

MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII  
UNIVERSITATEA „VALAHIA” din TÂRGOVIȘTE  
IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI  
DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ

# **TEZĂ DE DOCTORAT**

**-REZUMAT-**

**ROTOR HIBRID EOLIAN–FOTOVOLTAIC CU  
PALETE PLANE PIVOTANTE ȘI INEL  
PERIFERIC: MODELARE BEM/CFD, ANALIZĂ  
STRUCTURALĂ ȘI INTEGRARE  
MECATRONICĂ**

**CONDUCĂTOR DE DOCTORAT,  
Prof.univ.dr. Viviana FILIP**

**DOCTORAND,  
George-Daniel CHIRIȚĂ**

**TÂRGOVIȘTE  
2026**

## Cuvinte cheie – listă generala

- energie regenerabilă
  - sisteme hibride eolian–fotovoltaic (eolian–PV)
  - rotor hibrid eolian–fotovoltaic
  - microturbine eoliene
  - turbine eoliene de mică putere (SWT)
  - pale plane pivotante
  - pale adaptive
  - pas colectiv al paletelor
  - control unghi de pas (pitch control)
  - inel periferic de rigidizare
  - reducerea momentului la rădăcina paletelor
  - cogenerare simultană eolian–solar
  - integrarea celulelor fotovoltaice pe pale
  - celule fotovoltaice în rotație
  - performanță aerodinamică
  - coeficient de putere  $C_p$
  - raport de viteză specifică (TSR,  $\lambda$ )
  - regimuri Reynolds scăzute
  - pornire la vânt redus (cut-in)
  - protecție aerodinamică (feathering)
- 

## Cuvinte cheie - Modelare, simulare și analiză numerică

- metoda Blade Element Momentum (BEM)
  - simulări CFD (Computational Fluid Dynamics)
  - corelare BEM–CFD
  - distribuții de sarcină aerodinamică
  - analiza structurală FEM
  - metoda elementului finit
  - tensiuni și deplasări structurale
  - factori de siguranță (FOS)
  - stabilitate structurală
  - comportare la sarcini extreme
  - criterii de proiectare IEC 61400-2
-

## **Cuvinte Cheie - Mecatronică, mecanisme și acționări**

- integrare mecatronică
  - mecanisme de acționare
  - mecanism de pas colectiv cu biele
  - mecanism de orientare azimutală (yaw)
  - mecanism de înclinare (tilt)
  - lagăr principal al rotorului
  - rulmenți conici spate-în-spate
  - frânare aerodinamică și electrică
  - siguranță funcțională
  - fiabilitate mecanică
  - oboseală structurală
  - toleranțe mecanice
- 

## **Cuvinte cheie - Sisteme energetice și integrare în rețea**

- sisteme energetice hibride
  - complementaritatea vânt-soare
  - sisteme off-grid și grid-tied
  - micrețele energetice
  - stocare de energie
  - baterii LFP / redox-flow / hidrogen
  - management energetic (EMS)
  - invertoare inteligente (smart inverters)
  - control MPPT rapid
  - integrare în rețea electrică
  - curtailment și optimizare energetică
  - factor de capacitate
  - fiabilitate energetică
- 

## **Cuvinte cheie - Optimizare, sustenabilitate și direcții avansate**

- optimizare multi-obiectiv
- proiectare integrată aero-structurală-electrică
- digital twins
- mentenanță predictivă
- durabilitate și economie circulară
- reducerea amprente de carbon
- tranziție energetică
- infrastructuri energetice verzi

MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII  
UNIVERSITATEA „VALAHIA” din TÂRGOVIȘTE  
IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI  
DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ

Teza analizează și propune o **arhitectură inovatoare de rotor hibrid eolian–fotovoltaic**, destinată aplicațiilor de mică putere, care integrează **12 pale plane pivotante acoperite cu celule PV și rigidizate printr-un inel periferic**. Conceptul permite **cogenerarea simultană a energiei eoliene și solare** pe aceeași suprafață activă, utilizând o singură fundație și un lanț energetic comun, cu beneficii privind amprenta, fiabilitatea și factorul de capacitate.

Cercetarea este structurată pe un flux coerent **date** → **modelare** → **validare** → **integrare**, pornind de la analiza resurselor eoliene și solare și a complementarității vânt–soare, continuând cu **modelare aerodinamică BEM/CFD**, **analiză structurală FEM** și culminând cu **integrarea mecatronică** a mecanismelor de pas colectiv, yaw și tilt. Rezultatele demonstrează fezabilitatea aerodinamică și structurală a rotorului, rolul critic al inelului periferic în reducerea momentelor la rădăcina palelor și eficiența strategiilor de control pentru regimuri de pornire, funcționare nominală și protecție la vânt extrem.

Lucrarea aduce **contribuții originale** în proiectarea mecanică și integrarea funcțională a unui rotor hibrid eolian–PV, validat conform cerințelor IEC pentru microturbine, și evidențiază potențialul acestei soluții de a sprijini **sistemele energetice hibride, reziliente și sustenabile**, în contextul tranziției energetice.

## CUPRINS

### CAPITOLUL I

#### STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII ÎN DOMENIUL SISTEMELOR HIBRIDE EOLIAN– FOTOVOLTAIC

- \*Importanța și evoluția surselor de energie regenerabilă
- \*Tipuri de sisteme hibride(on/off grid) și domenii de aplicabilitate
- \*Provocări și tendințe în cercetarea sistemelor eoliene
- \*Tendințe actuale și direcții de cercetare
- \*Concluziile stadiului actual al dezvoltării sistemelor hibride eolian–PV

### CAPITOLUL II

#### ANALIZA RESURSELOR EOLIENE ȘI SOLARE PENTRU UN SISTEM HIBRID EOLIAN–PV

- \* Principii și rol
- \* Caracterizarea resursei eoliene
- \* Metode și instrumente pentru evaluarea potențialului eolian
- \* Caracterizarea resursei solare
- \* Metode și instrumente pentru evaluarea potențialului solar și complementaritatea vânt–soare
- \* Scenarii de operare – dimensionare și concluzii

### CAPITOLUL III

#### FUNDAMENTE MECANICE ALE ROTORULUI HIBRID EOLIAN–PV

- \* Obiectiv și context
- \* Motivația cercetării
- \* Stadiul actual al cercetării
- \* Integrarea celulelor PV pe pale
- \* Pale adaptive și pas colectiv
- \* Cogenerare simultană
- \* Indicatori de piață și performanță
- \* Rezultate, concluzii și direcții viitoare

#### CAPITOLUL IV

##### MODELARE AERODINAMICĂ ȘI SIMULĂRI BEM/CFD

- \* Obiective
- \* Rezultate BEM – Blade Element Momentum
- \* Rezultate CFD – Computational fluid dynamics
- \* Concluzii

#### CAPITOLUL V

##### ANALIZA STRUCTURALĂ FEM – Finite Element Method

Obiectiv

Scenariul 1 – Paleta individual

Scenariul 2 – Rotor complet (palete + butuc + inel)

Concluzii generale

#### CAPITOLUL VI

##### MECANISME DE ACȚIONARE ȘI INTEGRAREA MECATRONICĂ

- \* Cerințe funcționale și interfețe
- \* Dimensionarea catargului
- \* Lagărul de rotație azimutală (yaw)
- \* Lagărul principal al rotorului
- \* Mecanismul de pas colectiv
- \* Mecanismul de înclinare (tilt)
- \* Concluzii

##### CONCLUZII ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

- \* Concluzii generale
- \* Contributii proprii
- \* Direcții viitoare de cercetare
- \* Referințe bibliografice

## CAPITOLUL I

### STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII ÎN DOMENIUL SISTEMELOR

#### HIBRIDE EOLIAN–FOTOVOLTAIC

Acces capitol prezintă stadiul actual al arhitecturilor hibride eolian–PV și principalele direcții de cercetare. Sunt analizate configurațiile off-grid cu baterii, soluțiile grid-tied cu sau fără stocare on-grid, sistemele diesel-hibrid și aplicațiile multi-sursă. Se evidențiază elementele de conversie și control (invertoare inteligente, EMS, sisteme SCADA/IoT/AI), standardele de interconectare și tendințele actuale (baterii LFP -GEL, soluții redox-flow, hidrogen, digital twins, mentenanță predictivă).

##### 1. *Importanța și evoluția surselor de energie regenerabilă*

Context și motivație.

- Regenerabilele trec din „alternativă” la pilon central al mixului energetic, pe fondul urgenței climatice, al securității energetice și al maturizării tehnologice.
- Scăderea LCOE pentru PV și eolian (vs. 2010), digitalizarea operării (prognoză, EMS, automatizare) și stocarea (LFP, redox-flow, H<sub>2</sub>) susțin adoptarea accelerată.
- Beneficii de mediu și sănătate: CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> și PM(particule in suspensie) în scădere; co-beneficii pentru calitatea aerului și biodiversitate.

Cadrul de politici și standarde.

- UE: neutralitate 2050, –55% emisii până în 2030; pachete: *Green Deal*, *Fit for 55*, *REPowerEU*.
- Protecție, Interconectare și interoperabilitate: EN 50549 / RfG, IEEE 1547, IEC 61850.

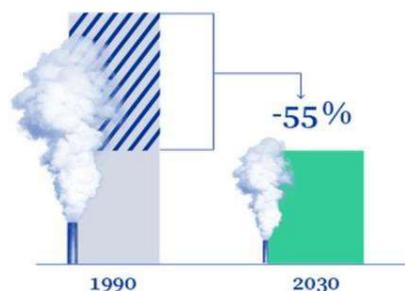
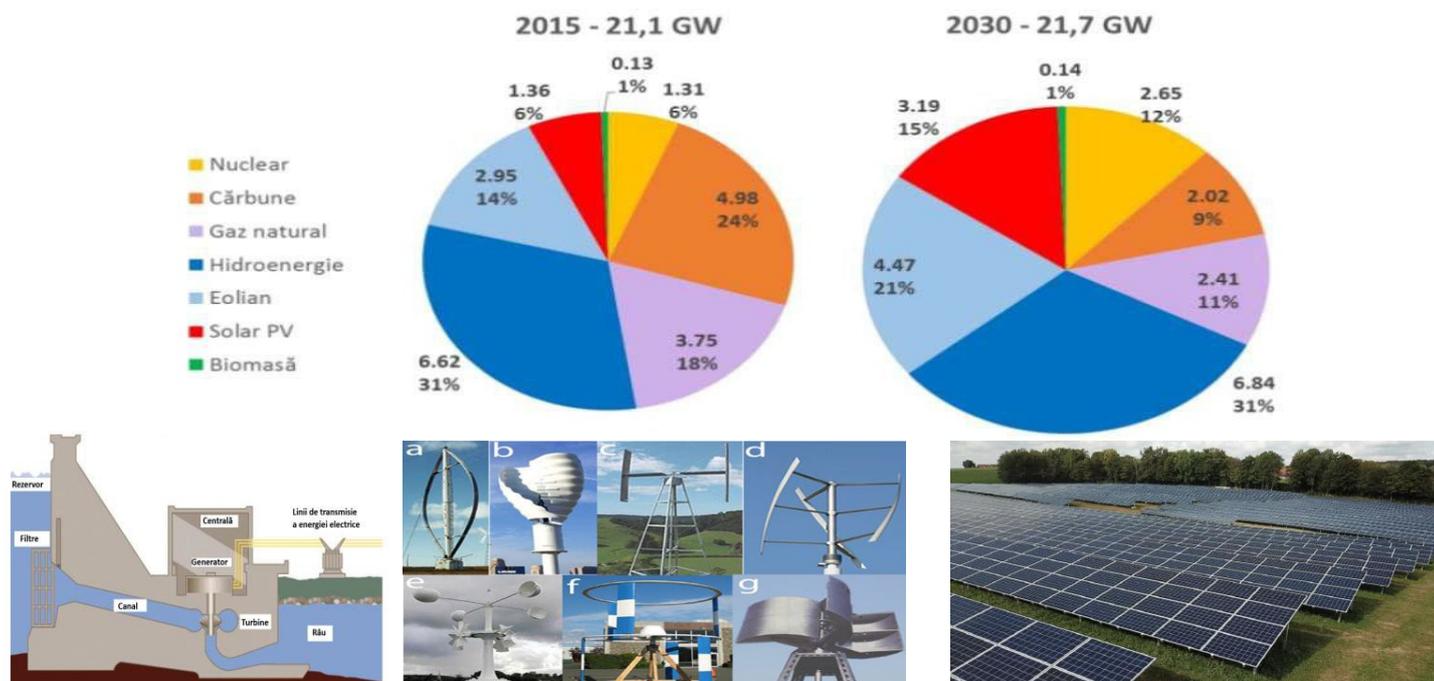


Fig. 1.1. Țintele UE privind reducerea emisiilor CO<sub>2</sub>.

**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII**  
**UNIVERSITATEA „VALAHIA” din TÂRGOVIȘTE**  
**IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI**  
**DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ**



**Tipuri de sisteme hibride și domenii de aplicabilitate**

Notă: Tipologiile sunt ordonate de la aplicații insulare/off-grid la aplicații grid-tied și offshore.

**1. Sisteme hibride eolian–PV cu stocare în baterii (off-grid)**

- Arhitecturi: *DC-coupled* (randament bun la stocare) / *AC-coupled* (flexibilitate la extindere); inverteoare grid-forming pentru regim insular.
- Avantaje: independență, profil de producție mai plat (complementaritate vânt–soare), cost total pe viață < soluții diesel-only.
- Aplicații: comunități izolate, telecom, agricultură (pompare/frig), clinici/școli rurale, tabere umanitare, aplicații industriale „edge”.

**1. Sisteme hibride eolian–PV conectate la rețea (grid-tied)**

- Model operațional: injecție în rețea; stocare opțională pentru autoconsum, vârfuri, servicii de sistem.
- Avantaje: monetizare surplus (feed-in/net-billing/PPA), fiabilitate (rețeaua acoperă dezechilibrele), CAPEX inițial redus.
- Tehnic/standardizare: *AC/DC-coupled*, funcții smart inverter (volt-VAR, ride-through, limitare export), conform EN 50549 / RfG, IEEE 1547.
- Aplicații: rezidențial/prosumatori,

**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII**  
**UNIVERSITATEA „VALAHIA” din TÂRGOVIȘTE**  
**IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI**  
**DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ**

3. *Sisteme hibride cu surse convenționale (diesel-hibrid)*
  - Descriere: generatorul diesel asigură vârfuri și perioade nefavorabile; EMS + stocare reduc funcționarea inefficientă.
  - Aplicații: site-uri critice/temporare, climă variabilă, continuitate ridicată.
4. *Sisteme hibride multi-source (PV + eolian + microhidro/biomasă)*
  - Beneficii: profil diversificat, curtailment redus, reziliență ridicată.
  - Aplicații: microrețele complexe (campusuri, baze), zone cu resurse complementare.
5. *Sisteme hibride cu stocare avansată (baterii mari, supercapacitori, hidrogen)*
  - Rol: autonomie extinsă, servicii auxiliare (frecvență/tensiune), absorbție a surplusurilor VRE.
  - Tehnologii: LFP/Na-ion/flow (mediu), supercapacitori (rapid), hidrogen (lung, *sector coupling*).
6. *Microrețele și aplicații urbane/suburbane*
  - Caracteristici: mod on-grid/insulă, AMI/SCADA/EMS, răspuns la cerere.
  - Beneficii: reziliență, autoconsum, optimizare costuri.
7. *Aplicații maritime și offshore*
  - Configurații: eolian offshore (fix/flotant) + PV plutitor, uneori stocare; resurse mai stabile, costuri/logistică mai ridicate.
  - Aplicații: coaste/insule, proiecte R&D flotante.



