amb múltiples unitats OWC per generar energia per a la xarxa elèctrica.
- **Beneficis:** Major contribució a la generació d'energia renovable, economies d'escala.

#### *c) Protecció costanera amb generació d'energia*

- **Aplicacions:** Integració de sistemes OWC en estructures de protecció costanera com esculleres o espigons.
- **Beneficis:** Doble funció de protecció contra l'erosió costanera i generació d'energia, ús eficient dels recursos.

### 3. Modelatge de la turbina Wells

#### 3.1 Descripció de la turbina Wells

La turbina Wells és un tipus de turbina utilitzada sovint en sistemes de columna d'aigua oscil·lant (OWC) per a la generació d'energia a partir de les onades marines. Aquesta turbina es distingeix per la seva capacitat de girar en la mateixa direcció independentment de la direcció del flux d'aire, la qual cosa és especialment útil en aplicacions on el flux d'aire és bidireccional, com és el cas dels sistemes OWC.

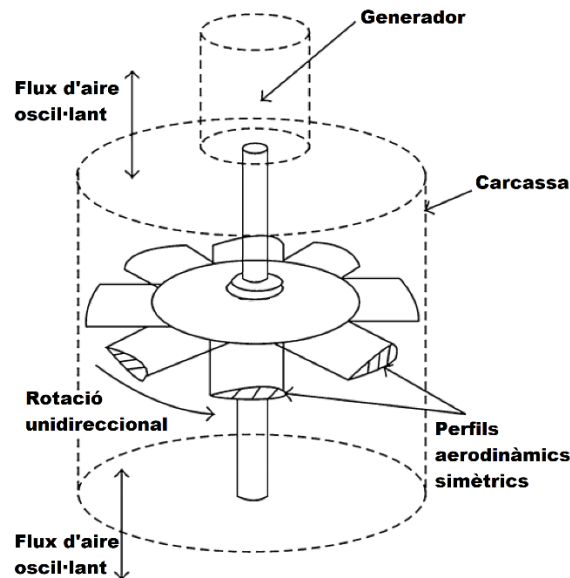


Figura 3. Turbina Wells.

La turbina Wells està composta per una sèrie de pales simètriques instal·lades al voltant d'un eix central. Quan l'aire comprimit per les onades es mou a través de la turbina, les pales experimenten una força aerodinàmica que provoca el seu gir. Aquest gir es transmet a un generador per produir energia elèctrica.

#### 3.2 Característiques i comportament aerodinàmic

El comportament de la turbina Wells es veu fortament influenciat per la seva configuració aerodinàmica [4]:

- **Pales Simètriques:** El disseny simètric de les pales permet que la turbina generi parell en la mateixa direcció amb flux d'aire bidireccional. Aquesta característica elimina la necessitat de mecanismes complexos per gestionar canvis en la direcció del flux.

- **Eficiència:** La turbina Wells té una eficiència moderada en comparació amb altres tipus de turbines, però la seva simplicitat i robustesa la fan molt adequada per a aplicacions marines.
- **Comportament de Parell:** El parell produït per la turbina és proporcional al quadrat de la velocitat del flux d'aire, però només en un rang limitat de velocitats de l'aire. Això fa que l'operació òptima de la turbina es doni en un rang específic de condicions de les onades.
- **Pèrdues Aerodinàmiques:** Les pèrdues, principalment degudes a la resistència i la fricció de l'aire, augmenten significativament a mesura que la velocitat del flux creix. Aquestes pèrdues poden reduir l'eficiència global del sistema, especialment en condicions extremes.
- **Estabilitat i Control:** En condicions de flux d'aire molt turbulent o variabilitat de les onades, el comportament aerodinàmic de la turbina pot ser menys previsible, cosa que requereix la implementació de sistemes de control per garantir la seva operació estable i eficient.

### 3.3 Model matemàtic de la turbina Wells

#### 3.3.1 Equacions fonamentals

El model matemàtic de la turbina Wells es basa en la relació entre el flux d'aire a través de la turbina i el parell generat [5]. Les equacions fonamentals que descriuen aquest comportament són:

##### **Equació de Parell:**

$$T_{mec} = k_t \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (1)$$

On:

- $T_{mec}$  és el parell generat per la turbina,
- $k_t$  és la constant de parell de la turbina,
- $\rho$  és la densitat de l'aire,
- $A$  és l'àrea de les pales de la turbina,
- $v$  és la velocitat del flux d'aire a través de la turbina.

##### **Equació de Potència:**

$$P_{mec} = T_{mec} \cdot \omega \quad (2)$$

On:

- $P_{mec}$  és la potència generada per la turbina.
- $\omega$  és la velocitat angular de la turbina.

### 3.3.2 Simulació amb PSIM

Per a poder simular una turbina Wells a PSIM s'utilitzarà el circuit següent:

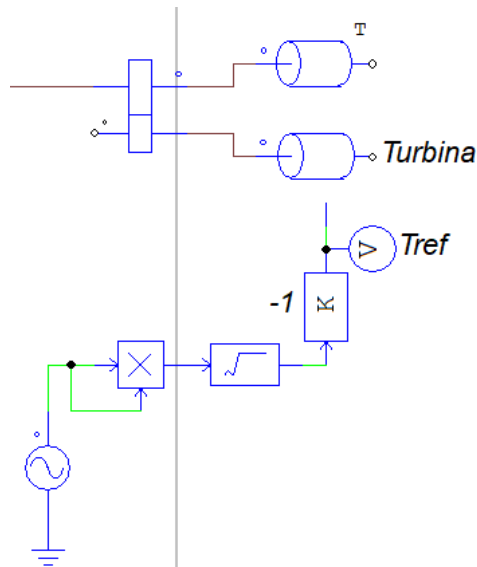


Figura 4. Model de simulació del OWC a PSIM.

El circuit utilitzat en la simulació inclou dues fonts de parell: una càrrega mecànica que proporciona un petit parell constant per garantir la continuïtat dels càlculs seqüencials, i una font sinusoidal que representa el parell generat per les onades del mar. Aquest senyal sinusoidal és modificada per ser sempre positiva, reflectint el comportament real de la turbina Wells amb flux d'aire bidireccional.

L'amplitud del senyal representa la força de les onades, mentre que la seva freqüència simula el patró de les oscil·lacions del mar. En aquest cas, s'ha utilitzat un senyal amb un pic de 20 V i una freqüència d'1.6 Hz.

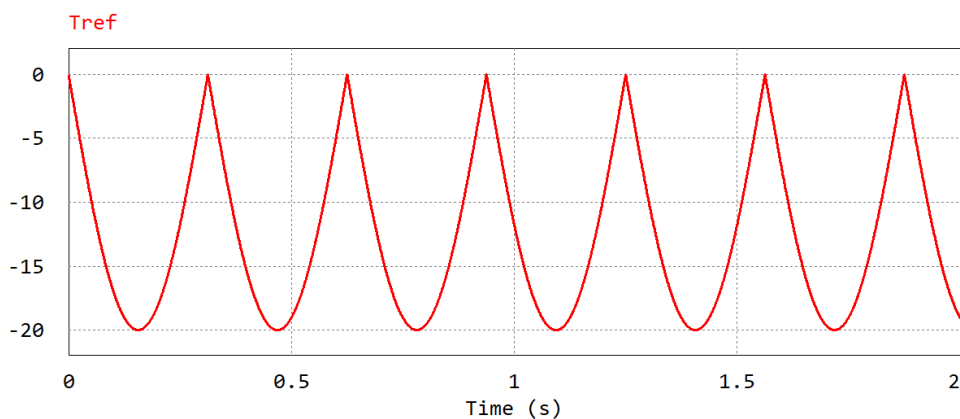


Figura 5. Parell generat per la turbina Wells en N·m.

## 4. Modelatge del generador síncron d'imants permanents (PMSG)

### 4.1 Descripció del PMSG

El generador síncron d'imants permanents (PMSG) és un tipus de generador elèctric en el qual el camp magnètic necessari per a la generació de tensió es produeix mitjançant imants permanents situats al rotor. Aquest tipus de generador és àmpliament utilitzat en aplicacions d'energia renovable, com ara les turbines eòliques i les columnes d'aigua oscil·lant (OWC), a causa de la seva alta eficiència, baix manteniment i fiabilitat.

### 4.2 Principis de funcionament

El funcionament del PMSG es basa en la llei de Faraday de la inducció electromagnètica, la qual estableix que un canvi en el flux magnètic a través d'un circuit genera una força electromotriu (FEM) en el conductor. En el cas del PMSG, aquest canvi de flux es produeix quan el rotor gira i els imants permanents instal·lats en ell creen un camp magnètic variable respecte als bobinats trifàsics situats en l'estator.