Fig. 1.3. Exemplu de integrare PV în mediul urban

**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII**  
**UNIVERSITATEA „VALAHIA” din TÂRGOVIȘTE**  
**IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI**  
**DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ**

*Tendențe actuale și direcții de cercetare*

- Flexibilitate: baterii LFP ca standard; redox-flow/hidrogen pentru durate mai lungi; DSR pentru limitarea ciclării bateriei.
- Digitalizare & AI: prognoză probabilistă, digital twins, optimizare set-point, întreținere predictivă.
- Smart inverters & standarde: funcții grid-support (volt/VAR, frequency-Watt, ride-through), interoperabilitate (IEC 61850, IEEE 1547, EN 50549).
- Arhitecturi hibride & microrețele: PV + eolian + stocare; grid-forming pentru insularizare sigură.
- Economie circulară: reciclare bateriilor și module PV, pale eoliene; proiectare pentru demontare/reparabilitate.
- Extindere domenii: PV flotant, agri-PV, integrare cu mobilitatea electrică și încălzirea

*Concluziile stadiului actual al dezvoltării sistemelor hibride eolian–PV*

- Competitivitatea PV/eolian – separat și hibrid – rămâne motorul expansiunii.
- Integrarea robustă cere tehnologii/algoritmi și standardizare (smart grids, flexibilitate, interconectare).
- Hibridele eolian–PV oferă profil de producție mai stabil, stocare mai mică și aliniere mai bună la curbele reale de consum.
- Cercetare & inovare: performanță echipamente (turbine, PV, stocare), data-driven O&M (prognoză, optimizare, mentenanță predictivă) și economie circulară.

*Concluzie finală (Cap. 1). Hibridele eolian–PV, susținute de stocare și digitalizare, sunt o piesă-cheie a tranziției energetice: reduc emisiile, cresc reziliența și valorifică optim resursele locale. Acest cadru fundamentează etapele ulterioare ale tezei (proiectare, modelare, validare și integrare mecatronică).*

## CAPITOLUL II

### ANALIZA RESURSELOR EOLIENE ȘI SOLARE PENTRU UN SISTEM HIBRID EOLIAN–PV

Acest capitol fundamentează analiza prin caracterizarea resurselor eoliene și solare. Metodologia de achiziție și prelucrare a datelor (anemometrie multi-înălțime, măsurători solare, serii satelitare) permite generarea unor ipoteze de proiectare verificabile. Complementaritatea resurselor este demonstrată și transpusă în scenarii concrete pentru dimensionarea sistemului.

#### *2.1. Caracterizarea resursei eoliene*

Obiectiv: definirea indicatorilor de sit care intră în proiectare (producție + sarcini).  
Factori de sit: topografie, rugozitate/obstacole, stabilitate atmosferică, sezonalitate → influențe asupra shear, TI, rafalelor.

Pași de analiză

- Perioadă recomandată:  $\geq 12$  luni (ideal 24–36) + corelare cu serii lungi pentru corecții climatologice.

Parametri-cheie

- Viteza vântului (pe niveluri 10/30/50 m → hub height), direcția (roze), TI și rafale → intrări pentru CFD/FEM și curbe de putere.
- Rezultat: set complet de indicatori ( $v_{med}$ , temperatura, shear, rafale și TI) pentru selectarea turbinei, înălțimii turnului și cazurilor de calcul.

România – observație de sit

- Coridoare eoliene competitive: Dobrogea, creste carpatice, Câmpia de Vest; complementaritate bună cu resursa solară din sud/vest → potrivit pentru hibride.

Consecințe în proiectare

- Potrivire curba de putere ↔ distribuție viteze (cut-in/rated/cut-out).
- Hub height: compromis producție vs. cost.

- Control & siguranță: pitch, limitare ramp-rate în situri cu TI/rafale mari.  
Relevanță pentru hibrid
- Identificarea ferestrelor de complementaritate cu PV (zi/noapte; iarnă/vară).
- Dimensionarea bateriei/invertoarelor și regulilor EMS (SOC țintă, limitări export).

## **2.2. Caracterizarea resursei solare**

Rol: dimensionarea PV (unghi, orientare, stringuri, MPPT, inversoare), stocare și operare.

Parametri esențiali

- Albedo & bifacialitate; temperatura celulei ( $T_{cell}$ , modele NOCT); AM/spectru.

Măsurare & surse de date

- La sol: piranometre/pyrheliometre (ISO 9060; ghiduri WMO), RSI pentru DHI.
- Analiza satelit + corelare/validare locală).

Analiză și transpunere

- Statistici (medii, percentili, histograme orare/diurne/sezoniere).
- Modele de transpunere (cer senin/înnorat) → POA; optimizare unghi fix  $\approx$  latitudine (cu ajustări), trackere 1-axis/2-axis (producție ↑ vs. cost/O&M ↑).

Factori locali & incertitudini

- Aerosoli, nori, soiling, umbriri → management (curățare, vegetație).
- Bancabilitate: QC/QA, audit senzori, corelare satelit-sol.

**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII**  
**UNIVERSITATEA „VALAHIA” din TÂRGOVIȘTE**  
**IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI**  
**DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ**

### **2.3. Complementaritatea vânt-soare**

Definiție: gradul în care seriile eoliană și PV se compensează temporal → profil combinat mai stabil.

Indicatori: corelații (Pearson/Kendall), joint-pdf pe niveluri, cross-correlation cu lag, ELCC/EFP portofoliu, scenarii sezoniere și pe tipuri de vreme. Pattern tipic (climat temperat): vânt mai puternic iarna/noaptea vs. PV maxim vara/ziua → aplatizare a profilului mixt, mai puține intervale „low-low”.

Implicații în proiectare

- Raport PV:eolian care minimizează LOLP(probabilitatea pierderii de sarcina) /LPSP(putere minima de incarcare) la SOC(nivel de incarcare) dat; baterie necesară mai mică; reguli EMS (prioritizare încărcare, limitări ramp, zero-export).
- Integrare rețea: curtailment redus, participare la flexibilitate; respectarea funcțiilor smart-inverter.

Flux practic

1. Extrage serii multi-an PVGIS/ERA5 (GHI/DNI/DHI, vânt/direcții).
2. Transpunere la POA + T<sub>cell</sub> (PV) și conversie la putere eoliană (curbe de putere la hub height).
3. Calculează corelații/joint-pdf/ELCC.
4. Optimizează mixul PV:eolian + stocare (HOMER/PVSystem/Simulink).
5. Validează local cu măsurători.

### **2.4. Scenarii de operare și dimensionare**

Variabile-cheie: PPV, PW, EB (kWh), PB (kW), AC- vs. DC-coupled, mărimea invertoarelor, reguli EMS (SOC ținte, ramp, zero-export), cerințe de interconectare (EN 50549/RfG, IEEE 1547; EMC/anti-islanding).

Indicatori: AEP, PR, factor de capacitate, curtailment, LPSP/LOLP, ciclare baterie, ELCC; intră în CAPEX–OPEX–LCOE.

A) Off-grid (insular)

- Ținte: autonomie 12–48 h, LOLP ≤ 1–5%, black-start, grid-forming.
- Dimensionare: mix tipic 60:40...70:30 (PV:eolian) (ajustat pe date locale); EB pe „ferestre fără resursă”.
- Control: încărcare pe surplus, ramp-limit, dump-load pe vârfuri eoliene.

B) Prosumator grid-tied

- Ținte: autoconsum max., zero-export, tarife dinamice, DR.
- Dimensionare: PPV ancorat diurn; PW pentru noapte/sezon; EB pentru peak-shaving.

**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII**  
**UNIVERSITATEA „VALAHIA” din TÂRGOVIȘTE**  
**IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI**  
**DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ**

- Conectare: funcții smart-inverter (volt-VAR, ride-through).

C) Rețea slabă / constrângeri locale

- Ținte: curtailment minim, tensiune/armonică în limite, export plafonat.
- Dimensionare: alegere AC/DC-coupled; PB suficient pentru clip-shaving; EMS pentru ramp/limitare export.

D) Microrețea campus/industrial

- Ținte: reziliență (mod insular), criteriu N-1, cost minim sub TOU/peak.
- Dimensionare: PV + eolian + EB pe „critical load”; participare la DR/VPP.

E) Hibrid cu back-up convențional (diesel)

- Ținte: reducerea orelor pe combustibil; operare la punct de randament optim.
- Dimensionare: PV+eolian acoperă baza; EB ia tranziții; generatorul pornește la SOC/încărcare critice.

Flux de lucru (rezumat)

1. Date: serii orare/sub-orare eolian/solar + sarcină; QC/QA.
2. Modelare: POA + T<sub>cell</sub>; curbe de putere eoliană; scenarii extreme (percentile, episoade fără soare/vânt).
3. Optimizare: scanare (PPV, PW, EB, PB, topologie) la ținte LCOE/LOLP; constrângeri export/ramp/standarde.
4. Validare: HOMER/PVSystem/Simulink + sensibilități (preț baterii, tarife, degradare PV).

Legătura cu CFD/FEM (cap. următoare): scenariile furnizează cazuri de proiectare (vânt–TI–rafale– $\lambda$ ,  $\beta$ ) pentru CFD și combinații de sarcini pentru FEM (vânt/inerție/gravitație, cicluri).

### ***2.5. Studiul de potențial pentru amplasamentul ales***

Concluzii de amplasament și Analiză economică & de mediu

- Adecvare: verdict de fezabilitate pe baza resursei + simulări + cost-beneficiu.
- Configurație optimă: tip turbină, capacitate PV, tehnologie/dimensiune stocare, topologie AC/DC, schema de conectare, cerințe standard și nu în ultimul rând buget și ecologie

*Concluzie Capitolul 2*

- *Date solide + metodologie coerentă (măsurare → modelare → validare) = incertitudine redusă și dimensionare optimă.*
- *Complementaritatea vânt–soare aplatizează profilul, scade stocarea și curtailment-ul la aceeași fiabilitate.*
- *Scenariile de operare conectează resursa cu proiectarea echipamentelor (PV, eolian, stocare, conversie) și cu regulile EMS, pregătind cazurile CFD/FEM.*
- *Rezultatul: bază robustă pentru un sistem hibrid eolian–PV competitiv, sigur și bancabil, adaptat sitului ales.*

## CAPITOLUL III

### FUNDAMENTE MECANICE ALE ROTORULUI HIBRID EOLIAN–PV

În acest capitol se introduce conceptul mecanic central: un rotor hibrid eolian–fotovoltaic cu diametrul de 3 metri, alcătuit din 12 pale plane pivotante, acoperite cu celule PV și rigidizate printr-un inel periferic. Este descrisă logica de proiectare a hub-ului, a mecanismului de pas colectiv, a elementelor de rigidizare și a soluțiilor de colectare electrică.

#### 1. *Obiectiv și context*

- Se propune un rotor hibrid de 3 m diametru, cu 12 pale pivotante plane acoperite cu PV și rigidizate printr-un inel periferic.
- Conceptul urmărește cogenerarea simultană (vânt + solar) pe aceeași suprafață mobilă, cu o singură fundație și un singur lanț electric.
- Noutatea: integrare aero–electro–structurală completă, absentă din literatura existentă.
- Inelul reduce cu ~70–75% momentul la rădăcina palelor; pierderile aerodinamice sunt moderate ( $\Delta C_p \approx 5\text{--}8\%$ ).
- Puterea PV în rotație  $\approx 15\text{--}25\%$  din nominal, în funcție de unghi și umbrire.

#### 2. *Motivația cercetării*

- Limitările soluțiilor stand-alone:
  - PV: intermitență, soiling, supraîncălzire;
  - Eolian mic: cut-in ridicat,  $C_p$  modest, sensibilitate la turbulență.
- Avantajul hibridei compacte:
  - Complementaritate zi/noapte, vară/iarnă;
  - Reducere amprentă, costuri BOS și stocare;
  - Creștere factor de capacitate și fiabilitate energetică.
- Originalitate:
  - Suprafețe duale (pală = aerodinamic + PV activ);
  - Pivotal colectiv pentru trecere rapidă între moduri;
  - Cogenerare reală cuantificată (aero + PV sincron);
  - Metodologie unificată BEM–CFD–FEM + teste I–V dinamice.

### **1. Stadiul actual al cercetării**

- Tipologii  $\leq 5$  kW: umbrele PV, VAWT cu pale PV, kituri plug-and-play, PV pe nacelă.
- Lacune identificate:
  - Lipsa datelor sincronizate  $C_p$ - $\eta_{PV}$  sub rotație reală
  - Lipsa unui mecanism de pas colectiv pentru pale acoperite cu PV;
  - Probleme de fiabilitate la mase și articulații mobile.

### **3.3. Integrarea celulelor PV pe pale**

- Abordări raportate:
  - Foliile subțiri laminate (ușoare, dar probleme de oboseală adeziv);
  - Module curbate pe VAWT ( $C_p \approx 0,23$ , cu inerție  $\uparrow$  și cost  $\uparrow$ );
  - Celule încastate „flush” (optime aero, dar complicat tehnologic);
  - Pale pivotante PV
  - Provocări: compatibilitate mecanică (oboseală), penalități aerodinamice, ripple electric, răcire termică.
- Legătura cu rotorul de 3 m: adoptă laminat subțire + inel periferic + MPPT rapid.

### **3.4. Pale adaptive și pas colectiv**

- Strategii existente: folding, feathering, morphing;
- Limite pentru PV: dificultăți de integrare a laminatelor și cablajului.
- Noutatea tezei: pivot colectiv robust (stil elicopter), ce permite:
  - Funcționare dual-mode (PV plan, eolian cu  $\beta$  optim);
  - Control sarcini la rafale;
  - Menținerea incidenței PV în rotație.

**Strategii de pale adaptive în concepte hibride eolian-PV de mică putere**

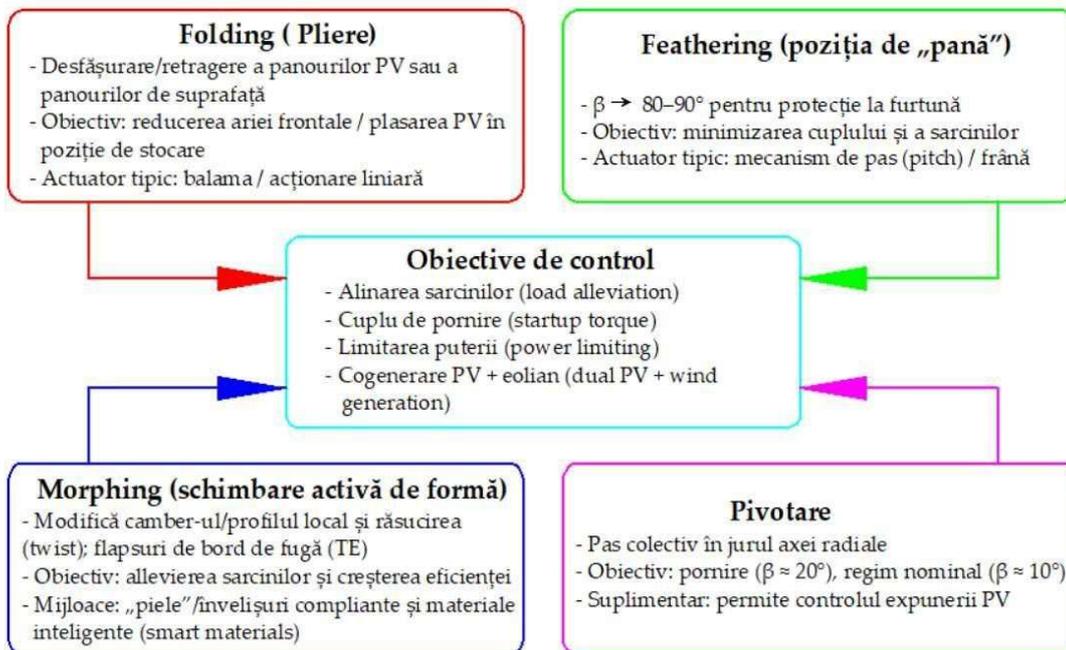


Figura 3.1. Clasificare schematică a strategiilor de folding, feathering, morphing și pivotare colectivă

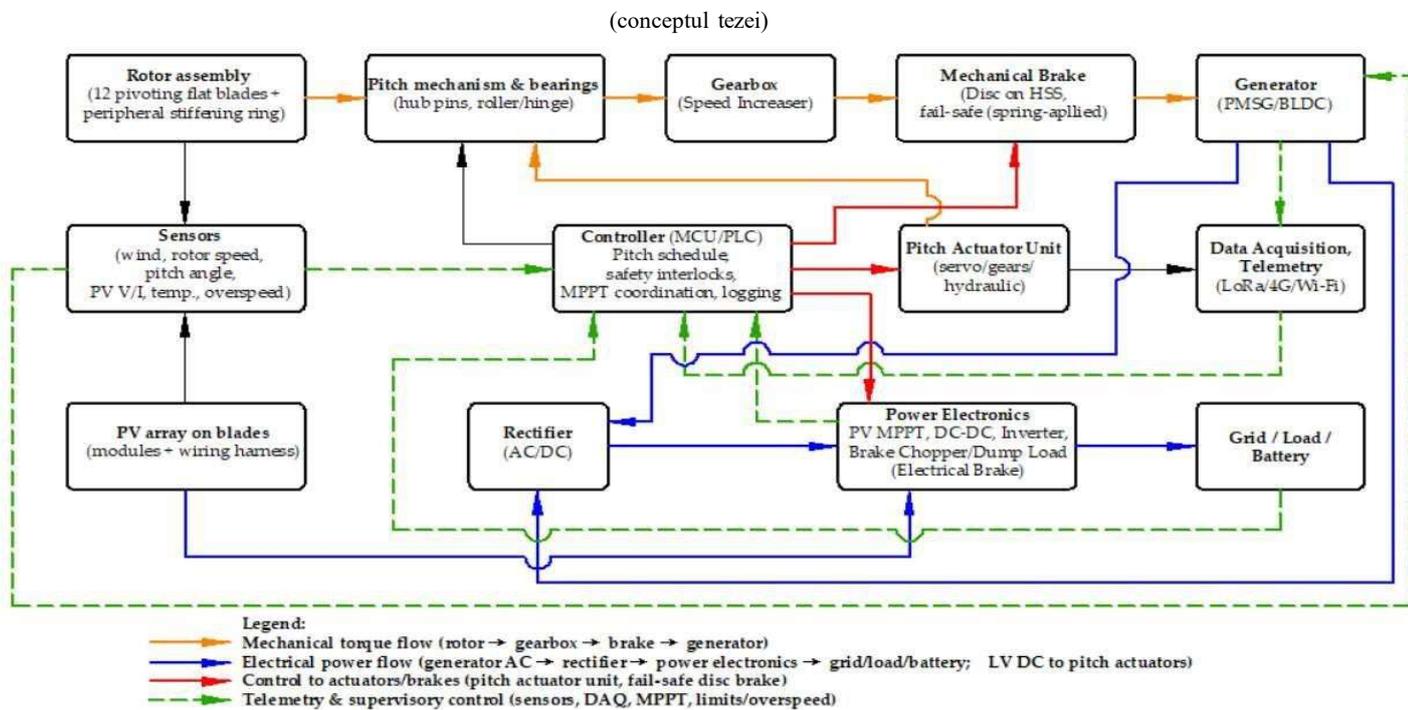
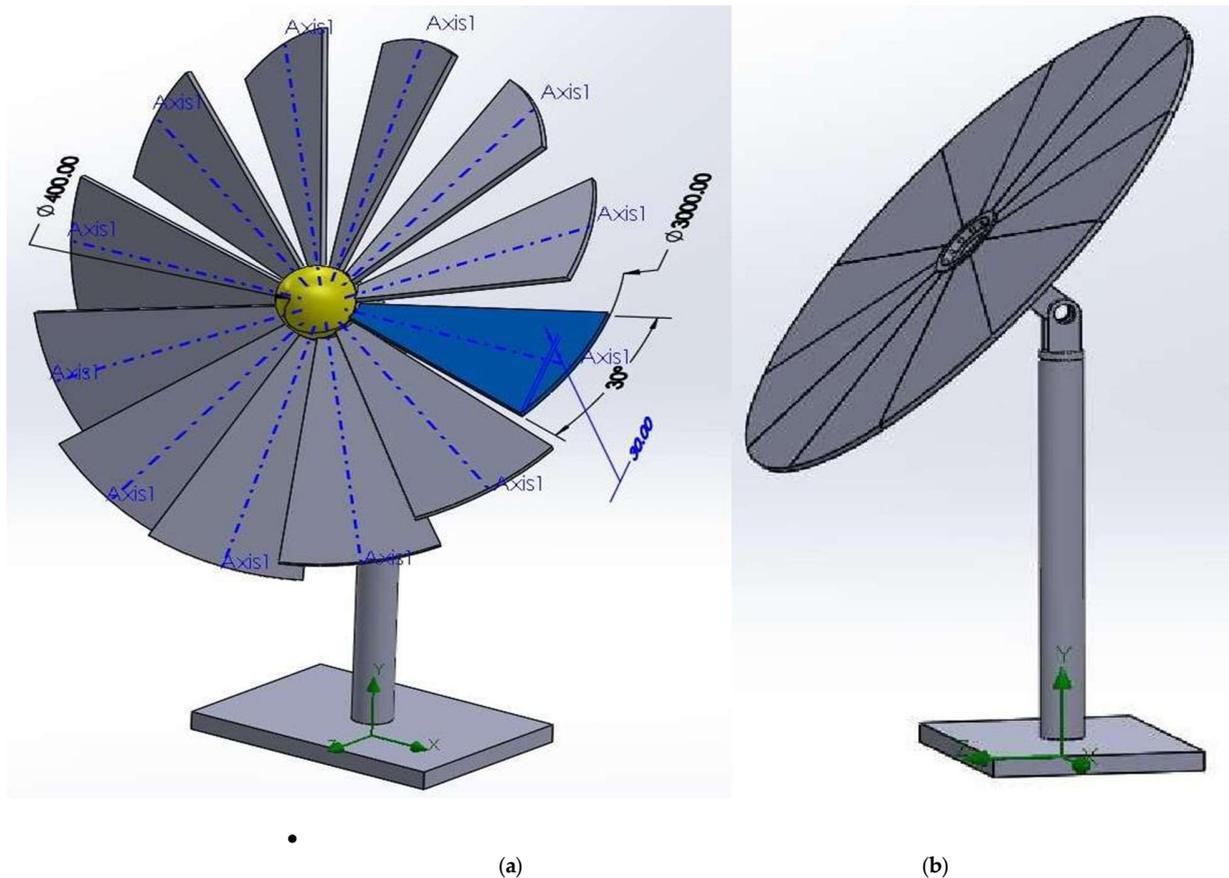


Figura 3.2. Rotor hibrid eolian-PV: hartă de subsansamble și trasee semnal/putere

### 3.7–3.9. Concept și subansamble

- Componente cheie: bază, catarg, yaw, tilt, nacele, butuc, pale pivotante cu PV, inel periferic, slip-ring sau micro-invertoare, mecanism de pas colectiv.
- Mecanism de pas: placă poligonală + biele → pivot sincron pentru toate palele.
- Rigidizare: inel periferic + spițe = reducere 70–75% a momentului la rădăcină.
- Frânare: electrică (dump-load), aerodinamică (full feather), mecanică (fail-safe).
- Multiplicare: planetar, curea/lanț sau direct-drive.



(a) (b)

Figura 3.2. Rotor hibrid eolian–fotovoltaic (model schematic și poziții de operare)

a) Mod turbină eoliană, cu cote:  $\varnothing$  total rotor 3000 mm;  $\varnothing$  butuc 400 mm (raza pivot 200 mm); sector pală 30°. Linile punctate (albastru) indică cele 12 axe de pivot.

b) Mod fotovoltaic. Discul rotor este înclinat către soare; palele sunt blocate pentru a forma o suprafață PV continuă, iar catargul permite urmărirea zilnică a soarelui.

MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII  
UNIVERSITATEA „VALAHIA” din TÂRGOVIȘTE  
IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI  
DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ

*Concluzii capitol 3 si directii viitoare*

*Estimări:  $C_{p,max} \approx 0,22-0,24$ ; reducere  $M_{root} \approx 70\%$ ;  $\Delta T_{cell} -3...-5$  °C;  $\eta_{PV} \geq 15\%$  din nominal la 60–120 rpm.*

- *Concluzie: conceptul de rotor hibrid este tehnic fezabil și economic competitiv, cu beneficii evidente la amprentă și factor de capacitate.*
- *Provocări: fiabilitatea pe termen lung a laminatelor PV și a slip-ring-urilor, toleranțe mecanice, control tranzitoriu.*
- *Validare BEM–CFD–FEM și prototip fizic testat conform IEC 61400-2(standard de securitate in design, instalare si mentenanta) .*
- *Optimizare multi-obiectiv și integrare cu stocare.*
- *Certificare standardizată pentru SWT și siguranță PV/EMC.*

## CAPITOLUL IV

### MODELARE AERODINAMICĂ ȘI SIMULĂRI BEM(blade element momentum)/CFD(computational fluid dynamics)

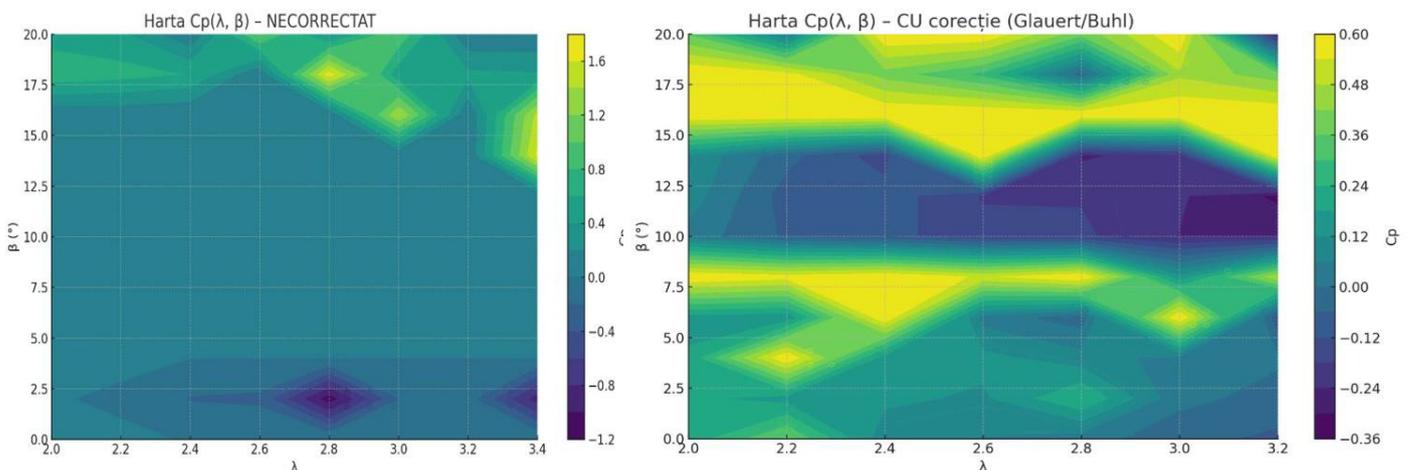
Acest capitol stabilește baza aerodinamică a rotorului, utilizând un model BEM adaptat pentru regimuri Reynolds scăzute și validări CFD. Se obțin hărțile de performanță ( $C_p$ ,  $\lambda$ ,  $\beta$ ) și distribuțiile radiale de sarcini, care constituie intrări pentru analiza structurală.

#### 1. Obiective

- Evaluarea rotorului hibrid eolian–PV ( $D=3$  m, 12 pale plane + inel periferic).
- Determinarea performanțelor aerodinamice și a sarcinilor pentru analiza structurală ulterioară.
- Validare prin BEM și CFD pentru trei regimuri cheie: cut-in (3 m/s), nominal (5 m/s) și extrem (25 m/s, protecție feathering).

#### 2. Rezultate principale BEM

- **Eficiență aerodinamică ( $C_p$ ):** maxim  $\approx 0,35$ – $0,38$  la  $\lambda \approx 2,6$ – $2,8$  și  $\beta \approx 10$ – $12^\circ$ .
- **Platou de eficiență:** zonă largă ( $\lambda$  2,4–3,0,  $\beta$  8– $14^\circ$ ) cu  $C_p > 0,3$ .
- **Pornire:** la  $\beta \approx 20$ – $22^\circ$  cuplu suficient pentru autodemaraj ( $\approx 3,5$  N·m la 3 m/s).
- **Extreme (feathering):**  $C_p$  scade spre 0; rotorul devine frână aerodinamică.



#### 4.3. Rezultate CFD

- **Cut-in:**

- $\beta=0^\circ \rightarrow$  cuplu  $\approx 0$  (nu pornește).
- $\beta=10^\circ \rightarrow$  cuplu mic ( $\approx 2-3 \text{ N}\cdot\text{m}$ ).
- $\beta=20^\circ \rightarrow$  cuplu  $\approx 9 \text{ N}\cdot\text{m}$ , suficient pentru pornire.

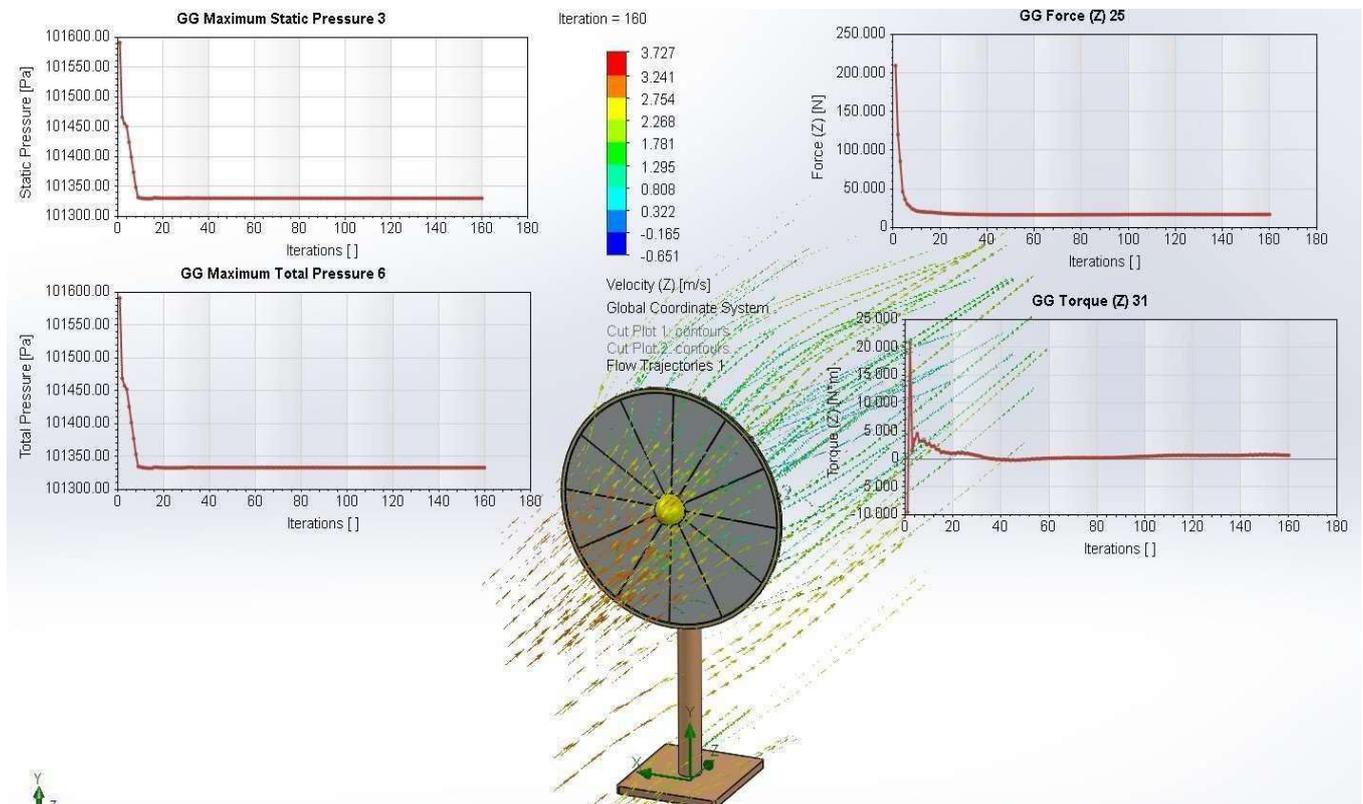


Figura 4.7. Caz “Cut-in” ( $\beta = 0^\circ$ ), CFD studiu

**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII**  
**UNIVERSITATEA „VALAHIA” din TÂRGOVIȘTE**  
**IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI**  
**DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ**