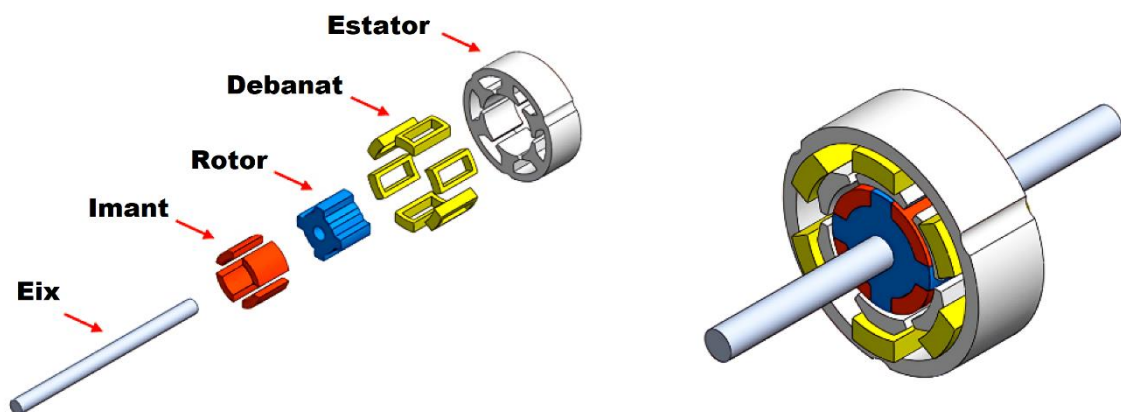


Figura 6. Components principals d'un PMSG.

Els components principals del PMSG són:

- **Rotor:** El rotor està equipat amb imants permanents que generen un camp magnètic constant. Aquest camp magnètic varia quan el rotor gira, induint una tensió en els bobinats de l'estator.
- **Estator:** L'estator conté els bobinats trifàsics, que estan disposats de tal manera que la rotació del camp magnètic generat pel rotor indueix una tensió alterna (AC).
- **Eix:** L'eix connecta el rotor amb una màquina impulsora, com una turbina eòlica o una turbina Wells en un sistema OWC, la qual converteix l'energia mecànica en rotació.

Quan el rotor gira a causa de l'energia cinètica proporcionada per una font d'energia externa, el camp magnètic generat pels imants permanents es mou a través dels bobinats de l'estator. Això provoca la generació d'una tensió alterna en el circuit de l'estator, que posteriorment pot ser rectificadada o utilitzada directament en aplicacions de corrent altern.

### 4.3 Característiques

Els PMSG es caracteritzen per la seva alta eficiència [2], flexibilitat i adaptabilitat en entorns de generació d'energia renovable. Les característiques generals dels PMSG inclouen:

- **Alta eficiència:** La presència d'imants permanents elimina la necessitat de subministrar corrent d'excitació, reduint així les pèrdues per calor i augmentant l'eficiència global.
- **Funcionament a velocitat variable:** Els PMSG poden operar de manera eficient a velocitats variables, la qual cosa els fa especialment adequats per a aplicacions on les condicions d'entrada són canviants, com en el cas de les turbines eòliques o els sistemes OWC, on la velocitat del rotor pot variar segons les condicions del vent o les onades.
- **Baix manteniment:** Gràcies a l'absència d'anells escombreta i sistemes d'excitació externa, els PMSG presenten un menor desgast mecànic, fet que redueix significativament els requisits de manteniment i augmenta la seva fiabilitat en operacions a llarg termini.
- **Densitat de potència elevada:** El disseny compacte i l'ús d'imants de terres rares permeten que els PMSG tinguin una densitat de potència alta, produint més energia per unitat de volum en comparació amb altres tipus de generadors.
- **Robustesa i estabilitat:** Els PMSG són adequats per a aplicacions en condicions dures, com el medi marí o condicions industrials, oferint estabilitat de funcionament i durabilitat en ambients exigents.

Aquestes característiques fan del PMSG una solució òptima per a la generació d'energia renovable, tant per la seva eficiència com per la seva capacitat d'operar en condicions variades.

#### 4.4 Model matemàtic del PMSG

##### 4.4.1 Equacions fonamentals

Les equacions fonamentals del PMSG es poden expressar en termes del sistema de coordenades dq, que és un sistema de coordenades rotatiu que simplifica l'anàlisi dels sistemes de màquines elèctriques [3].

**Tensió induïda:**

$$V_d = R_s \cdot I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega L_q I_q \quad (3)$$

$$V_q = R_s \cdot I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega(L_d I_d + \lambda_f) \quad (4)$$

On:

- $V_d, V_q$  són les components de tensió en el sistema de coordenades dq.
- $I_d, I_q$  són les components de corrent en el sistema de coordenades dq.
- $R_s$  és la resistència dels bobinats de l'estator.
- $L_d, L_q$  són les inductàncies directes i quadratures de l'estator.
- $\omega$  és la velocitat angular del rotor.
- $\lambda_f$  és el flux magnètic per pol a causa dels imants permanents.

**Equacions de flux:**

$$\lambda_d = L_d I_d + \lambda_f \quad (5)$$

$$\lambda_q = L_q I_q \quad (6)$$

On:

- $\lambda_d, \lambda_q$  són les components de flux en el sistema de coordenades dq.

**Parell electromagnètic:**

$$T_e = \frac{3}{2} P (\lambda_d I_q - \lambda_q I_d) \quad (7)$$

On:

- $T_e$  és el parell electromagnètic generat.
- $P$  és el nombre de parells de pols del generador.

#### 4.4.2 Simulació amb PSIM

Per a realitzar la simulació del PMSG amb el PSIM, s'utilitzarà el model següent:

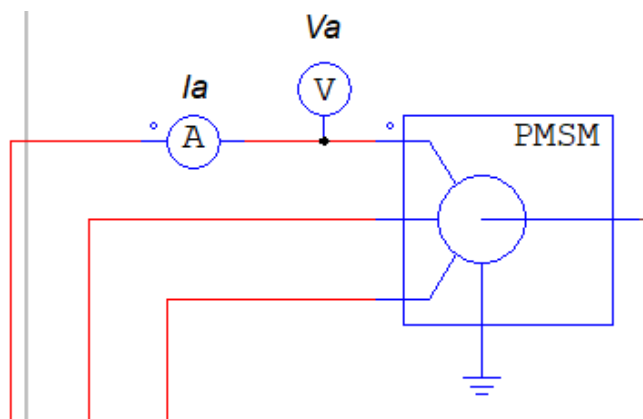


Figura 7. Model de simulació del PMSG a PSIM.

I les característiques principals del PMSG amb les quals es treballarà són les següents:

Característica	Descripció	Valor	Unitat
<b>Rs</b>	Resistència del bobinatge de l'estator	1.8	$\Omega$
<b>Ld</b>	Inductància directa (eix d)	9	mH
<b>Lq</b>	Inductància en quadratura (eix q)	9	mH
<b>Vpk/krpm</b>	Tensió de pic per cada 1000 rpm del rotor	325	V
<b>Nombre de pols</b>	Nombre total de pols magnètics del generador	6	
<b>Moment d'inèrcia</b>	Inèrcia del rotor	1	kg·m <sup>2</sup>
<b>Constant de temps de l'eix</b>	Constant de temps relacionada amb el moment d'inèrcia i la resistència de l'eix	35	ms
<b>Angle inicial del rotor</b>	Angle inicial de la posició del rotor respecte a l'estator	0	rad

Taula 1. Característiques del PMSG a PSIM.

Aquestes característiques determinen el comportament dinàmic i el rendiment del PMSG en les diferents condicions de funcionament simulades en aquest projecte. Factors com la resistència de l'estator (**Rs**) i les inductàncies en els eixos **d** i **q** (**Ld** i **Lq**) són crucials per a la implementació del control vectorial, mentre que el moment d'inèrcia i la constant de temps de l'eix impacten en la resposta dinàmica del sistema.

En les figures següents es poden apreciar els paràmetres clau del PMSG, incloent-hi les gràfiques de la velocitat del rotor, així com del corrent de fase  $I_a$  i la tensió de fase  $V_a$ . Aquestes gràfiques mostren els paràmetres d'entrada i sortida del PMSG, permetent una millor comprensió del seu comportament dinàmic i de com respon a les condicions de simulació.

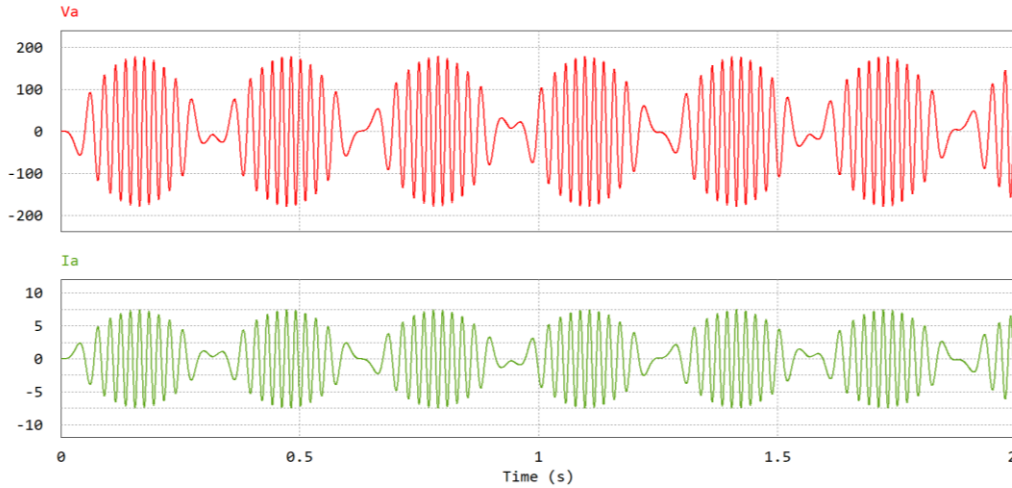


Figura 8. Tensió (en V) i corrent de la fase (en A) A del PMSG.

Les formes d'ona de la gràfica anterior indiquen una resposta adequada a la variació de la velocitat del rotor, coherent amb el comportament esperat d'un generador síncrònic de magnets permanents operant sota control vectorial.

Els següents valors mostren tant el valor màxim com el valor RMS, aquest últim calculat sobre un període complet d'oscil·lació per a les diferents variables:

Paràmetre	Valor Màxim	Valor RMS (Període)
$I_a$	7.45 A	3.70 A
$V_a$	178.89 V	88.68 V

Taula 2. Valors de corrent i tensió de fase simulats.

La velocitat del rotor segueix una trajectòria sinusoidal consistent amb el comportament de la turbina Wells i el sistema de control aplicat al generador, demostrant un funcionament estable i previsible. Com es pot observar en la següent gràfica:

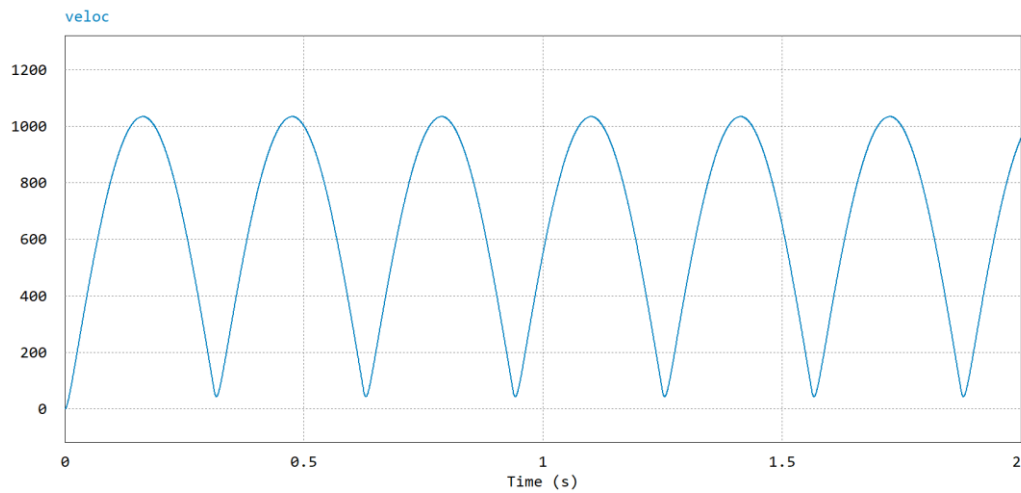


Figura 9. Velocitat del rotor en rad/s.

Els valors característics dels senyals anteriors són els següents:

Valor Màxim	Valor Mitjà	Valor RMS (Període)
1034.10 rad/s	648.16 rad/s	721.58 rad/s

Taula 3. Valors de la velocitat del rotor simulats.

## 5. Control vectorial

El control vectorial és una tècnica avançada utilitzada en el control de màquines elèctriques, especialment en generadors síncrons d'imants permanents (PMSG). Aquest mètode permet gestionar amb precisió el flux magnètic i el parell electromagnètic de la màquina elèctrica, controlant les components de corrent en un sistema de coordenades rotatiu, anomenat sistema dq0. Aquesta transformació facilita la regulació del comportament dinàmic de la màquina, millorant l'eficiència i el rendiment del sistema.

En el context del PMSG, el control vectorial permet ajustar el parell i el flux de manera dinàmica segons les condicions operatives, a través de dues metodologies principals: el control vectorial de circuit obert i el mètode ZDC (Zero Direct Current).

Aquesta secció explorarà els fonaments teòrics d'aquestes tècniques i la seva implementació pràctica, demostrant com s'apliquen per optimitzar el comportament del PMSG.

### 5.1 Descripció del control vectorial de circuit obert

#### *Descripció general*

El control vectorial de circuit obert és una tècnica en la qual els senyals de control per a les màquines elèctriques es generen basant-se en models matemàtics i simulacions del sistema, sense utilitzar informació de retroalimentació directa sobre el comportament actual del sistema.

#### *Principi de funcionament*

En aquest enfocament, el sistema de control utilitza els valors de referència calculats prèviament per generar els senyals de control per al sistema. Els senyals de control són enviats als actuadors (l'ELC en el cas de la simulació PSIM) per aconseguir l'operació desitjada.

#### *Aplicació en el control vectorial*

En el context del control vectorial, el control de circuit obert s'utilitza per gestionar els corrents en les diferents fases de la màquina sense ajustar dinàmicament els senyals en funció del comportament real del sistema. Això es fa mitjançant la transformació dq0-abc, que converteix les variables trifàsiques a un sistema de coordenades rotatiu.

#### *Avantatges i desavantatges del control vectorial de circuit obert*

##### **Avantatges:**

- **Simplicitat:** El disseny i la implementació del sistema de control són relativament senzills, ja que no requereixen circuits de retroalimentació complexos.
- **Cost:** Generalment, el cost de les solucions de control de circuit obert és menor perquè no s'han d'incorporar sensors addicionals per mesurar la sortida real.

- **Facilitat de Disseny:** Permet dissenyar sistemes de control utilitzant models matemàtics establerts sense la necessitat de calibrar constantment en funció de dades en temps real.

**Desavantatges:**

- **Menor Precisió:** Com que no es realitza una retroalimentació directa, el sistema pot no respondre de manera òptima a les variacions o perturbacions en el sistema real, com les fluctuacions en la càrrega o variacions ambientals.
- **Absència de Correcció Dinàmica:** Si hi ha errors en el model matemàtic o en les condicions de funcionament, aquests errors no es corregiran automàticament, la qual cosa pot afectar el rendiment general del sistema.

## 5.2 Descripció del Mètode ZDC (Zero Direct Current)

### *Definició*

El mètode ZDC consisteix a mantenir la component directa del corrent ( $I_d$ ) a zero [3], centrant el control de la màquina únicament en la component quadratura ( $I_q$ ). En altres paraules, el corrent en la direcció del flux magnètic generat pels imants permanents es manté nul, de manera que tota la contribució al parell electromagnètic prové del corrent en quadratura ( $I_q$ ).

### *Principi de funcionament*

En el sistema de coordenades dq, el corrent directe ( $I_d$ ) està alineat amb el flux magnètic del rotor, mentre que el corrent en quadratura ( $I_q$ ) està perpendicular a aquest flux i és responsable de generar parell. El mètode ZDC elimina qualsevol contribució de  $I_d$  al control del sistema, deixant tota la regulació del parell a càrrec de  $I_q$ .

Aquest mètode és especialment efectiu en màquines amb imants permanents, com el PMSG, ja que els imants proporcionen un flux constant, i la manipulació de  $I_q$  permet controlar el parell de manera eficient.

### *Avantatges i desavantatges del mètode ZDC*

**Avantatges:**

- **Simplicitat en el Control:** Mantenir  $I_d$  a zero simplifica els càlculs i la implementació del control vectorial, ja que només s'ha de controlar una variable de corrent ( $I_q$ ) per a la generació de parell.
- **Optimització del Parell:** El mètode permet maximitzar el parell electromagnètic amb una gestió òptima del corrent en quadratura, millorant així l'eficiència del sistema.

- **Menor Requisit Computacional:** Perquè no s'ha de calcular o controlar  $I_d$ , es redueixen els costos computacionals i es simplifica la implementació del control en temps real.

**Desavantatges:**

- **Limitacions en el Control del Flux:** Com que el mètode no controla  $I_d$ , no permet una regulació activa del flux magnètic. Això pot ser un inconvenient en algunes aplicacions on calgui modificar el flux per gestionar diferents condicions de funcionament.
- **Dependència del Flux Permanent:** En màquines on el flux magnètic és ajustable, el mètode ZDC no seria òptim, ja que ignora completament la component directa del corrent. Això podria resultar en pèrdues en aplicacions no ideals.

## 5.2 Implementació del control vectorial

### 5.2.1 Transformació dq0-abc

L'objectiu del control vectorial és gestionar amb precisió el consum de la càrrega electrònica controlada (ELC), simulada de forma simplificada com una font controlada de corrent trifàsica, la qual actua com a càrrega per consumir el corrent generat pel PMSG. Aquest control permet optimitzar el rendiment del sistema, garantint que l'ELC segueixi amb exactitud les referències de corrent que provenen del PMSG.

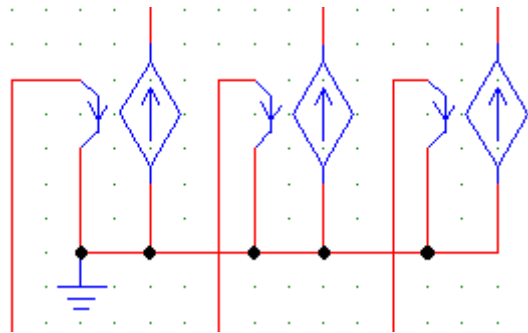


Figura 10. Simulació PSIM del consum controlat de corrent del sistema.

Per a controlar l'ELC, es fa servir la transformació dq0-abc, que converteix les components de corrent en el sistema de coordenades dq0 (corrent directe, quadratura i zero) en els corresponents corrents de fase (abc). Aquest procés es realitza a partir de la velocitat angular mesurada de la turbina, la qual cosa proporciona l'angle de referència necessari per a la transformació.

A més, per simplificar els càlculs i garantir l'eficiència del sistema, s'aplica el mètode ZDC en què la component  $I_d$  es manté a zero.