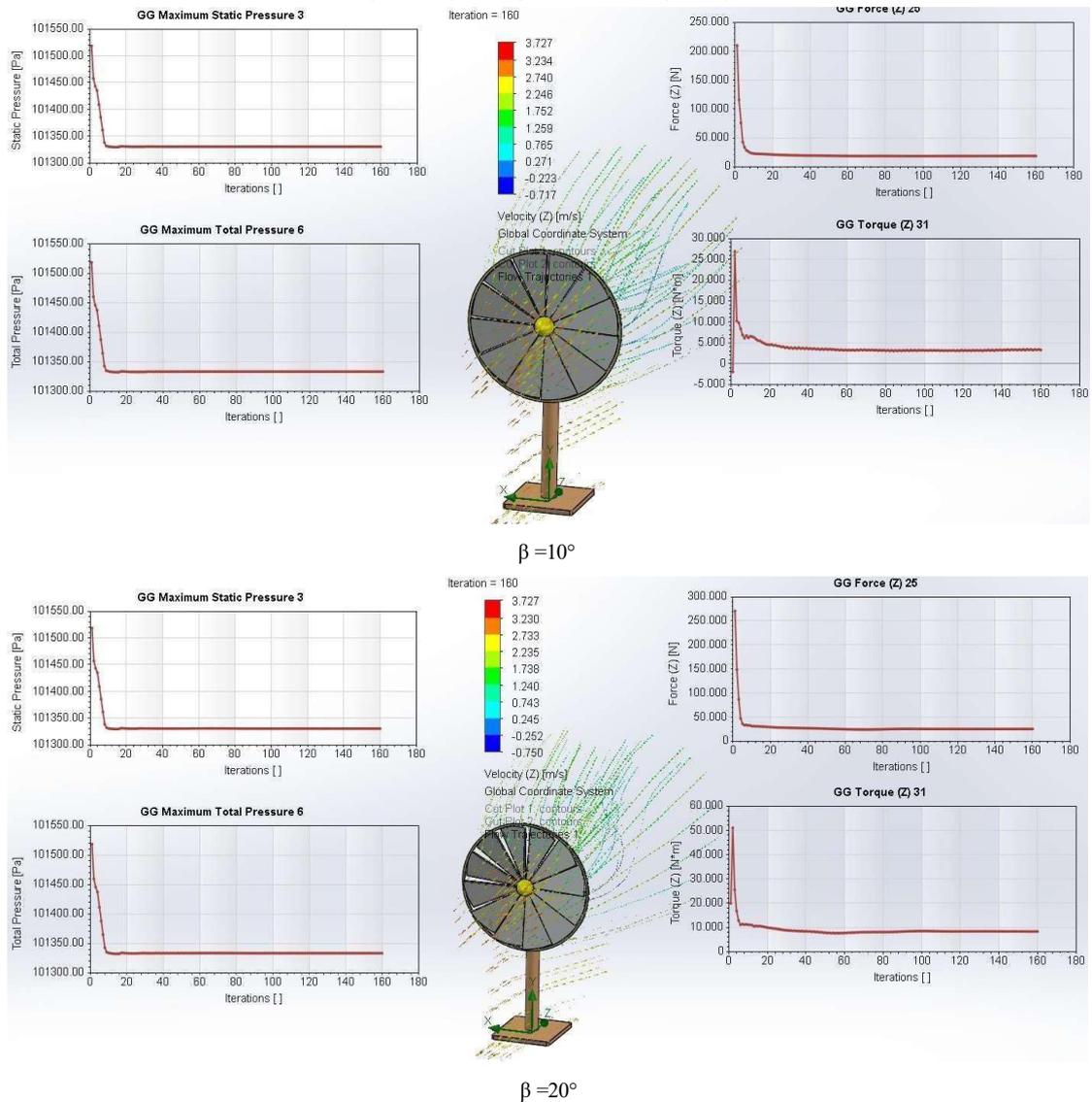


Figura 4.8. Caz “Cut-in” ( $\beta = 10^\circ$ ,  $\beta = 20^\circ$ ), CFD studiu

<b>Interpretare</b>
la $\beta = 20^\circ$ centrul de presiune urcă puțin – flux încă atașat, dar amplitudinea rămâne foarte mică; paletelor plane nu creează depresiuni serioase la 3 m/s.
forța dublă la $\beta = 20^\circ$ confirmă creșterea portanței; valorile sunt totuși modeste → sarcină axială ne-critică.
cuplu de pornire aproape triplu la $\beta = 20^\circ$ – suficient pentru învingerea frecărilor mecanice ( $\approx 3 \text{ N}\cdot\text{m}$ estimate din BEM).

MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII  
UNIVERSITATEA „VALAHIA” din TÂRGOVIȘTE  
IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI  
DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ

- **Nominal (5 m/s,  $\beta=10^\circ$ ):**
  - Cuplu  $\approx 60 \text{ N}\cdot\text{m}$ , tracțiune axială  $\approx 50 \text{ N}$ .
  - Presiuni maxime  $\approx 0,2 \text{ kPa}$  (în siguranță).
  - Putere  $\approx 600 \text{ W}$ , confirmă predicțiile BEM.

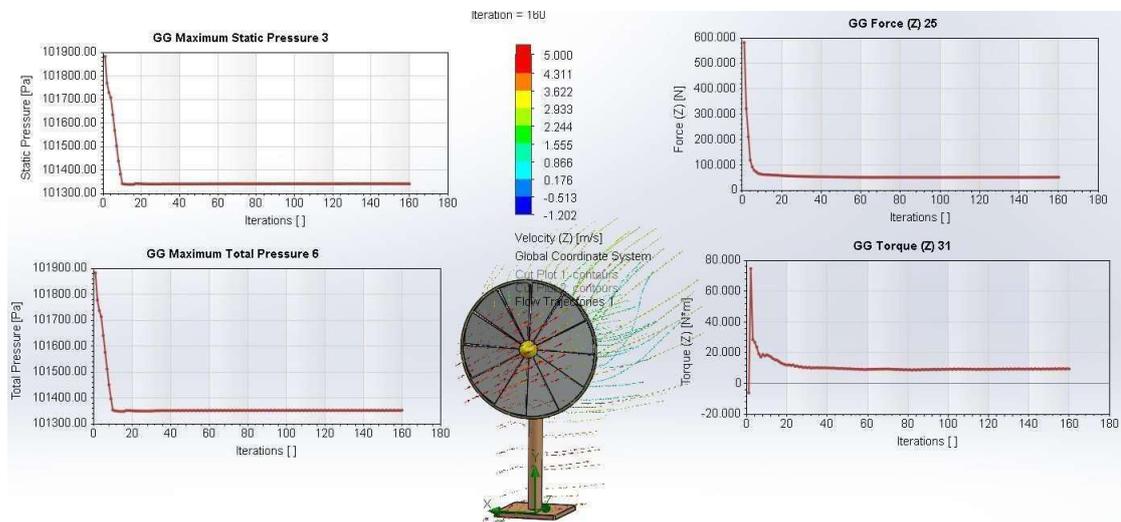


Figura 4.10. Caz “Normal” ( $V = 5 \text{ m/s}$ ,  $\beta = 10^\circ$ ), CFD studiu

**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII**  
**UNIVERSITATEA „VALAHIA” din TÂRGOVIȘTE**  
**IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI**  
**DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ**

- **Vânt mediu (10 m/s,  $\beta=20^\circ$ ):**
  - Cuplu  $\approx 100 \text{ N}\cdot\text{m}$ , tracțiune  $\approx 350 \text{ N}$ .
  - Putere  $\approx 1,2 \text{ kW}$ .
  - Fluxul rămâne atașat, fără stall.

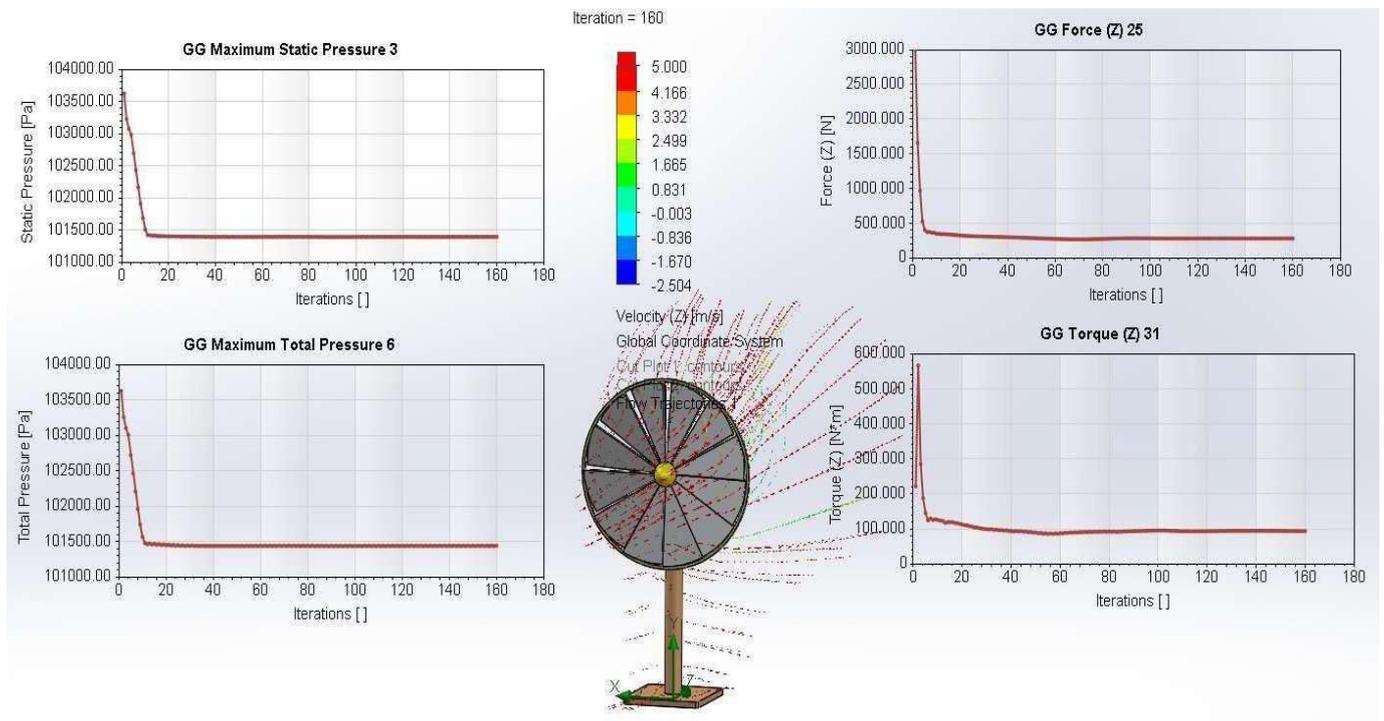


Figura 4.11. Caz “Normal” ( $V = 10 \text{ m/s}$ ,  $\beta = 20^\circ$ ), CFD studiu

<b>Interpretare CFD</b>
tracțiune axială de 7-ori mai mare decât la 5 m/s; rămâne sub capacitatea lagărului axial proiectat la 1 kN, deci siguranță structurală.
cuplu dublu față de nominal (80 N m la 5 m/s); la $\omega \approx 12 \text{ rad s}^{-1}$ rezultă $P \approx 1,2 \text{ kW}$ , confirmând curba $C_p(\lambda, \beta)$ pentru $\lambda \approx 2,4$ .
presiunea locală crește liniar cu $\rho V^2$ ; valoarea rămâne mult sub 1 kPa—lucru anticipat la pale plane.
soluție robustă, mesh adecvat ( $y^+ < 1$ ).
fluxul se menține atașat până la coardă $\rightarrow \beta = 20^\circ$ este încă sub unghiul de stall chiar la $Re \approx 5 \cdot 10^5$ .

**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII  
UNIVERSITATEA „VALAHIA” din TÂRGOVIȘTE  
IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI  
DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ**

- **Extreme (25 m/s):**

- $\beta=80^\circ \rightarrow$  cuplu mare ( $\sim 400 \text{ N}\cdot\text{m}$ )  $\rightarrow$  insuficient pentru protecție.
- $\beta=90^\circ \rightarrow$  cuplu  $\approx 0$ , tracțiune  $< 1 \text{ kN}$   $\rightarrow$  protecție eficientă (rotor „invizibil” aerodinamic).

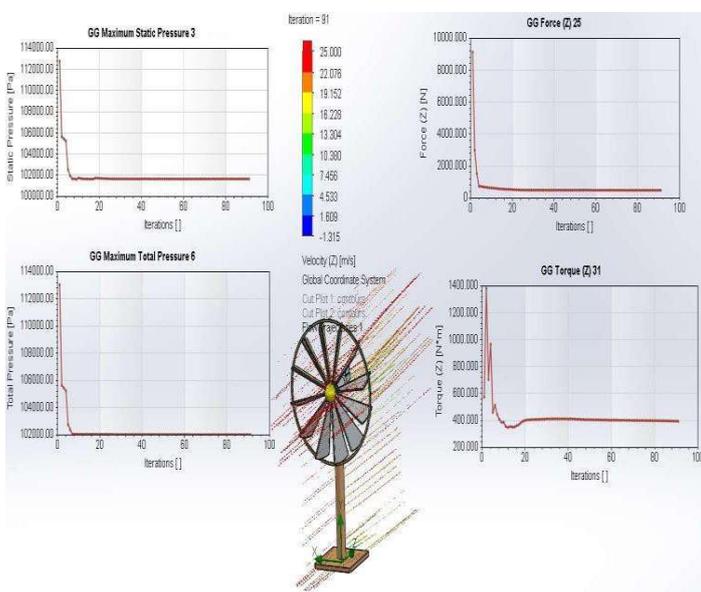


Figura 4.12. Caz “Extreme” ( $V = 25 \text{ m/s}$ ,  $\beta = 80^\circ$ ), CFD studiu

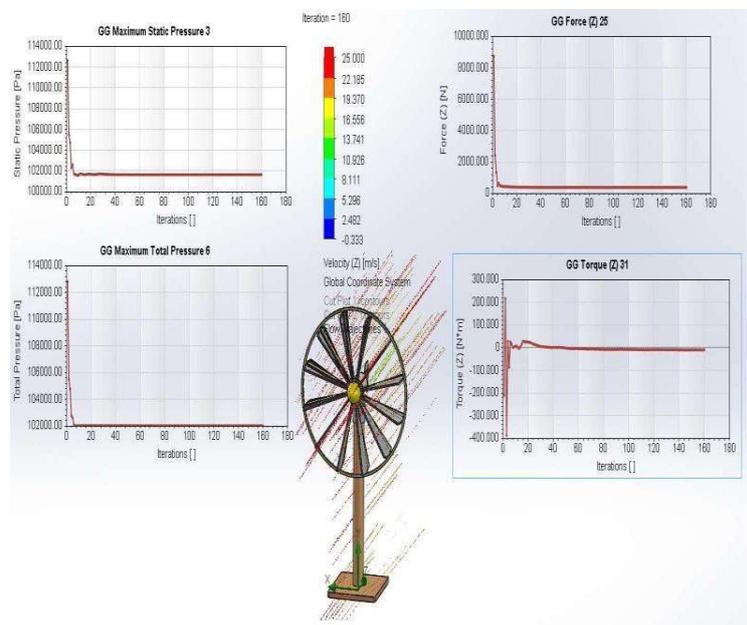


Figura 4.12. Caz “Extreme” ( $V = 25 \text{ m/s}$ ,  $\beta = 90^\circ$ ), CFD studiu

*Concluzii capitolul 4*

1. *Rotorul cu pale plane + inel poate atinge performanțe competitive la Re scăzut ( $C_p \max \approx 0,37$ ).*
2. *Strategia optimă de control al pasului:*
  - $\beta \approx 20^\circ$  pentru pornire,
  - $\beta \approx 10-12^\circ$  pentru nominal,
  - $\beta \approx 90^\circ$  pentru furtună/protecție.
3. *Distribuțiile de sarcini furnizate de BEM/CFD sunt pregătite pentru analiza structurală FEM.*
4. *Inelul periferic reduce momentele la rădăcină cu  $\approx 75\%$  și stabilizează paleta, esențial pentru rezistență și durabilitate.*

## CAPITOLUL V

### ANALIZA STRUCTURALĂ FEM

Acest capitol realizează validarea structurală prin modelare FEM. Sunt analizate regimurile operaționale critice (cut-in, nominal, extrem/feathering), tensiunile, deplasările și stabilitatea structurală. Se confirmă rolul inelului periferic și se formulează recomandări de dimensionare pentru elementele cheie

#### 5.1. Obiectiv

Validarea structurală a rotorului hibrid eolian-PV (D = 3 m, 12 pale plane + inel periferic), folosind sarcinile aerodinamice obținute în Cap. IV (BEM + CFD). Analiza FEM verifică tensiunile, deplasările și factorii de siguranță în regimuri **Cut-in (3 m/s)**, **Nominal (5 m/s)** și **Extreme/feathering (25 m/s)**, conform IEC 61400-2.