La fórmula utilitzada per a la transformació dq0-abc és la següent:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_o \end{bmatrix} \quad (8)$$

En aquesta equació, els corrents de fase  $I_a$ ,  $I_b$ , i  $I_c$  es calculen a partir de les components  $I_d$  i  $I_q$  del sistema de coordenades rotatiu dq0, amb l'angle  $\theta$  derivat de la velocitat angular de la turbina.

Els valors de corrent i l'angle  $\theta$  es detallaran i calcularan en els apartats següents per tal de tancar el cicle de control i garantir la resposta desitjada del sistema.

### 5.2.2 Càlcul de l'angle

Un aspecte clau en la implementació del control vectorial és el càlcul precís de l'angle de referència  $\theta$ , que és essencial per dur a terme la transformació dq0-abc correctament. Aquest angle es determina a partir de la velocitat angular del rotor del PMSG i serveix per sincronitzar les components de corrent de referència amb el sistema de coordenades rotatiu.

En aquest apartat, es presenta el mètode de simulació del càlcul de l'angle de referència  $\theta$ , basada en les mesures de velocitat angular obtingudes del sistema.

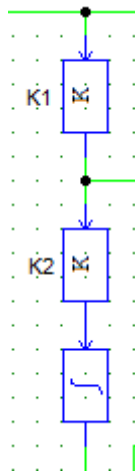


Figura 11. Simulació PSIM de l'angle  $\theta$ , en radians.

La funció simulada és la següent:

$$\theta(t) = \frac{1}{T} \int_0^t K_1 \cdot K_2 dt = \int_0^t \left( n(t) \cdot \frac{2\pi}{60} \right) \cdot 3 dt \quad (9)$$

On:

- $K_1$  és la conversió de la velocitat mesurada en rpm a rad/s.
- $K_2$  és el nombre de parells de pols del generador.
- $T$  és la constant de temps.

### 5.2.3 Càlcul del corrent de referència

El càlcul del corrent de referència és un pas fonamental en el control vectorial d'un generador síncron d'imants permanents. Aquest corrent de referència serveix com a entrada per al sistema de control, garantint que el generador funcioni dins dels paràmetres òptims per maximitzar l'eficiència i mantenir una operació estable.

En aquest apartat, s'explora el mètode utilitzat per calcular el corrent de referència a partir de la velocitat angular del rotor.

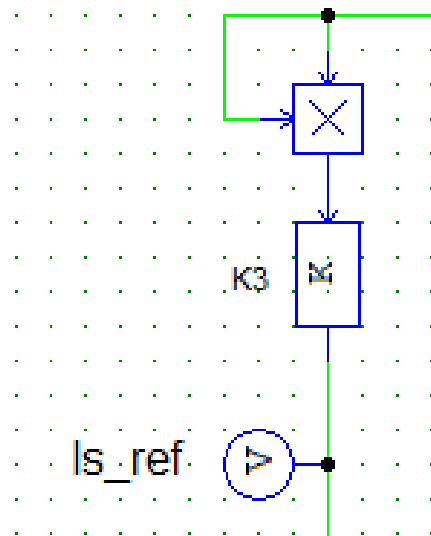


Figura 12. Simulació PSIM del corrent de referència.

Per entendre la funció utilitzada en la simulació mostrada a la Figura 12, és necessari dur a terme la següent demostració:

$$T = K_T \cdot I_s \quad (10)$$

On:

- $T$  és el parell electromagnètic generat per la màquina.
- $K_T$  és la constant de parell de la màquina, que depèn de les característiques físiques i magnètiques del generador.
- $I_s$  és el corrent de fase.

L'anterior fórmula representa la relació entre el parell electromagnètic generat per la màquina elèctrica i el corrent proporcionat.

$$T = K' \cdot n^2 \quad (11)$$

On:

- $K'$  és la constant de proporcionalitat, que depèn de les característiques de la màquina i el sistema.
- $n$  és la velocitat angular del rotor.

Aquesta fórmula representa la relació entre el parell electromecànic i la velocitat angular del rotor, especialment en sistemes on el parell és proporcional al quadrat de la velocitat, com ara els generadors.

Utilitzant les equacions mostrades a les fórmules (10) i (11), es pot derivar la següent equació, la qual es representa a través de la simulació mostrada a la Figura 13:

$$I_s = n^2 \cdot \frac{K'}{K_T} = n^2 \cdot K_3 \quad (12)$$

Després del càlcul del corrent de fase  $I_s$ , aquest s'adapta per determinar el corrent de quadratura  $I_q$ , que s'utilitzarà com a corrent de referència en la transformació dq0-abc per garantir un control vectorial eficient del sistema.

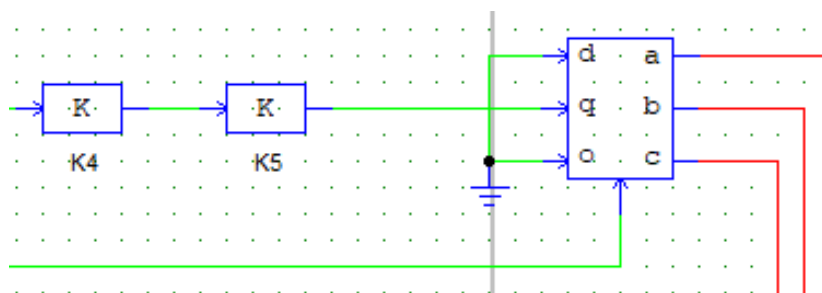


Figura 13. Simulació PSIM de la transformació dq0 a abc.

Per implementar el mètode ZDC, es fixa el corrent  $I_d$  a zero, mentre que, en ser un sistema equilibrat, el corrent  $I_0$  també es pot considerar nul, com es mostra en la figura anterior.

Pel que fa al corrent  $I_q$ , que actua com a corrent de referència, se li aplica un factor de conversió que ajusta el corrent de pic, per tal de relacionar el corrent mesurat amb el corrent generat pel PMSG:

$$I_q = I_s \cdot K_4 \cdot K_5 = I_s \cdot \sqrt{2} \cdot K_5 \quad (13)$$

On:

- $K_5$  és una constant utilitzada per a la conversió de corrent.

### 5.2.4 Valors utilitzats en el control vectorial

En el control vectorial del PMSG, s'utilitzen diverses constants que influeixen en la precisió i eficiència del sistema. A continuació es presenten els valors de les constants utilitzades en el procés de control vectorial:

Nom de la constant	Valor
$K_1$	0.1047
$K_2$	3
$K_3$	4.6u
$K_4$	1.4142
$K_5$	11u

Taula 4. Valors de les constants utilitzades en el control vectorial.

### 5.3 Resultats de la simulació del control vectorial

En aquest apartat, es presentaran els resultats obtinguts de la simulació del control vectorial aplicada al generador síncron d'imants permanents. Els objectius principals d'aquesta simulació són avaluar la precisió i l'eficiència del control vectorial mitjançant l'anàlisi comparativa entre el corrent de fase del generador i el corrent de referència calculat  $I_s$ .

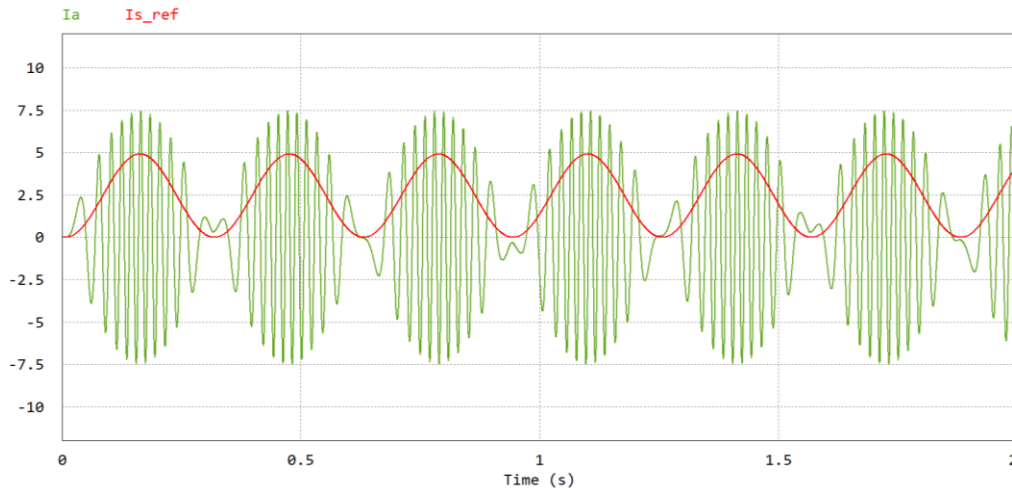


Figura 14. Comparació del corrent  $I_s$  amb el corrent de fase del generador.

La gràfica anterior mostra el càlcul del corrent de referència en comparació amb el corrent de fase del PMSG, es pot observar que reflecteix un cert grau de control en el sistema, però també mostra que encara hi ha una discrepància entre el corrent de referència  $I_s$  i el corrent real  $I_a$ .

Les oscil·lacions en  $I_a$  indiquen que el sistema pot no estar seguint perfectament la referència, i es podrien aplicar tècniques com el filtratge o la sintonització del controlador per millorar el rendiment.

Els valors característics del senyal del corrent de referència ( $I_s$ ) són els següents:

Valor Màxim	Valor Mitjà	Valor RMS (Període)
4.92 A	2.40 A	2.95 A

Taula 5. Valors del corrent de referència calculats en la simulació.

## 6. Estudi de la producció energètica

### 6.1 Introducció

#### 6.1.1 Objectiu de l'estudi

L'objectiu principal d'aquest estudi és analitzar la producció energètica d'un generador sincrònic d'imants permanents, tenint en compte tant les condicions mecàniques com elèctriques del sistema. A més de determinar la potència generada sota condicions ideals i operatives, aquest estudi pretén identificar les possibles pèrdues energètiques i avaluar l'eficiència global del sistema. També es vol oferir una estimació de la producció anual d'energia, tenint en compte les variacions en la velocitat del rotor.

#### 6.1.2 Condicions de funcionament

Per a l'estudi de la producció energètica anual del sistema OWC, primer s'han d'establir les condicions de funcionament. Aquestes inclouen:

- **Paràmetres de l'entorn:** Intensitat i freqüència de les onades, les quals es mencionen en l'apartat 3.3 (Model matemàtic de la turbina Wells).
- **Configuració del sistema:** Característiques de la columna d'aigua oscil·lant, paràmetres de la turbina Wells, i especificacions del generador síncron d'imants permanents, vistes en els apartats 3 i 4.
- **Mode de funcionament:** Configuracions de control vectorial utilitzades, analitzades en l'apartat 5.

### 6.2 Potència mecànica generada

#### 6.2.1 Anàlisi de la potència mecànica obtinguda

A partir dels càlculs realitzats per a dur a terme el control vectorial, es pot extreure el càlcul de la potència mecànica de la següent manera:

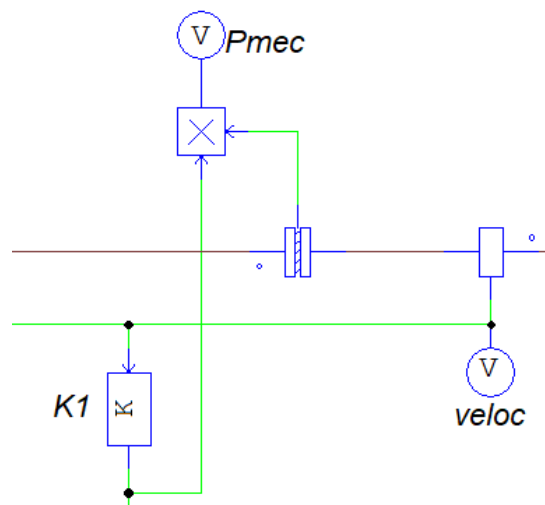


Figura 15. Simulació PSIM de la potència mecànica.

La simulació que es mostra en la figura anterior es pot expressar amb la següent equació:

$$P_{mec} = T_{mec} \cdot \omega \quad (14)$$

On:

- $P_{mec}$  és la potència mecànica del generador.
- $T_{mec}$  és el parell mecànic proporcionat per la turbina.
- $\omega$  és la velocitat del rotor en rpm.

La potència mecànica oscil·latòria reflecteix el comportament dinàmic del sistema mecànic i la seva interacció amb el rotor del PMSG. Tot i les oscil·lacions inherents, el sistema manté un valor mitjà de potència estable d'aproximadament 1058.11 W, mentre que el valor RMS de 1302.92 W indica una sortida mecànica sostinguda i eficient. Això suggereix que, malgrat les fluctuacions temporals, el sistema és capaç de generar una potència efectiva considerable, la qual cosa és adequada per a les condicions operatives previstes. Tal com es pot observar en la següent gràfica:

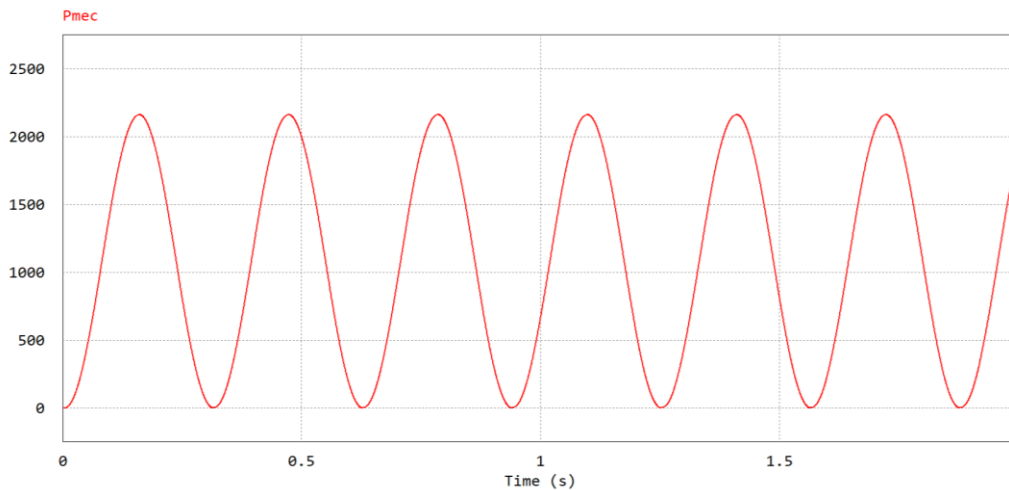


Figura 16. Potència mecànica del generador.

Valor Màxim	Valor Mitjà	Valor RMS (Període)
2162.58 W	1058.11 W	1302.92 W

Taula 6. Valors característics de la potència mecànica calculada en la simulació.

### 6.2.2 *Impacte de les variacions de la velocitat*

Les variacions en la velocitat de les onades afecten significativament la producció de potència en el sistema OWC. A velocitats més baixes, la turbina Wells gira més lentament, generant menys potència mecànica i, per tant, menys potència elèctrica. En canvi, a velocitats més altes, la turbina gira més ràpidament, augmentant la producció de potència. Això provoca que tant la potència mecànica com l'elèctrica presentin oscil·lacions amb amplitud més gran.

A continuació es presenta una gràfica que mostra l'evolució de la potència mecànica per a dues velocitats diferents de les onades, una més lenta (0.8 Hz) i una més ràpida (3.2 Hz) en comparació amb l'estudiada en el treball.

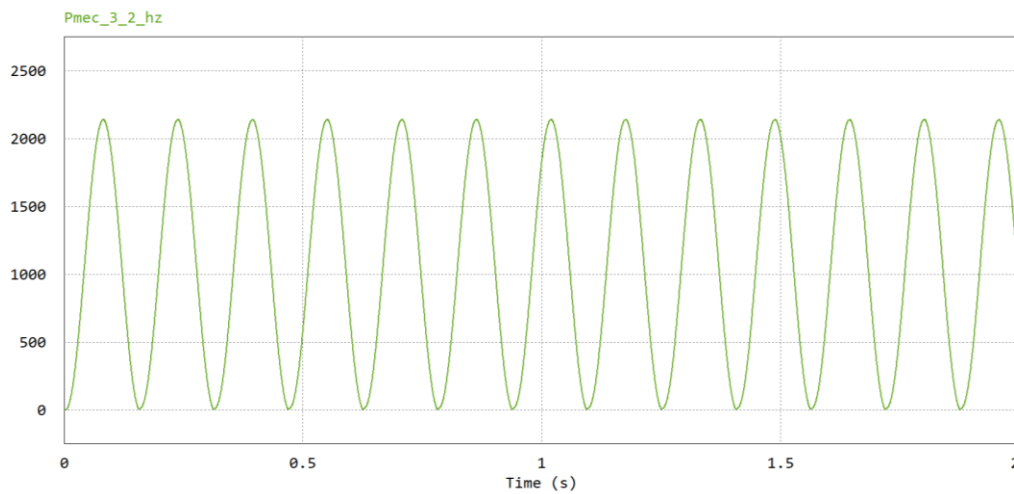


Figura 17. Potència mecànica simulada a 3.2 Hz.

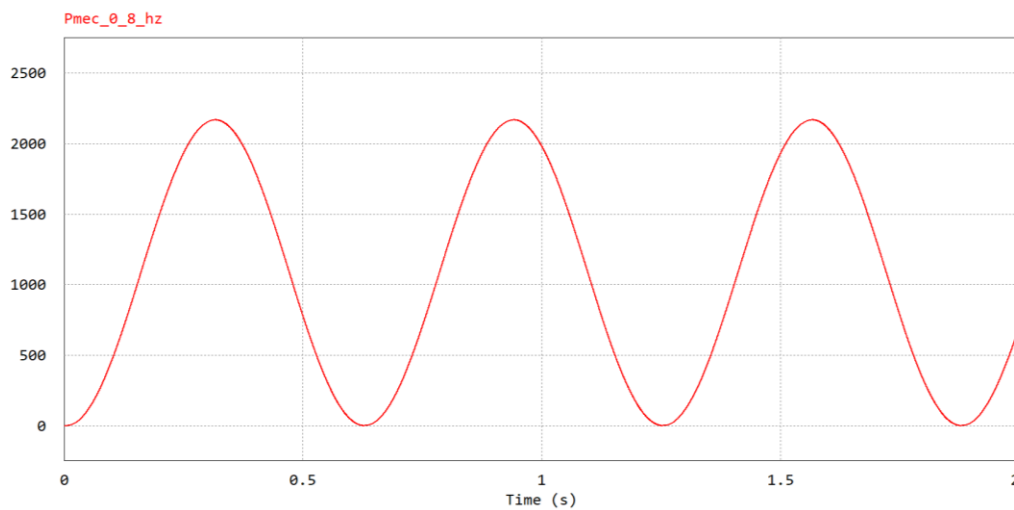


Figura 18. Potència mecànica simulada a 0.8 Hz.