#### 5.2. Scenariul 1 – Paleta individuală

- **Fixed/Fixed (fusuri blocate):**  $\sigma \approx 10$  MPa, deplasare  $\approx 0,07$  mm, FOS  $\approx 3 \rightarrow$  structură foarte rigidă.
- **Fixed/Hinge:**  $\sigma \approx 11$  MPa, deplasare  $\approx 0,67$  mm  $\rightarrow$  mai mare, dar sigur.
- **Hinge/Hinge:**  $\sigma \approx 392$  MPa, deplasare  $\approx 17$  mm, FOS  $< 1 \rightarrow$  cedare plastică.

**Concluzie:** paleta este rezistentă, dar mecanismul de pas trebuie să asigure blocaj torsional; altfel fusurile cedează.

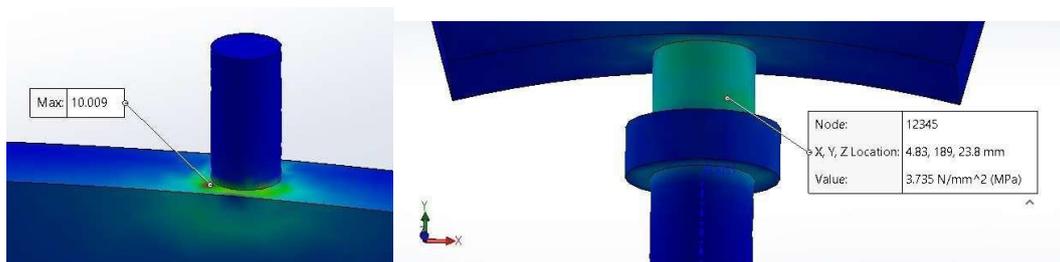
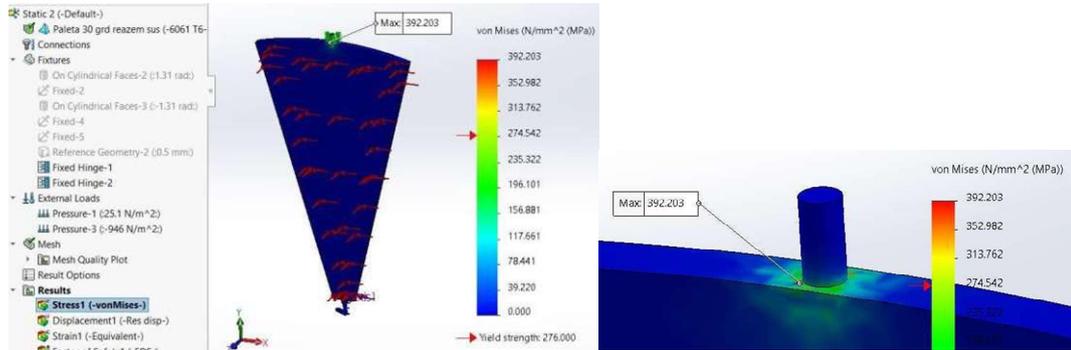
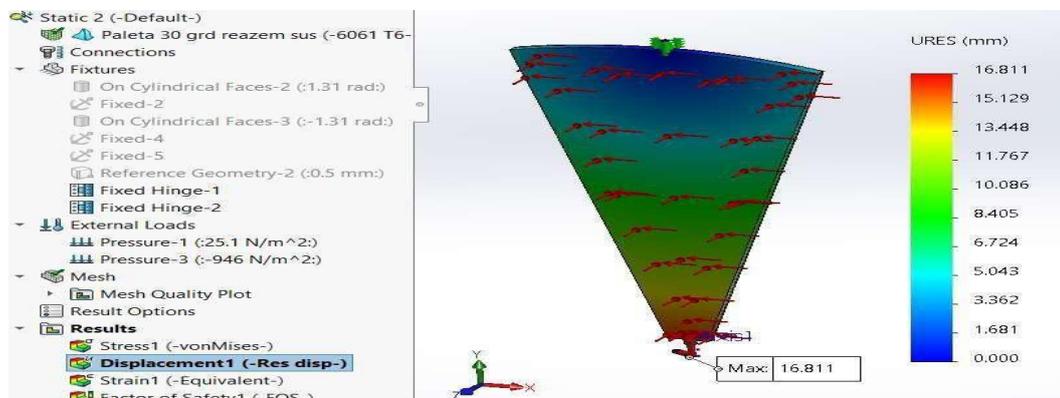


Figura 5.2. Scenariul nr. 1, Fixed/Fixed

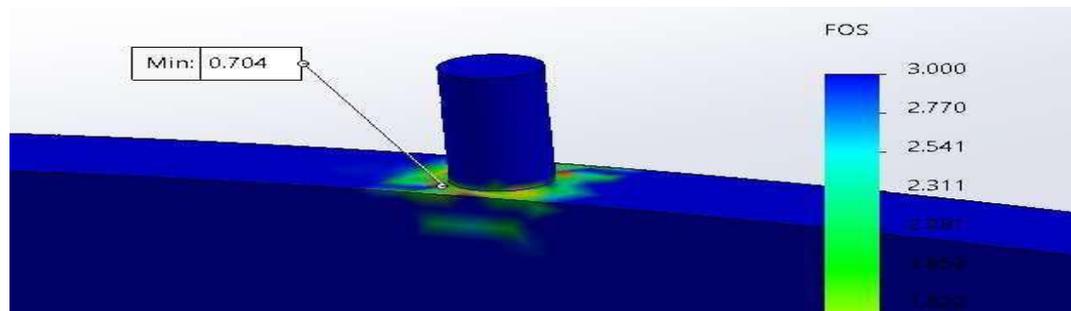
**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII**  
**UNIVERSITATEA „VALAHIA” din TÂRGOVIȘTE**  
**IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI**  
**DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ**



a.



b.



c.

Figura 5.3. Scenariul nr. 1, Hinge/ Hinge

**5.3. Scenariul 2 – Rotor complet (palete + butuc + inel)**

- **Cut-in ( $\beta=0-20^\circ$ ):**
  - Tensiuni max. 27–50 MPa, deplasări 1–3 mm → siguranță mare.
  - FOS(factorul de siguranta) > 5 → fără probleme structurale.

MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII  
UNIVERSITATEA „VALAHIA” din TÂRGOVIȘTE  
IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI  
DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ

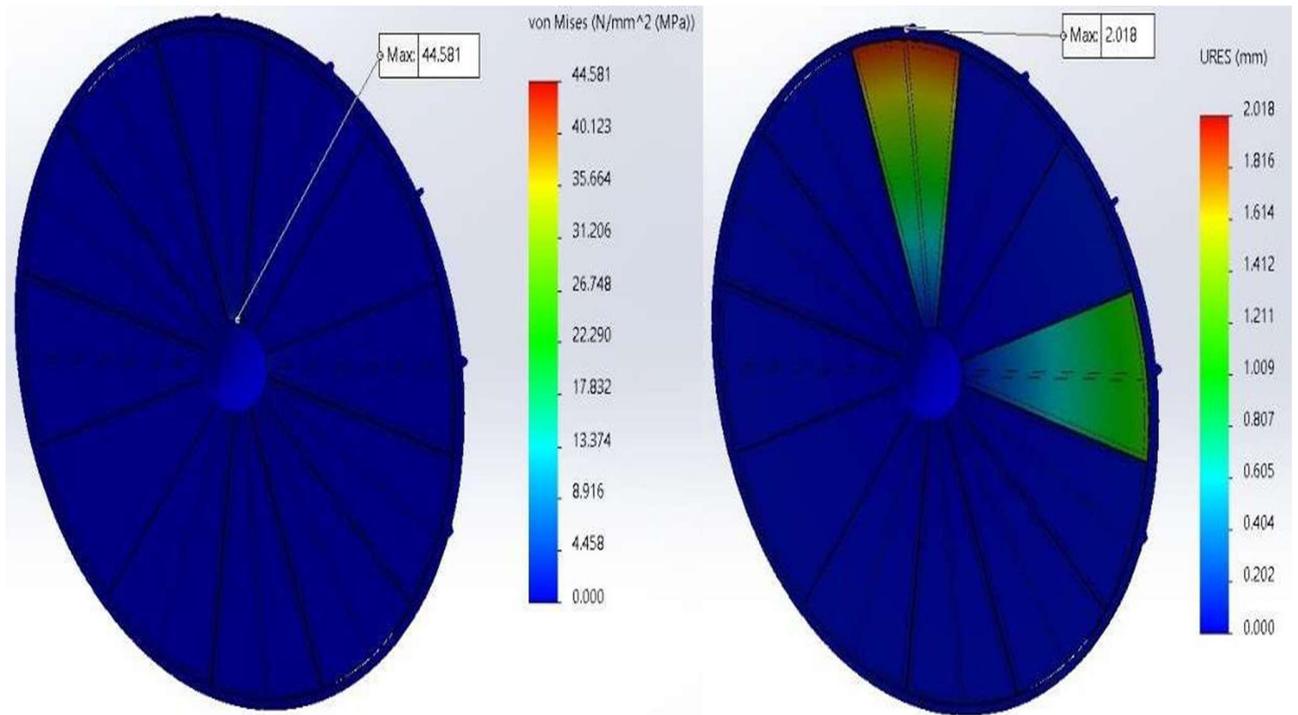
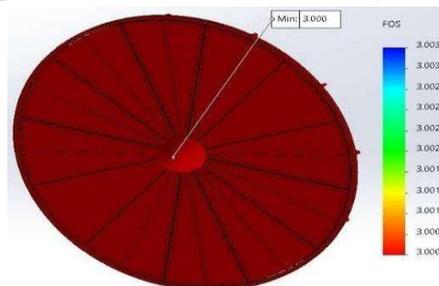


Figura 5.4. Caz “plan” ( $\beta = 0^\circ$ )

- **Nominal ( $\beta=10^\circ$ ,  $V=5$  m/s):**
  - În configurația inițială:  $\sigma \approx 117$  MPa, deplasare  $\approx 6,8$  mm, FOS  $\approx 2,3 \rightarrow$  funcționează, dar aproape de limită.
  - După redimensionare (fus  $\text{Ø}30$  mm, inel  $50 \times 50$  mm, spițe  $\text{Ø}40$  mm):  $\sigma$  scade la  $\approx 9\text{--}10$  MPa, deplasare  $\approx 1,2$  mm, FOS  $\approx 3 \rightarrow$  siguranță excelentă.



**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII**  
**UNIVERSITATEA „VALAHIA” din TÂRGOVIȘTE**  
**IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI**  
**DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ**

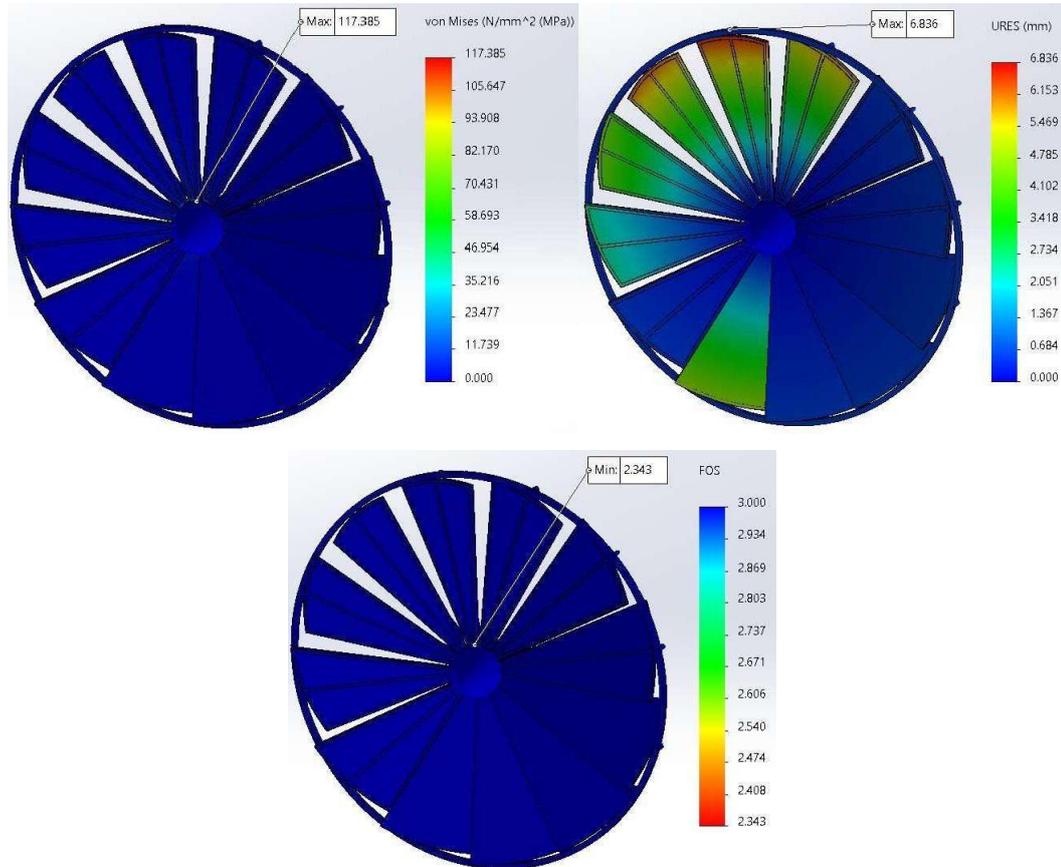


Figura 5.6. Caz “Nominal” ( $\beta = 10^\circ$ ,  $V = 5 \text{ m/s}$ )

- **Extreme ( $V=25 \text{ m/s}$ ):**
  - $\beta=10^\circ$  (rotor expus):  $\sigma \approx 44 \text{ MPa}$ , deplasare  $\approx 4 \text{ mm}$ ,  $\text{FOS} > 3$ .
  - $\beta=80^\circ$  (feathering):  $\sigma \approx 66 \text{ MPa}$ , deplasare  $\approx 3 \text{ mm}$ ,  $\text{FOS} > 3 \rightarrow$  rotorul frânează eficient, rămâne elastic.



MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII  
UNIVERSITATEA „VALAHIA” din TÂRGOVIȘTE  
IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI  
DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ

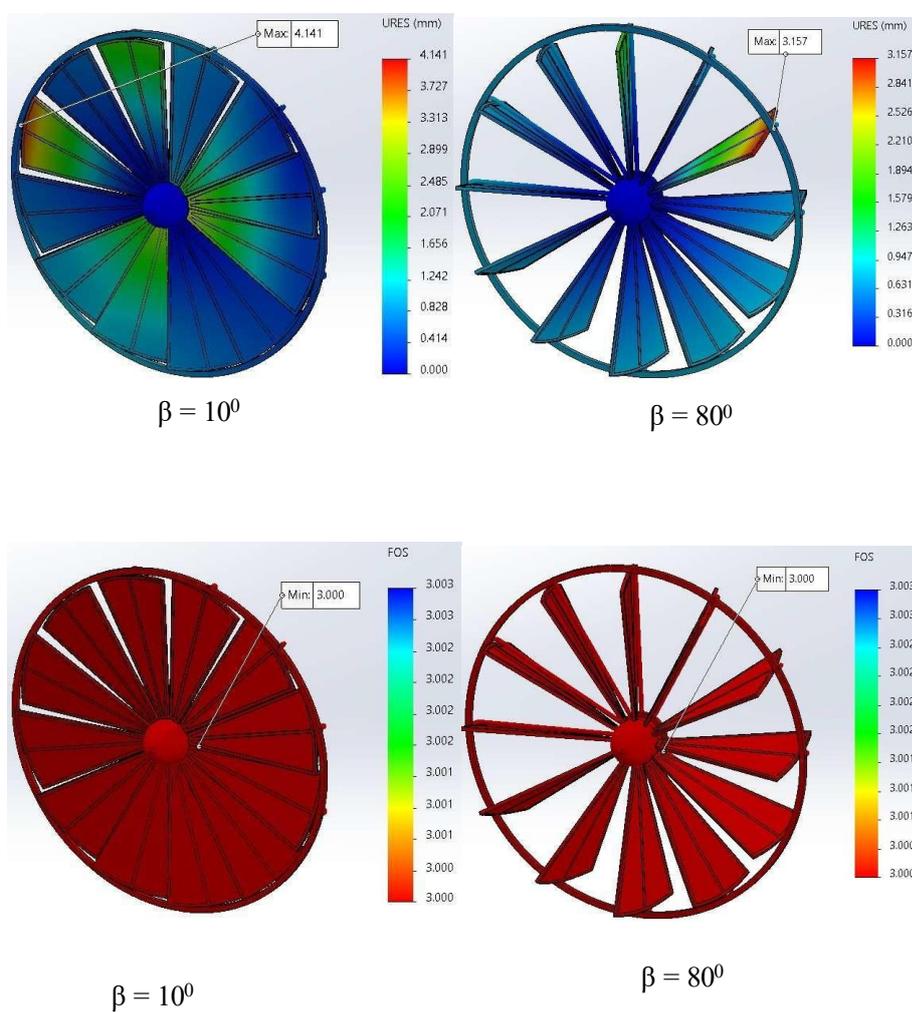


Figura 5.8. Caz “Extreme” ( $\beta = 20^\circ$ ,  $\beta = 80^\circ$ ), redimensionare

### *Concluzii generale capitolul 5*

- 1. Validare structurală: designul cu pale plane + inel periferic este robust pentru toate regimurile (Cut-in, Nominal, Extreme).*
- 2. Rolul inelului: reduce momentele la rădăcină și deflecțiile cu 70–75 %, prevenind flambajul.*
- 3. Mecanismul de pas: trebuie să asigure blocaj torsional ferm; varianta Hinge/Hinge este inacceptabilă.*
- 4. Redimensionarea fusurilor și a inelului: a redus de peste  $10\times$  tensiunile maxime și a coborât deplasările sub 1 mm la nominal, cu  $FOS \geq 3$ .*
- 5. Masa suplimentară: crește inerția ( $\approx 1,8\times$ ), dar nu afectează pornirea și ajută la amortizarea șocurilor.*
- 6. Compatibilitate: toate valorile respectă cerințele IEC 61400-2 ( $\sigma/Rp0,2$ ,  $Utip/R$ ,  $FOS$ ).*
- 7. Recomandări: ranforsare la conexiunea pală–inel, verificare de oboseală, testare pe banc și în câmp pentru calibrare.*

## CAPITOLUL VI

### MECANISME DE ACȚIONARE ȘI INTEGRAREA MECATRONICĂ

Capitolul detaliază integrarea mecatronică, cu mecanismele de yaw, tilt, pas colectiv și frânare. Soluțiile de acționare sunt proiectate pe baza distribuțiilor de sarcină obținute în capitolele 4 și 5, iar sistemul este pregătit pentru integrarea trenului de putere și a electronicii de conversie, fiind încadrată de cerințele IEC 61400-2 pentru microturbine și de bune practici industriale pentru turbine mici

#### 1. *Cerințe funcționale și interfețe*

Funcționalitatea mecanismelor de acționare derivă direct din regimurile aerodinamice: pas mare pentru pornire, pas nominal pentru randament maxim și pas extrem pentru protecție. Din aceste scenarii rezultă cerințe de cursă, cuplu, timp de răspuns și robustețe, completate de standardele internaționale.

O matrice de interfețe asigură coerența între subsisteme:

- Mecanic: cursele și momentele actuatorilor, sarcinile pe lagăre și toleranțele structurale.
- Putere: traseele prin slip-ring, circuite de frânare dinamică și compatibilitatea cu generatoarele.
- Control și senzori: encodere absolute pentru yaw/tilt/pas, senzori de turație și temperatură, interblocări logice pentru opriri sigure.
- Conformare: rezistență la mediu (IP65), opriri de urgență și verificări funcționale conform IEC și ghidurilor SWCC.

#### 2. *Dimensionarea catargului*

Catargul a fost dimensionat pentru cazurile de încărcare critice:

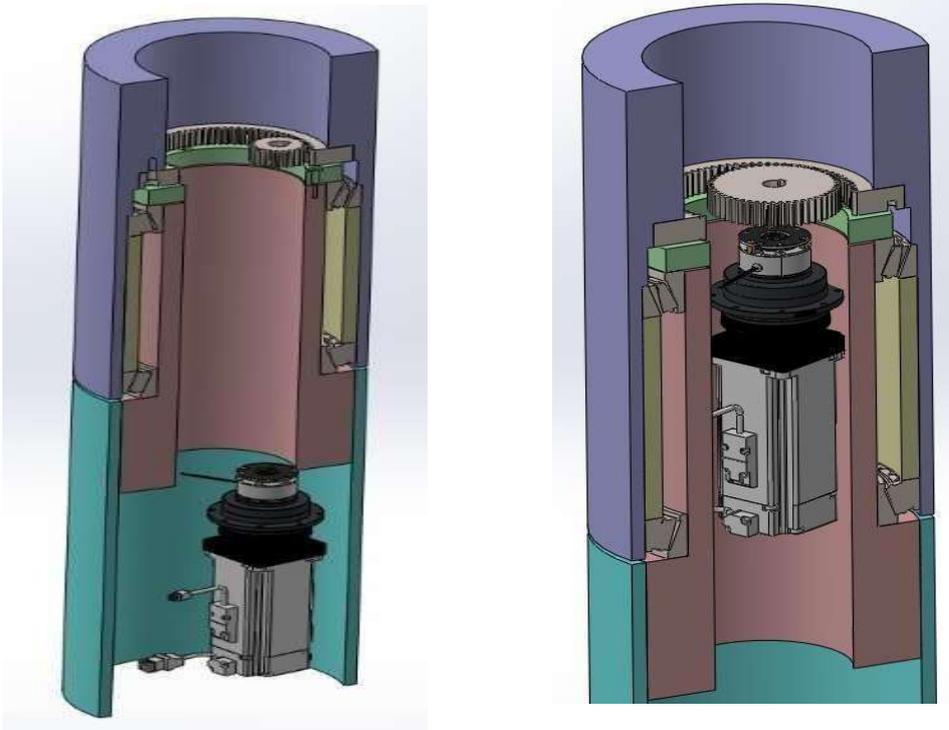
- regim extrem cu feathering (forțe axiale moderate, stabilizate),
- disc PV expus la vânt (caz defavorabil, cu forțe axiale de ordinul kN).

Analiza arată că acest al doilea scenariu devine guvernant pentru rulmentul principal, yaw și fundație. Se recomandă tuburi standardizate din oțel S355 (Ø219–Ø273 mm, grosimi 8–10 mm), care oferă rezistență, rigiditate și masă acceptabile.

### 6.3. Lagărul de rotație azimutală (yaw)

Lagărul de yaw a fost proiectat ca un ansamblu tip tub-în-tub, cu pivot fix pe catarg și carcasă rotativă pe nacelă. Două rulmenți cu role conice, montați „spate în spate”, preiau sarcini axiale, radiale și momente de încovoiere. Prestrângerea elimină jocurile și stabilizează rigiditatea ansamblului.

Pentru acționare s-a ales o transmisie cu coroană dințată interioară și pinion, antrenată de un servomotor prin reductor planetar și ambreiaj electromagnetic. Soluția permite mod free-yaw pasiv, respectiv acționare controlată pentru modul PV.



a) Pinion  $z_1 = 25$ ; b) Pinion  $z_1 = 50$  dinți

Figura 6.1. Secțiune prin lagărul de rotație azimutală (yaw)

#### 6.4. Lagărul principal al rotorului

Pentru rotorul de 3 m s-a adoptat o pereche de rulmenți conici (32948), montaj „spate în spate”. Aceștia suportă simultan sarcini axiale, radiale și momente de basculare, cu durată de viață teoretică foarte mare. Testele au arătat că, pentru rigiditate, distanța dintre rulmenți trebuie să fie de 300–350 mm și să se asigure prestrângere controlată pentru a preveni descărcarea rulmentului inferior.

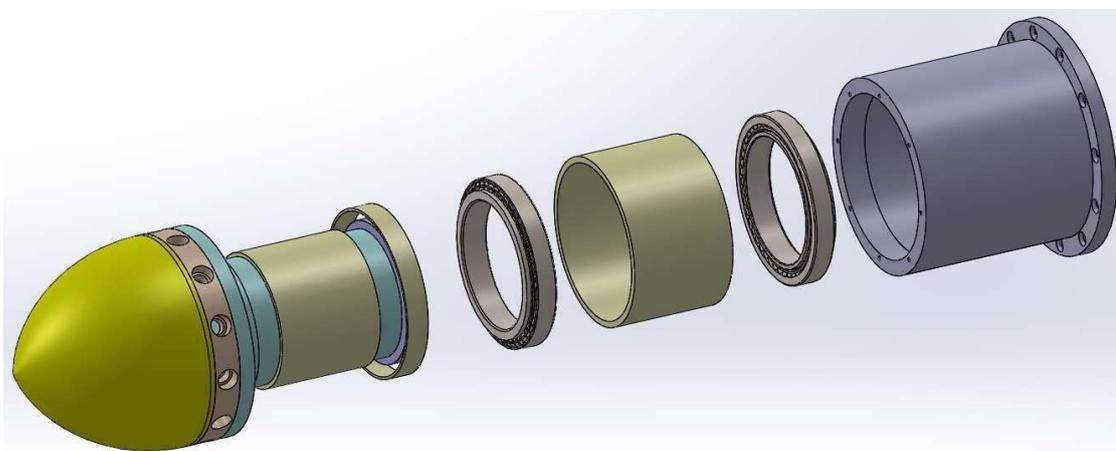


Figura 6.7. Alegerea rulmenților pentru lagărul rotorului

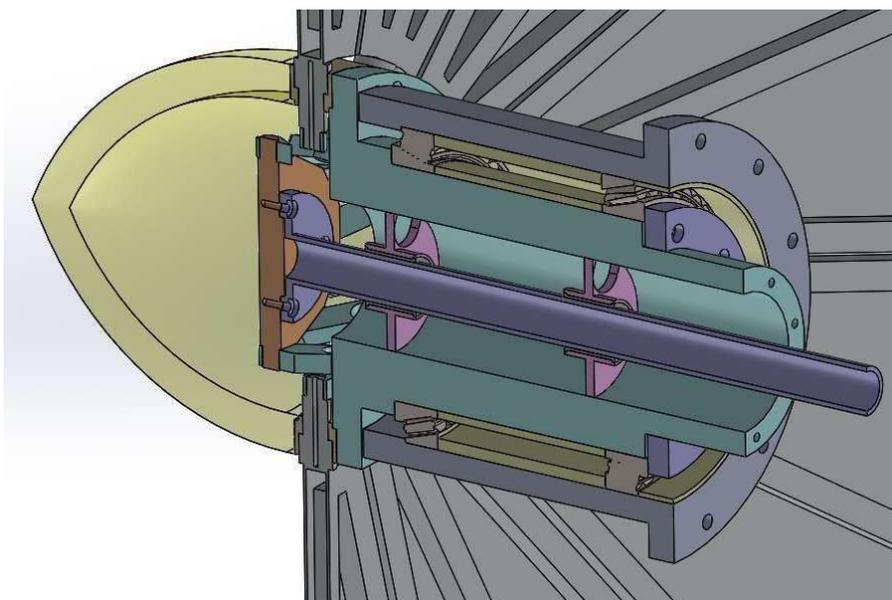


Figura 6.10 – Rezemarea axială a tijei

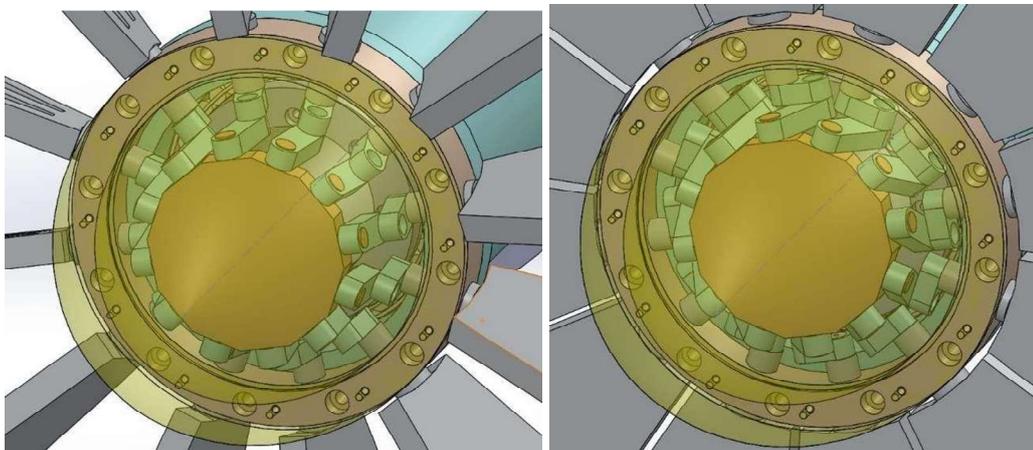
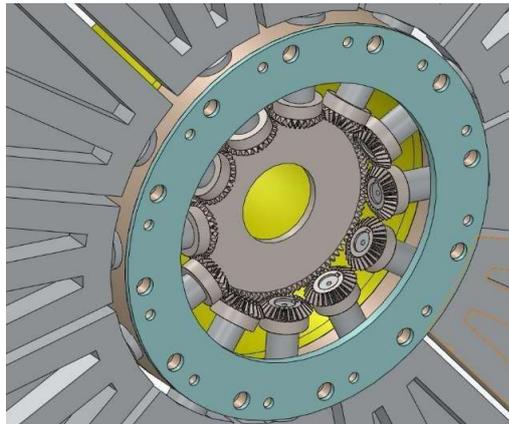
### 6.5. Mecanismul de pas colectiv

Pentru rotirea simultană a celor 12 palete au fost analizate două variante:

- Angrenaj conic – rigid, dar complicat de implementat în regim rotativ.
- Placă poligonală cu biele – simplă, compactă, ușor de acționat cu un actuator liniar.

A doua variantă a fost adoptată. Placa poligonală transmite mișcarea axială a tijei către cele 12 palete prin biele, cu joc minim și control precis al unghiului de pas. Cerințele de comutare rapidă (sub 2 s pentru feathering) și de redundanță (poziție sigură la pierderea tensiunii) sunt satisfăcute.

Figura 6.8 - Angrenaj cu roți dinate conice



### 6.6. Mecanismul de înclinare (tilt)

Tilt-ul asigură orientarea rotorului în regim PV și poziționarea de siguranță la furtună. Axa trece prin centrul de greutate al ansamblului, reducând sarcinile gravitaționale pe lagăre și reductor.