Paràmetre	Valor Màxim	Valor Mitjà	Valor RMS (Període)
<b>Pmec_3_2_hz</b>	2140.88 W	1078.78 W	1317.16 W
<b>Pmec_0_8_hz</b>	2168.13 W	1028.08 W	1285.41 W

Taula 7. Valors de la potència mecànica a diferents velocitats.

Com es pot veure, a velocitats altes, la potència generada té pics més pronunciats, mentre que a velocitats baixes, la potència mitjana disminueix considerablement. Aquestes variacions s'han de tenir en compte per ajustar el disseny del sistema i millorar l'eficiència energètica.

### 6.2.3 *Impacte de les variacions de la força de les onades*

A més de la velocitat, la força de les onades també juga un paper fonamental en el comportament del sistema. Onades amb una força més gran exerceixen un parell major sobre la turbina, augmentant així la potència mecànica produïda. Per contra, onades amb una força més baixa resulten en una menor producció de potència.

La gràfica següent il·lustra l'evolució de la potència mecànica en funció del temps per a diferents intensitats de la força de les onades, una més forta (40 N) i una més feble (10 N) en comparació amb l'estudiada en el treball.

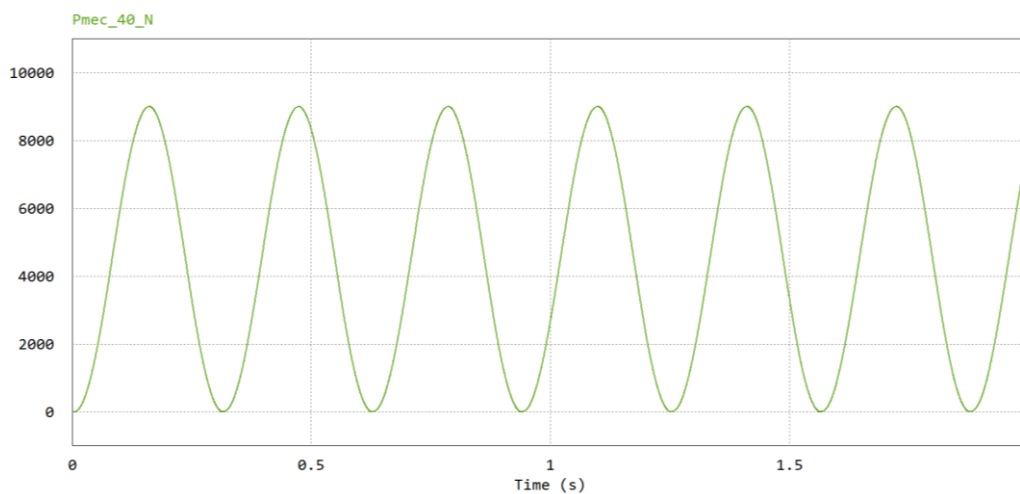


Figura 19. Potència mecànica simulada a 40 N.

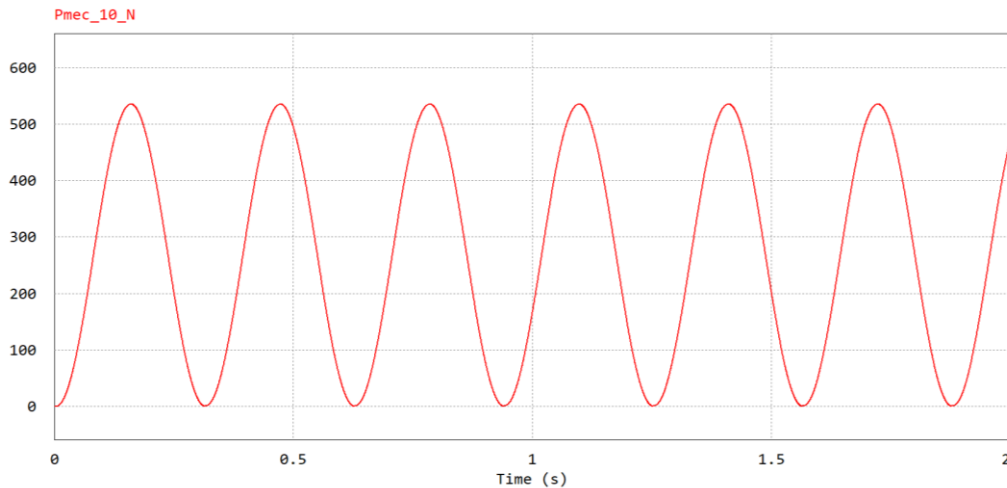


Figura 20. Potència mecànica simulada a 10 N.

Paràmetre	Valor Màxim	Valor Mitjà	Valor RMS (Període)
<b>Pmec_40_N</b>	9005.95 W	4360.35 W	5387.61 W
<b>Pmec_10_N</b>	535.64 W	262.72 W	323.24 W

Taula 8. Valors de la potència mecànica a diferents forces de les onades.

S'observa que una major força de les onades produeix una oscil·lació amb amplitud més gran en la potència mecànica generada. En canvi, amb una força més baixa, la potència és inferior i les oscil·lacions són menys marcades. Aquest comportament també repercuteix en la producció elèctrica i l'eficiència global del sistema, i és un factor clau a considerar en el disseny per a assegurar una operació òptima.

### 6.3 Potència elèctrica generada

En aquest apartat, es duu a terme l'anàlisi de la potència elèctrica generada pel sistema utilitzant les variables del control vectorial.

La potència elèctrica  $P_{elect}$  es calcula amb la següent fórmula:

$$P_{elect} = 3 \cdot V_s \cdot I_s \cdot \cos(\alpha) \quad (15)$$

On:

- $V_s$  és la tensió de fase del generador.
- $I_s$  és el corrent de fase.
- $\alpha$  és l'angle de fase entre la tensió i el corrent.

Aquest valor també pot ser expressat com:

$$P_{elect} = 3 \cdot E_s \cdot I_s \quad (16)$$

En aquesta expressió,  $E_s$  representa la força electromotriu efectiva per fase (FEM), que depèn de la velocitat angular del rotor i les característiques del generador.

La FEM per fase es pot calcular de la següent manera:

$$E_s = \frac{E_{rms}}{\sqrt{3}} = \frac{E_{peak}}{\sqrt{2}} / \sqrt{3} = \frac{K_E \cdot n}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3}} \quad (17)$$

On:

- $E_{rms}$  és la FEM rms (valor quadràtic mitjà) de la fase.
- $E_{peak}$  és el valor de pic de la FEM de fase.
- $K_E$  és la constant electromagnètica del generador.
- $n$  és la velocitat angular del rotor.

Tant l'equació (16) com la (17) són les equacions que s'utilitzen en la simulació de PSIM, tal com es mostra en la següent figura:

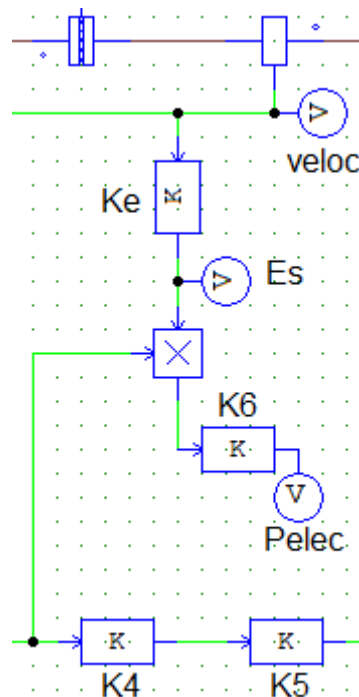


Figura 21. Simulació PSIM de la potència elèctrica.

Aquesta relació mostra com la potència elèctrica generada està directament lligada a la velocitat angular del rotor  $n$  i a la constant electromagnètica del generador. A mesura que la velocitat augmenta, la FEM també augmenta i, per tant, la potència elèctrica generada creix de manera proporcional, sempre que es mantingui el control adequat del corrent de fase.

Aquest model permet una anàlisi més detallada del comportament elèctric del sistema, mostrant com la potència elèctrica es pot predir i controlar a partir de les variables fonamentals que defineixen l'operació del PMSG en un entorn de control vectorial.

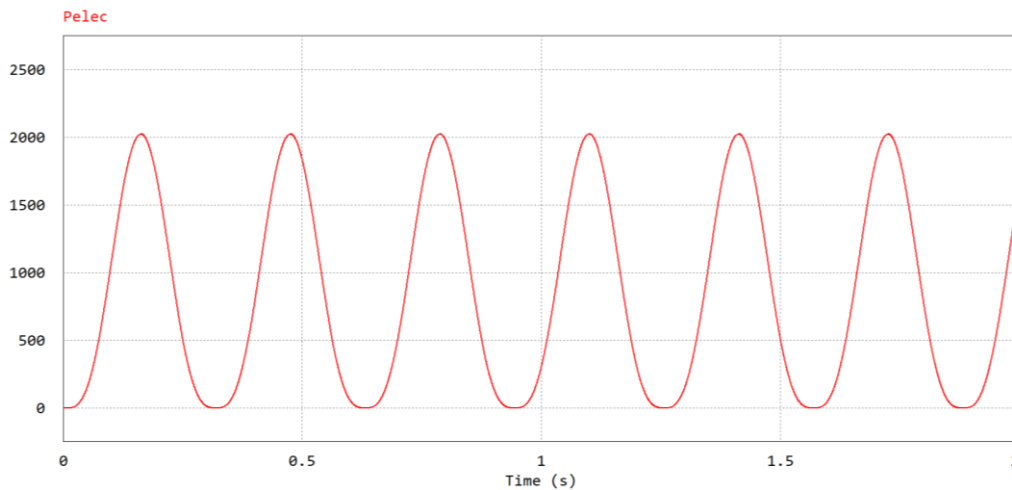


Figura 22. Potència elèctrica simulada.

Valor Màxim	Valor Mitjà	Valor RMS (Període)
2025.03 W	831.01 W	1105.59 W

Taula 9. Valors de la potència elèctrica en la simulació.

### *Valors utilitzats per al càlcul de la potència mecànica*

En el càlcul de la potència elèctrica del PMSG, s'utilitzen dos constants que influeixen en la precisió del càlcul. A continuació es presenten els valors de les constants utilitzades en el procés de control vectorial:

Nom de la constant	Valor
$K_E$	0.1327
$K_6$	3

Taula 10. Valors de les constants utilitzades en el càlcul de la potència elèctrica.

## 6.4 Estimació de la producció anual

### 6.4.1 Mètode de càlcul

En aquest estudi, la potència generada pel sistema OWC no és constant sinó que té una forma oscil·latòria, la qual cosa afecta la producció anual d'energia.

Per calcular la producció anual d'energia, es fa servir el valor mitjà de la potència, ja que és representatiu de la quantitat d'energia realment generada al llarg del temps. La producció anual es calcula mitjançant la fórmula següent:

$$E_{anual} = P_{mitjà} \cdot T_{any} \quad (18)$$

On:

- $E_{anual}$  és l'energia produïda anualment.
- $P_{mitjà}$  és el valor mitjà de la potència generada.
- $T_{any}$  és la durada total d'un any.

Aquest càlcul proporciona una estimació senzilla de la producció anual d'energia assumint condicions estacionàries ideals, amb onades constants i una operació contínua del sistema.

Tot i que utilitzem el valor mitjà per al càlcul de la producció anual, és important destacar que la potència generada pel sistema té una forma oscil·latòria, la qual cosa implica que la potència instantània varia al llarg del temps. Si es volgués tenir en compte la potència RMS, es podria utilitzar aquest valor per proporcionar una estimació més precisa en termes de potència efectiva, ja que el valor RMS és indicatiu de l'energia associada a una potència oscil·latòria.

La fórmula de càlcul basant-se en la potència RMS seria:

$$E_{anual} = P_{rms} \cdot T_{any} \quad (19)$$

On  $P_{rms}$  és el valor de la potència RMS, que dona una aproximació més realista de l'energia produïda en un any quan es treballa amb una forma d'ona oscil·latòria.

#### 6.4.2 *Escenaris de producció*

Tot i això, en la realitat, la potència generada pel sistema no seria constant al llarg de l'any. Factors com la variabilitat en les condicions del mar, la intensitat de les onades i la velocitat del vent afecten la velocitat del rotor i, conseqüentment, la potència generada pel PMSG. En un escenari realista, la producció d'energia dependria de la distribució de les onades durant l'any i de les diferents condicions meteorològiques.

Si la potència no fos constant, el càlcul de la producció anual es faria mitjançant la suma de les potències generades en intervals de temps diferents, considerant les fluctuacions en les condicions de funcionament:

$$E_{\text{anual}} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot T_i \quad (20)$$

On:

- $P_i$  és la potència generada en l'interval de temps  $i$ .
- $T_i$  és la durada d'aquest interval.

Aquest mètode permetria capturar les fluctuacions estacionals i operatives del sistema, proporcionant una estimació més acurada de l'energia realment produïda.

#### 6.4.3 *Resultats de la producció anual*

La producció anual d'energia del sistema depèn de la presència i disponibilitat de les onades, que varien significativament segons la regió. Com a exemple, a les costes del Mediterrani Occidental, es pot extreure energia de les onades al voltant del 30%-40% del temps a causa de la variabilitat en les condicions marítimes.

Prenent un valor mitjà del 35% de temps actiu per a la generació d'energia i els valors obtinguts en la simulació de la potència elèctrica (Taula 9), la producció anual corregida seria:

$$E_{\text{anual}} = 831.01 \text{ W} \cdot 8760 \text{ hores} \cdot 0.35 = \mathbf{2.55 \text{ MWh}}$$

Si considerem el valor RMS per al càlcul, que té en compte la fluctuació de la potència, i mantenim el mateix percentatge de temps actiu (35%), la producció anual corregida seria:

$$E_{\text{anual}} = 1105.59 \text{ W} \cdot 8760 \text{ hores} \cdot 0.35 = \mathbf{3.39 \text{ MWh}}$$

Aquest exemple ens il·lustra com la variabilitat de les onades en una regió com el Mediterrani Occidental afecta de manera significativa la producció d'energia. Tot i que la potència mitjana o RMS proporciona una estimació inicial, és fonamental tenir en compte el temps efectiu durant el qual es poden extreure onades per obtenir una imatge més precisa de la producció anual d'energia.

## **7. Discussió i anàlisi de resultats**

### **7.1 Comparativa amb altres sistemes de generació d'energia marina**

En aquest apartat, es comparen els resultats obtinguts del sistema OWC-PMSG amb altres tecnologies de generació d'energia marina, com ara les turbines marines de corrent, els sistemes d'extracció d'energia mareomotriu i els convertidors de potència d'onades flotants. En general, el sistema OWC-PMSG presenta un rendiment competitiu pel que fa a l'eficiència energètica en entorns on les onades tenen una freqüència i intensitat moderades. No obstant això, altres tecnologies, com les turbines de corrent o mareomotriu, poden ser més eficients en zones amb corrents oceànics més constants i predictibles.

A més, una diferència destacable és la complexitat del control vectorial necessària per al sistema OWC-PMSG. En comparació, altres sistemes com les turbines mareomotrius, tendeixen a tenir controls més senzills però menys adaptables a les variacions de les condicions de l'oceà. Tot i això, l'OWC-PMSG es beneficia d'un baix impacte ambiental i una alta fiabilitat gràcies a la manca de components mòbils exposats a l'aigua de mar.

### **7.2 Limitacions del sistema estudiat**

Tot i que el sistema OWC-PMSG ha demostrat una bona adaptabilitat a diferents condicions de les onades, presenta diverses limitacions. En primer lloc, el rendiment del sistema està molt influenciat per les condicions climàtiques. Onades de baixa intensitat o absència d'onades provoquen una reducció dràstica en la potència generada, fent que la producció sigui variable i, en alguns casos, insuficient per a aplicacions comercials a gran escala.

Un altre desafiament és la dependència del sistema del control vectorial, que requereix una configuració precisa per mantenir una operació eficient. Qualsevol desajust o error en el sistema de control pot derivar en pèrdues energètiques significatives. També cal considerar la resistència dels materials utilitzats, ja que l'exposició prolongada a l'aigua salada i l'ambient marí pot generar corrosió i falles mecàniques a llarg termini.

### **7.3 Propostes de millora i treball futur**

Tot i els resultats positius obtinguts en aquest estudi, hi ha diverses àrees en què es podrien implementar millores. En primer lloc, caldria aprofundir en l'estudi del control vectorial. El control utilitzat en aquest treball ha estat simplificat i, per tal d'aconseguir un sistema més eficient i estable, seria necessari un control més avançat que permetés ajustar millor les variacions de la potència elèctrica i mecànica, optimitzant així el rendiment del generador.

A més, seria recomanable implementar un sistema d'emmagatzematge energètic que ajudi a suavitzar les oscil·lacions de potència inherents a la naturalesa de les onades. Això permetria una entrega d'energia més constant i regular al llarg del temps.

## **8. Conclusions**

### **8.1 Resum dels resultats principals**

Aquest treball ha presentat una anàlisi exhaustiva del sistema OWC-PMSG (Oscillating Water Column - Permanent Magnet Synchronous Generator) aplicat a la generació d'energia marina. Les simulacions realitzades han permès estudiar el comportament del sistema en condicions variades, tant pel que fa a la velocitat de les onades com a la seva intensitat. Els resultats han demostrat que la potència generada pel sistema segueix un patró oscil·lant amb un valor mitjà i RMS significatiu, cosa que confirma que el sistema pot generar energia de manera contínua però amb fluctuacions associades a la naturalesa de les onades.

Tot i les variacions de potència, el sistema ha mostrat una bona adaptació a les diferents condicions marines, mantenint un nivell de producció energètica raonable. Els càlculs de la producció anual han indicat que, sota condicions ideals, el sistema pot subministrar una quantitat d'energia substancial, fent-lo una opció viable per a l'explotació energètica en zones costaneres.

### **8.2 Aportacions del treball**

Aquest estudi ha proporcionat diverses aportacions en el camp de l'energia marina. Primerament, s'ha demostrat la viabilitat de la combinació del sistema OWC amb generadors sincrònics de magnet permanent controlats vectorialment, destacant la capacitat de controlar de manera efectiva les fluctuacions energètiques causades per les onades. Aquesta configuració permet una millor gestió de l'energia i una major eficiència en la conversió d'energia mecànica en energia elèctrica.

A més, el treball ha posat èmfasi en l'ús de simulacions per avaluar el rendiment del sistema sota diferents condicions operatives, cosa que ha permès identificar els seus punts forts i limitacions.