Acționarea se face printr-un reductor armonic coaxial, cu servomotor și frână fail-safe. Rezemarea se face cu rulmenți conici montați „spate în spate” în urechi de trunnion, cu prestrângere mică și etanșări IP65+. Sistemul permite  $\pm 60^\circ$  de înclinare, cu opritoare mecanice și senzor absolut de poziție.

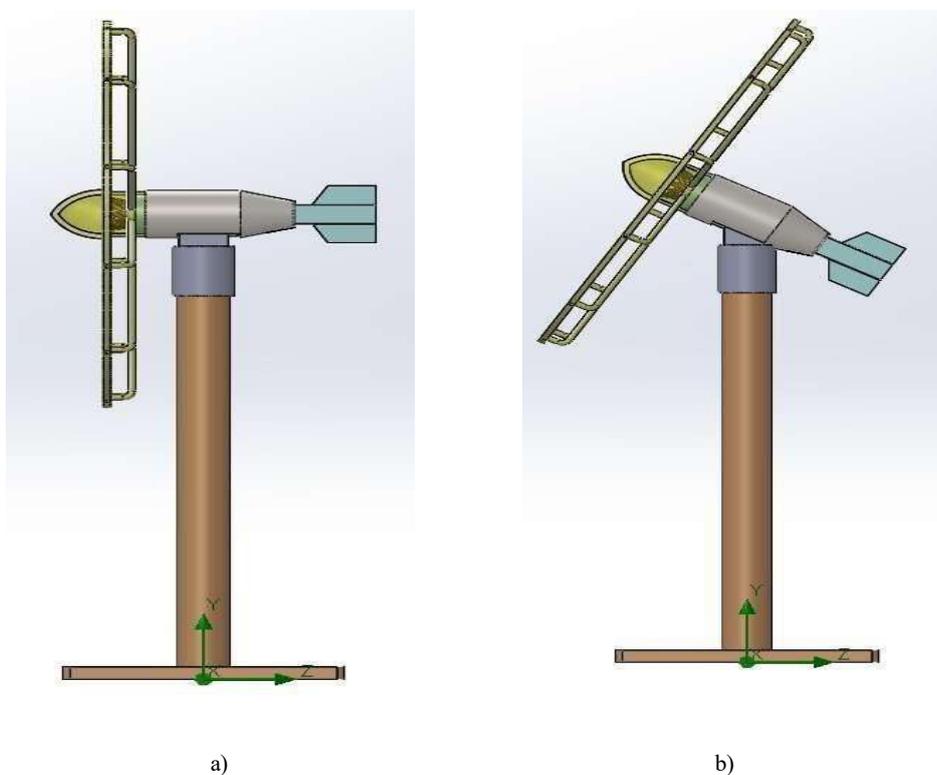


Figura 6.11 – Înclinarea planului în modul de funcționare PV (tilt)

a)  $0^\circ$

b)  $30^\circ$  – poziție intermediară (max.  $60^\circ$ )

MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII  
 UNIVERSITATEA „VALAHIA” din TÂRGOVIȘTE  
 IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI  
 DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ

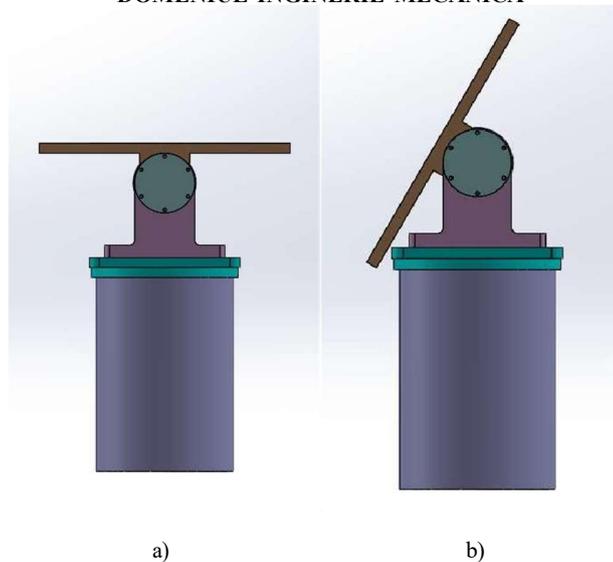


Figura 6.12 – Înclinarea plăcii suport a nacei în modul de funcționare PV (tilt)  
 a)  $0^{\circ}$  b)  $60^{\circ}$  – poziție de capăt

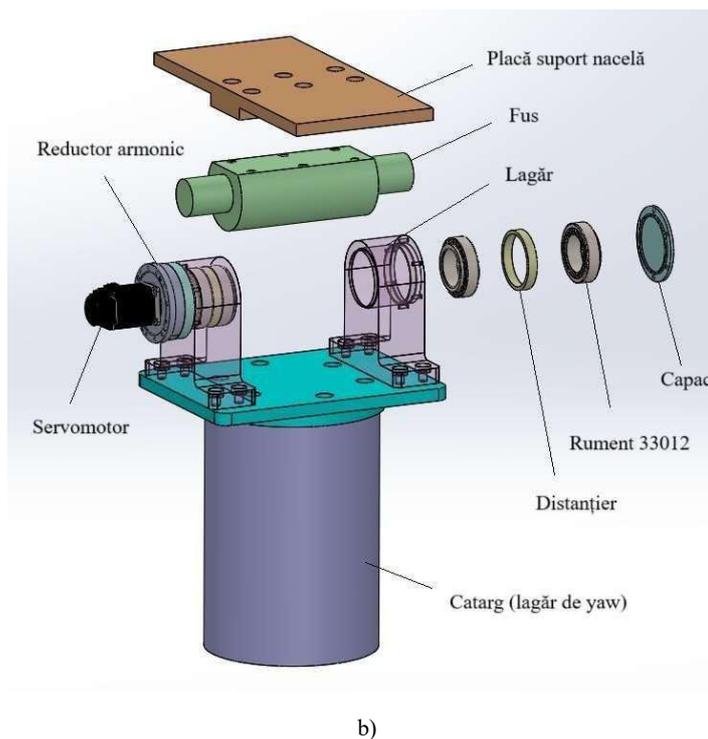


Figura 6.13 – Componenta mecanismului de înclinare (tilt)  
 a) mecanismul de înclinare b) componenta mecanismului de înclinare

:

**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII**  
**UNIVERSITATEA „VALAHIA” din TÂRGOVIȘTE**  
**IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI**  
**DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ**

*Concluzii capitolul 6*

*Capitolul a definit și validat patru mecanisme critice:*

- *Yaw: lagăr cu rulmenți conici DB, transmisie cu coroană și pinion, servo cu reductor planetar și ambreiaj electromagnetic.*
- *Lagărul principal: pereche rulmenți conici DB, dimensionați pentru sarcini axiale și momente, cu durată de viață teoretică foarte mare.*
- *Pas colectiv: mecanism cu placă poligonală și biele, cu acționare axială simplă, robustă și compactă.*
- *Tilt: reductor armonic coaxial, lagăre conice DB, arhitectură compactă și sigură pentru toate regimurile.*

*Integrarea mecatronică include senzori absoluți, etanșări și puncte de ungere, cablare prin slip-ring și redundanță în frânare. Soluțiile propuse sunt fezabile și scalabile, conforme cu cerințele de siguranță și pregătite pentru validarea pe prototip.*

## CONCLUZII GENERALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

**Capitolul I și Capitolul II** stabilesc cadrul teoretic și justificarea tezei. Primul demonstrează relevanța hibridizării eolian-PV pentru flexibilitatea rețelei și reducerea costurilor pe ciclul de viață. Al doilea arată importanța calității datelor resursă (vânt și soare), a metodelor de măsurare și procesare statistică, fundamentând scenariile ulterioare. Împreună, ele conturează fluxul logic „date

→ scenarii → optimizare → validare”, care susține modelarea și proiectarea rotorului.

**Capitolul III** confirmă fezabilitatea mecanică a rotorului cu 12 pale plane și inel periferic de rigidizare. Avantajele principale: reducerea momentelor la rădăcină, integrarea robustă a pasului colectiv, rutarea cablurilor PV prin arbore gol și compatibilitatea cu standardele IEC pentru microturbine. Sunt identificate și riscurile critice (slip-ring, oboseală adezivi PV, joc mecanic), împreună cu contramăsuri practice.

**Capitolul IV** furnizează validarea aerodinamică:

- corelare BEM-CFD cu erori sub 5% la sarcini globale;
- confirmarea strategiei de control în trepte;

**Capitolul V** validează conceptul structural. În configurația redimensionată (fusuri Ø30 mm, inel 50×50 mm, spițe Ø40 mm), rotorul respectă criteriile IEC 61400-2 iar rezultatele confirmă robustețea structurală și evidențiază rolul critic al mecanismului de pas și al rigidizării prin inel

**Capitolul VI** transpune cerințele aerodinamice și structurale în mecanisme concrete de acționare:

- Lagăr de rotație azimutala (yaw) cu rulmenți conici spate în spate, coroană interioară și pinion servo- motorizat;
- lagăr principal dimensionat pentru momente mari și arbore gol;
- mecanism de pas colectiv cu placă poligonală și biele, simplu și robust;
- tilt cu reductor armonic și lagăre conice. Integrarea mecatronică (senzori, frâne redundante, cabluri, IP65) asigură siguranța și mentenanța facilă.

**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII**  
**UNIVERSITATEA „VALAHIA” din TÂRGOVIȘTE**  
**IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI**  
**DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ**

Contribuții proprii

Lucrarea aduce o serie de contribuții originale:

1. Definirea traseelor de sarcini și demonstrarea rolului inelului periferic în reducerea momentelor la rădăcina palelor și a deflecțiilor.
2. Proiectarea și argumentarea unui mecanism de pas colectiv pentru 12 pale, compatibil cu constrângerile de masă și spațiu.
3. Stabilirea cazurilor de proiectare (cut-in, nominal, extrem/feathering) și a parametrilor mecanici cheie (raport TSR - tip speed ratio, unghi de pas, criteriile de oboseală).
4. Integrarea cerințelor pentru yaw și tilt cu soluții de colectare electrică sigure și fiabile.

Aceste contribuții se înscriu în literatura de specialitate prin propunerea unei arhitecturi hibride inovatoare și validarea acesteia prin metode numerice și analitice.

Obiectivul central

Scopul general al cercetării este conceperea unui schelet mecanic coerent pentru un rotor hibrid eolian–PV, capabil să fie dimensionat și fabricat cu riscuri controlate privind rezistența, vibrațiile și mentenanța. Acest rotor constituie baza pentru dezvoltări ulterioare privind performanța energetică, integrarea în rețea și optimizarea sistemelor hibride.

Prin combinarea resurselor solare și eoliene într-un singur dispozitiv, lucrarea demonstrează potențialul unor soluții inovatoare care pot contribui la accelerarea tranziției energetice și la consolidarea infrastructurilor verzi ale viitorului.

**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII**  
**UNIVERSITATEA „VALAHIA” din TÂRGOVIȘTE**  
**IOSUD – ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI**  
**DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ**

Direcții viitoare de cercetare

- Validare experimentală pe prototip – testare rotor 3 m cu instrumentație completa
- Aerodinamică avansată și zgomot – simulări URANS/LES pentru rafale și yaw, corelare cu teste; modelare și reducere zgomot.
- Optimizare multi-obiectiv – design mecanic-aero-PV, variabile de geometrie și control.
- Fiabilitate structurală și a laminatelor PV – teste de oboseală pe cupon rotativ, verificare adezivi și stratificări, monitorizare condițională.
- Control și electronică – MPPT rapid (<10 ms), coordonare frână-feather-dump load, compatibilitate EMC.
- Mecanisme – rafinare yaw, pas colectiv cu actuator liniar, tilt cu reductor armonic; validări de uzură și backlash.
- Packaging și nacelă – CAD integrat cu trasee cabluri, acces mentenanță, protecții anticorozive și la trăsnet.
- Certificare – plan de încercări conform IEC 61400-2 și standarde PV, pregătirea dosarului de type-certification.
- Analiză economică și ecologică a prototipului, scenarii cu și fără baterii.
- Scalare și pilotare – versiuni 2–5 kW, instalare pe site-uri diverse și colectarea datelor pentru o versiune pre-serie.

## Referințe bibliografice

- 1 IPCC. *AR6 Synthesis Report: Summary for Policymakers*. 2023.
- 2 IEA. *Renewables 2024. Market Report*. 2024.
- 3 REN21. *Renewables 2025 Global Status Report*. 2025.
- 4 IRENA. *World Energy Transitions Outlook 2024*. 2024.
- 5 BloombergNEF. *Battery Price Survey 2024*. 2024.
- 7 EUR-Lex. Regulation (EU) 2021/1119 – *European Climate Law*.
- 8 European Commission. *The European Green Deal – Overview*.
- 9 IEA. *Energy and AI*. 2025.
- 10 UNFCCC. *Paris Agreement*. 2015.
- 11 European Environment Agency (EEA). *Impacts of renewable energy use on decarbonisation and air pollutant emissions*.
- 12 WHO. *Ambient air quality and health*.
- 13 ENTSO-E / EU Commission Reg. 2016/631 (RfG) & EN 50549.
- 14 IEEE Std 1547-2018. *Standard for Interconnection of DER*.
- 15 IEC 62116. *Islanding prevention test procedure*.
- 16 IEC 61000 (serie). *Electromagnetic compatibility*.
- 17 European Commission. *Grids, the Missing Link – EU Action Plan for Grids*. 2023.
- 18 ENTSO-E. *Network Code Requirements for Generators (RfG)*.
- 19 Fraunhofer ISE. *Photovoltaics Report*. 2025.
- 20 Global Market Insights. *Small Wind Turbine Market Outlook 2025–2034*. 2025.
- 21 U.S. DOE. *Distributed Wind Market Report: 2023 Edition*. 2023
- 22 Small Wind Certification Council (SWCC). *Standards—Small Wind Turbines*. 2025.
- 22 Soleolico Green Power SL. *Soleolico Dossier*. 2023.
- 24 Martínez-Turiño, S.; Míguez, J. *Fast-MPPT Algorithms under Rapid Irradiance Change*. *Electronics*, 2023.
- 25 Sopranzetti, F.; Gosselin, R. *BEM–RANS Coupled Assessment of Added Mass on PV- Coated Rotors*. *Wind Energy*, 2023
- 26 Johnson, G.L. *Wind Energy Systems*. 2nd ed. Prentice Hall, 2023.
- 27 Chrifi-Alaoui, L. et al. *Overview of Photovoltaic and Wind Hybrid Systems*. *Energies*, 2023.
- 28 Giedraityte, A. et al. *Hybrid Renewable Energy Systems – A Review*. *Appl. Sci.*, 2025.
- 29 Rosato, A. et al. *Commercial Small-Scale Wind Turbines: A Review*. *Energies*, 2024.
- 30 IEC 61400-2:2019. *Design Requirements for Small Wind Turbines*.
- 31 Hansen, M.O.L. *Aerodynamics of Wind Turbines*. 3rd ed. Routledge, 2015.
- 32 Tchakoua, P. et al. *Wind Turbine Condition Monitoring: Review*. *Energies*, 2014.
- 33 NREL. *Mapping Aerodynamic Loads to Structural Models: A Guide for Small Wind Turbine*



MINISTRY OF EDUCATION AND RESEARCH  
"VALAHIA" UNIVERSITY from TÂRGOVISTE  
IOSUD - DOCTORAL SCHOOL OF ENGINEERING SCIENCES  
MECHANICAL ENGINEERING FIELD

# **DOCTORAL THESIS**

**-SUMMARY-**

**WIND-PHOTOVOLTAIC HYBRID ROTOR WITH  
PIVOT FLAT AND RING PANELS  
PERIPHERAL: BEM/CFD MODELING, ANALYSIS  
STRUCTURAL AND INTEGRATION  
MECHATRONICS**

**DOCTORAL  
SUPERVISOR,  
Prof. Viviana FILIP**

**DOCTORAL STUDENT,  
George-Daniel CHIRITA**

**Targoviste  
2026**

## Keywords - general list

- renewable energy • wind-photovoltaic hybrid systems (wind-PV) • wind- photovoltaic hybrid rotor • wind microturbines • small wind turbines (SWT) • pivoting flat blades • adaptive blades • collective blade pitch • pitch control
- peripheral stiffening ring • moment reduction at the blade root • simultaneous wind-solar cogeneration • integration of photovoltaic cells on blades • rotating photovoltaic cells • aerodynamic performance • power coefficient  $C_p$  • specific speed ratio (TSR,  $\gamma$ ) • low Reynolds regimes • cut-in • aerodynamic protection (feathering)

## Keywords - Modeling, simulation and numerical analysis

- Blade Element Momentum (BEM) method • CFD (Computational Fluid Dynamics) simulations • BEM-CFD correlation • aerodynamic load distributions • FEM structural analysis
- finite element method • structural stresses and displacements • safety factors (FOS) • structural stability • extreme load behavior • IEC 61400-2 design criteria

## **Keywords - Mechatronics, mechanisms and drives**

- mechatronic integration •  
drive mechanisms • collective  
pitch mechanism with connecting rods • azimuthal orientation mechanism (yaw) • tilt mechanism • main rotor bearing • back-to-back  
tapered roller bearings • aerodynamic and electrical braking • functional safety • mechanical reliability • structural fatigue
- mechanical tolerances

## **Keywords - Energy systems and grid integration**

- hybrid energy systems • wind- solar complementarity • off-grid and grid-tied systems • energy microgrids • energy storage
- LFP / redox-flow /  
hydrogen batteries • energy management (EMS) • smart inverters • fast MPPT control • grid integration • energy curtailment and  
optimization • capacity factor • energy reliability

## **Keywords - Optimization, sustainability and advanced directions**

- multi-objective optimization •  
integrated aero-structural-electrical design • digital  
twins • predictive  
maintenance • sustainability  
and circular economy • carbon footprint reduction • energy transition • green energy infrastructures

The thesis analyzes and proposes an innovative hybrid wind-photovoltaic rotor architecture, intended for low- power applications, which integrates 12 pivoting flat blades covered with PV cells and stiffened by a peripheral ring. The concept allows for the simultaneous cogeneration of wind and solar energy on the same active surface, using a single foundation and a common energy chain, with benefits in terms of footprint, reliability and capacity factor.