### **8.3 Perspectives futures**

Mirant cap al futur, el sistema OWC presenta diverses àrees per a possibles millores. En primer lloc, la integració de sistemes d'emmagatzematge d'energia o solucions híbrides podria ajudar a compensar les fluctuacions naturals de la potència generada, proporcionant un flux energètic més constant i previsible. A més, el control vectorial realitzat en el projecte és simple, per la qual cosa s'hauria de fer estudis amb controls vectorials més complexos per poder augmentar l'eficiència i adaptabilitat del sistema.

Finalment, s'hauria d'investigar la implementació del sistema en escenaris reals, a diferents localitzacions costaneres, per comprovar la seva rendibilitat en condicions pràctiques i per avaluar el seu impacte mediambiental. Aquestes perspectives futures seran clau per impulsar l'adopció de la tecnologia OWC-PMSG com a part important del panorama de les energies renovables.

## 9. Annexos

### 9.1 Nomenclatures

OWC	Oscillating Water Column (Columna d'Aigua Oscil·lant)
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator (Generador Síncron de Magnet Permanent)
FEM	Força electromotriu
RMS	Root Mean Square (Valor Quadràtic Mitjà)
PSIM	Power Simulation (Software utilitzat per simular sistemes d'energia elèctrica)
ZDC	Zero Direct Current
ELC	Electronic Load Controller (Càrrega Electrònica Controlada)

### 9.2 Altres documents rellevants

#### *Simulació PSIM completa*

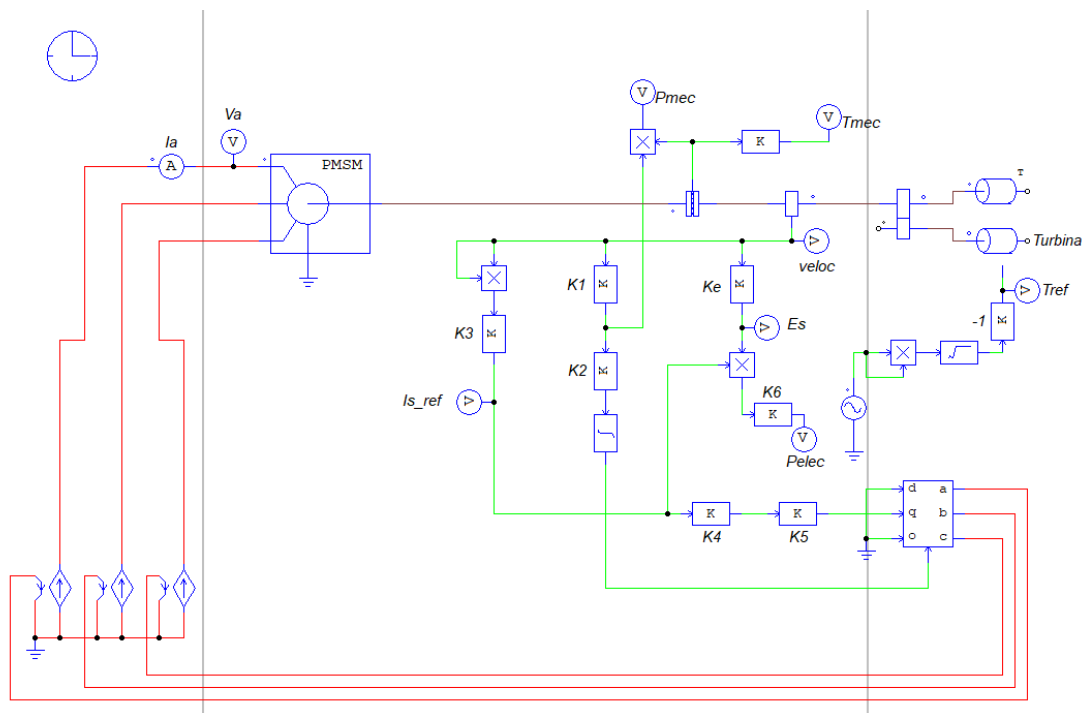


Figura 23. Circuit PSIM complet.

La figura anterior mostra el circuit complet utilitzat per a realitzar la simulació amb PSIM del sistema OWC-PMSG i el seu control vectorial. Aquesta simulació ha permès modelar i analitzar el comportament del sistema, així com obtenir resultats numèrics. Les diverses parts del circuit representades a la figura corresponen a les seccions descrites al llarg del projecte.

### Control Vectorial en Sistemes de Generació OWC-PMSG

En les simulacions realitzades al llarg d'aquest projecte, s'ha optat per utilitzar una font ideal de corrent controlada per a simplificar l'anàlisi i centrant-se així en la resposta del sistema davant de diferents condicions. Aquesta aproximació facilita l'obtenció de resultats numèrics clars i el modelatge dels components del sistema en un entorn controlat.

No obstant això, en un sistema real, el control vectorial implica la utilització d'un convertidor real. En general, la potència elèctrica generada pel PMSG es transfereix a un bus DC. Aquest bus pot estar connectat a altres fonts d'energia com sistemes fotovoltaics, bateries o directament a càrregues DC. Alternativament, en el cas que es desitgi injectar la potència elèctrica generada a la xarxa, s'utilitza un inversor (convertidor DC/AC), formant així un sistema back-to-back amb un convertidor de tres fases i un filtre d'inducció en la sortida per millorar la qualitat de l'onada elèctrica injectada.

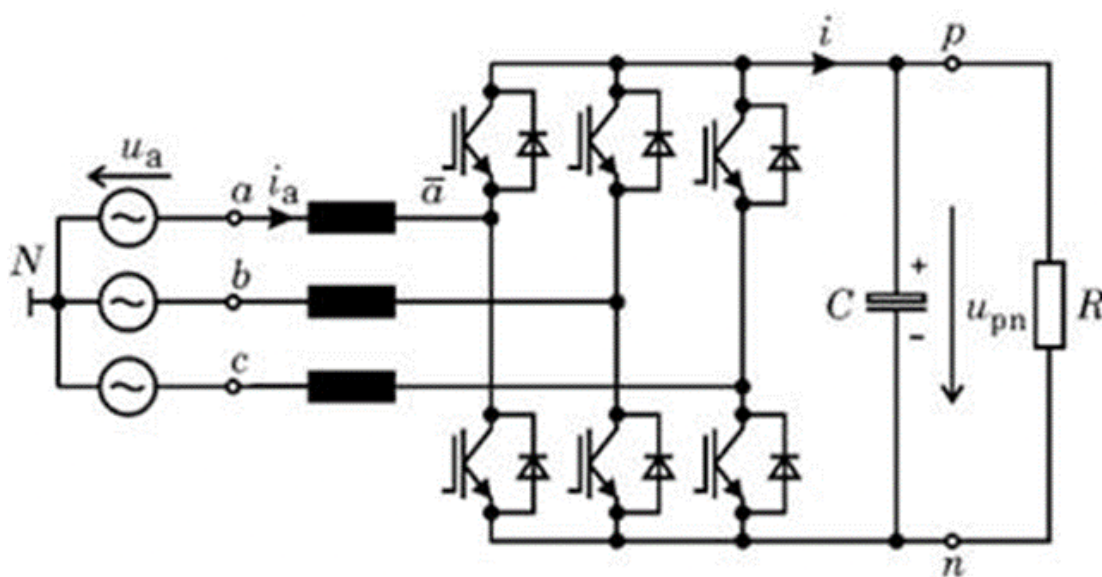


Figura 24. Esquema del Convertidor AC/DC.

Aquests sistemes reals solen implementar un control de corrent en un convertidor AC/DC, que es responsabilitza de regular la potència transferida al bus DC i, eventualment, a la xarxa elèctrica. Això es pot veure en aplicacions com els rectificadors de tipus boost de tres fases controlats per corrent, on el control actiu de la potència i la qualitat del senyal esdevé crucial per a l'eficiència global del sistema. Un exemple d'aquesta aplicació es pot trobar a [3], on es descriuen detalladament sistemes similars de conversió d'energia.

Aquest enfocament ajuda a establir una comparativa clara entre les simulacions simplificades i el que implicaria la implementació d'un sistema real en condicions pràctiques, on es té en compte l'impacte dels components físics i les interaccions amb la xarxa elèctrica o altres sistemes de generació d'energia.

## Referències

- [1] B. Drew, A. R. Plummer, and M. N. Sahinkaya, “A review of wave energy converter Technology”, Proc. Inst. Mech. Eng. A: J. Power Energy, 2009, pp. 223–887.
- [2] A. O. Di Tommaso, R. Miceli, G. Ricco Galluzzo, and M. Trapanese, “Efficiency maximization of permanent magnet synchronous generators coupled to wind turbines”, Proc. IEEE PESC, Orlando, FL, USA, Jun. 2007, pp. 1267–1272.
- [3] B. Wu,, Y. Lang, N. Zargari, S. Kouro, “*Power conversion and control of wind energy Systems*”, John Wiley & Sons. [Capítol 9: Variable-speed wind energy systems with synchronous generators]
- [4] Thakker and R. Abdulhadi, “Effect of blade profile on the performance of Wells turbine under unidirectional sinusoidal and real sea flow conditions”, Int. J. Rotating Mach., vol. 2007, pp. 1–8, Jan. 2007.
- [5] M. Amundarain, M. Alberdi, A. J. Garrido, and I. Garrido, “Modeling and simulation of wave energy generation plants: Output power control”, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 1, pp. 105–117, Jan. 2011.