The research is structured on a coherent data y modeling y validation y integration flow, starting from the analysis of wind and solar resources and wind-solar complementarity, continuing with BEM/CFD aerodynamic modeling, FEM structural analysis and culminating with the mechatronic integration of collective pitch, yaw and tilt me The results demonstrate the aerodynamic and structural feasibility of the rotor, the critical role of the peripheral ring in reducing the moments at the blade root, and the effectiveness of the control strategies for starting, nominal operation, and extreme wind protection regimes.

The paper makes original contributions to the mechanical design and functional integration of a hybrid wind-PV rotor, validated according to IEC requirements for microturbines, and highlights the potential of this solution to support resilient and sustainable hybrid energy systems in the context of the energy transition.

**Content:**

---

**CHAPTER I**

---

**CURRENT STATUS OF RESEARCH IN THE FIELD OF WIND HYBRID SYSTEMS- PV**

- \*The importance and evolution of renewable energy sources
- \*Types of hybrid systems (on/off grid) and areas of applicability
- \*Challenges and trends in wind systems research
- \*Current trends and research directions
- \*Conclusions of the current state of development of hybrid wind-PV systems

---

**CHAPTER II**

---

**ANALYSIS OF WIND AND SOLAR RESOURCES FOR A HYBRID SYSTEM AELIAN-PV**

- \* Principles and role
- \* Wind resource characterization
- \* Methods and tools for assessing wind potential
- \* Solar resource characterization
- \* Methods and tools for assessing solar potential and wind-solar complementarity
  
- \* Operating scenarios - sizing and conclusions

---

**CHAPTER III**

---

**MECHANICAL FUNDAMENTALS OF THE WIND-PV HYBRID ROTOR**

- \* Objective and context
- \* Research motivation
- \* Current status of research
- \*  
Integration of PV cells on blades
- \* Adaptive blades and collective pitch
- \*  
Simultaneous cogeneration
- \* Market and performance indicators
- \* Results, conclusions and future directions

---

**CHAPTER IV**

**AERODYNAMIC MODELING AND BEM / CFD SIMULATIONS**

- \* Objectives
- \* **BEM - Blade Element Momentum results**
- \* **CFD results - Computational fluid dynamics**
- \* Conclusions

---

**CHAPTER V**

**STRUCTURAL ANALYSIS FEM - Finite Element Method**

Objective

Scenario 1 - Individual palette

Scenario 2 - Complete rotor (vanes + hub + ring)

General conclusions

---

**CHAPTER VI**

**DRIVE MECHANISMS AND MECHATRONIC INTEGRATION**

- \* Functional requirements and interfaces
- \* **Mast sizing**
- \* **Azimuthal rotation (yaw) bearing**
- \* **Rotor main bearing**
- \* **Collective step mechanism**
- \* **Tilt mechanism**
- \* Conclusions

**CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH DIRECTIONS**

- \* **General conclusions**
- \* **Own contributions**
- \* **Future research directions**
- \* **Bibliographic references**

## CHAPTER I

### CURRENT STATUS OF SYSTEMS RESEARCH

#### WIND-PHOTOVOLTAIC HYBRIDS

This chapter presents the current state of wind-PV hybrid architectures and the main research directions. Off-grid configurations with batteries, grid-tied solutions with or without on-grid storage, diesel-hybrid systems and multi-source applications are analyzed. The conversion and control elements (smart inverters, EMS, SCADA/IoT/AI systems), interconnection standards and current trends (LFP-GEL batteries, redox-flow solutions, hydrogen, digital twins, predictive maintenance) are highlighted.

#### 1. The importance and evolution of renewable energy sources

##### Context and

motivation. • Renewables are moving from “alternative” to the central pillar of the energy mix, amid climate emergency, energy security and technological maturity.

- Decreasing LCOE for PV and wind (vs. 2010), digitalization of operation (forecast, EMS, automation) and storage (LFP, redox-flow, Hy) support accelerated adoption.
- Environmental and health benefits: CO<sub>y</sub>, SO<sub>y</sub>, NO<sub>y</sub> and PM (suspended particles) in decrease; co-benefits for air quality and biodiversity.

##### Policy and standards framework.

- EU: neutrality 2050, y55% emissions by 2030; packages: Green Deal, Fit for 55, REPowerEU.
- Protection, Interconnection and Interoperability: EN 50549 / RfG, IEEE 1547, IEC 61850.

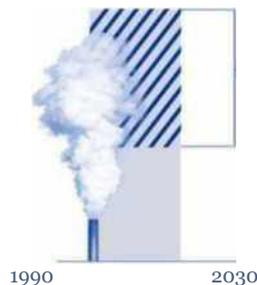
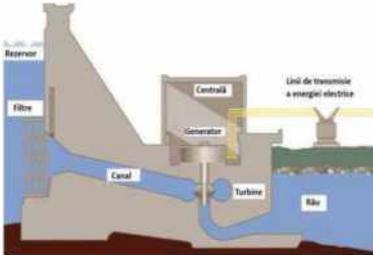
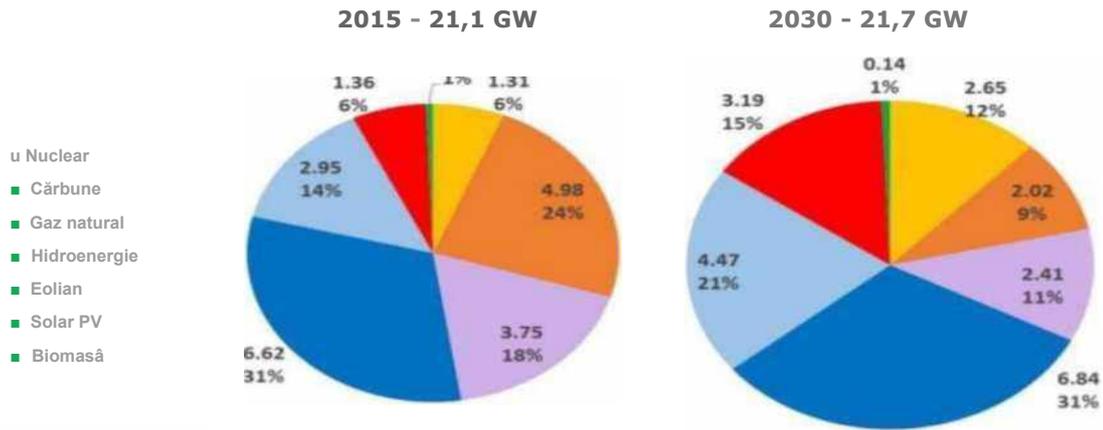


Fig. 1.1. EU targets for reducing CO<sub>2</sub> emissions.

MINISTRY OF EDUCATION AND RESEARCH  
 "VALAHIA" UNIVERSITY from TÂRGOVISTE  
 IOSUD - DOCTORAL SCHOOL OF ENGINEERING SCIENCES  
 MECHANICAL ENGINEERING FIELD



**Types of hybrid systems and areas of applicability**

**Note:** The typologies are ordered from island/off-grid applications to grid-tied and offshore applications.

**1- Hybrid wind-PV systems with battery storage (off-grid) •**

**Architectures:** DC-coupled (good storage efficiency) / AC-coupled (flexibility in extension); grid-forming inverters for island mode.

- **Advantages:** independence, flatter production profile (wind-solar complementarity), total life cost < diesel-only solutions. •

**Applications:** remote communities, telecom, agriculture (pumping/cooling), rural clinics/schools, humanitarian camps, "edge" industrial applications.

**<sup>1</sup> Grid-tied wind-PV hybrid systems • Operational model: grid**

injection; optional storage for self-consumption, peaks, system services.

- **Advantages:** surplus monetization (feed-in/net-billing/PPA), reliability (the network covers imbalances), reduced initial CAPEX.
- **Technical/standardization:** AC/DC-coupled, smart inverter functions (volt-VAR, ride-through, export limitation), according to EN 50549 / RfG, IEEE 1547.

**Applications:** residential/prosumers,

MINISTRY OF EDUCATION AND RESEARCH  
"VALAHIA" UNIVERSITY from TÂRGOVISTE  
IOSUD - DOCTORAL SCHOOL OF ENGINEERING SCIENCES  
MECHANICAL ENGINEERING FIELD

3. Hybrid systems with conventional sources (diesel-hybrid)

Description: diesel generator provides peaks and unfavorable periods; EMS + storage reduce inefficient operation.

Applications: critical/temporary sites, variable climate, high continuity.

Multi-source hybrid systems (PV + wind + microhydro/biomass)

- Benefits: diversified profile, reduced curtailment, high resilience.

- Applications: complex microgrids (campuses, bases), areas with complementary resources.

5. Hybrid systems with advanced storage (large batteries, supercapacitors, hydrogen)

Role: extended autonomy, auxiliary services (frequency/voltage), absorption of surpluses energy

Technologies: LFP/Na-ion/flow (medium), supercapacitors (fast), hydrogen (long, sector coupling)

6. Microgrids and urban/suburban applications

Features: on-grid/island mode, AMI/SCADA/EMS, demand response.

Benefits: resilience, self-consumption, cost optimization.

7. Marine and offshore applications

- Configurations: offshore wind (fixed/floating) + floating PV, sometimes storage; more resources stable, higher costs/logistics.

- Applications: coasts/islands, floating R&D projects.



Fig. 1.3. Example of PV integration in urban environment

**MINISTRY OF EDUCATION AND RESEARCH  
"VALAHIA" UNIVERSITY from TÂRGOVISTE  
IOSUD - DOCTORAL SCHOOL OF ENGINEERING SCIENCES  
MECHANICAL ENGINEERING FIELD**

**Current trends and research directions**

- **Flexibility: LFP batteries as standard; redox-flow/hydrogen for longer durations; DSR for battery cycling limitation. •**

**Digitalization & AI: probabilistic forecasting, digital twins, set-point optimization, maintenance predictive.**

- **Smart inverters & standards: grid-support functions (volt/VAR, frequency-Watt, ride-through), interoperability (IEC 61850, IEEE 1547, EN 50549).**
- **Hybrid architectures & microgrids: PV + wind + storage; grid-forming for safe isolation.**
- **Circular economy: recycling of batteries and PV modules, wind turbines; design for disassembly/repairability.**
- **Expansion of areas: floating PV, agri-PV, integration with electric mobility and heating**

**Conclusions on the current state of development of hybrid wind-PV systems**

- **PV/wind competitiveness - separate and hybrid - remains the engine of expansion. • Robust integration requires technologies/algorithms and standardization (smart grids, flexibility, interconnection).**
- **Wind-PV hybrids offer more stable production profile, lower storage and alignment better at real consumption curves.**
- **Research & innovation: equipment performance (turbines, PV, storage), data-driven O&M (forecast, optimization, predictive maintenance) and circular economy.**

**Final conclusion (Chap. 1). Wind-PV hybrids, supported by storage and digitalization, are a key piece of the energy transition: reduce emissions, increase resilience and optimally utilize local resources. This framework underpins the subsequent stages of the thesis (design, modeling, validation and mechatronic integration).**

## CHAPTER II

### ANALYSIS OF WIND AND SOLAR RESOURCES FOR A SYSTEM WIND-PV HYBRID

This chapter substantiates the analysis by characterizing wind and solar resources. The data acquisition and processing methodology (multi-height anemometry, solar measurements, satellite series) allows the generation of verifiable design hypotheses. The complementarity of resources is demonstrated and translated into concrete scenarios for system sizing.

#### 2.1. Characterization of the wind resource

Objective: define the site indicators that enter into the design (production + tasks).

Site factors: topography, roughness/obstacles, atmospheric stability, seasonality y influences on shear, TI, gusts.

##### Analysis steps

- Recommended period: y12 months (ideally 24-36) + correlation with long series for corrections climatological.

##### Key parameters

- Wind speed (on 10/30/50 m levels y hub height), direction (roses), TI and gusts y inputs for CFD/FEM and power curves.
- Result: complete set of indicators ( $v_{med}$ , temperature, shear, gusts and TI) for selection of turbine, tower height and calculation cases.

##### Romania - site observation

- Competitive wind corridors: Dobrogea, Carpathian ridges, Western Plain; good complementarity with the south/west solar resource y suitable for hybrids.

##### Consequences in design

- Matching power curve y speed distribution (cut-in/rated/cut-out).
- Hub height: production vs. cost tradeoff.
- Control & safety: pitch, ramp-rate limitation in sites with high TI/gusts.

Relevance for hybrid •

MINISTRY OF EDUCATION AND RESEARCH  
"VALAHIA" UNIVERSITY from TÂRGOVISTE  
IOSUD - DOCTORAL SCHOOL OF ENGINEERING SCIENCES  
MECHANICAL ENGINEERING FIELD

Identification of complementarity Windows with PV (day/night; winter/summer).

- Battery/inverter sizing and EMS rules (target SOC, export limitations).

## 2.2. Characterization of the solar resource

Role: PV sizing (angle, orientation, strings, MPPT, inverters), storage and operation.

Essential parameters

- Albedo & bifaciality; cell temperature ( $T_{cell}$ , NOCT models); AM/spectrum.

Measurement & data sources

- Ground: pyranometers/pyrheliometers (ISO 9060; WMO guidelines), RSI for DHI. • Satellite analysis + local correlation/validation).

Analysis and transposition

- Statistics (averages, percentiles, hourly/diurnal/seasonal histograms). • Transposition models (clear/cloudy sky) y POA; fixed angle y latitude optimization (with adjustments), 1-axis/2-axis trackers (production y vs. cost/O&M y).

Local factors & uncertainties

- Aerosols, clouds, soiling, shading y management (cleaning, vegetation).
- Bankability: QC/QA, sensor audit, satellite-ground correlation.

MINISTRY OF EDUCATION AND RESEARCH  
"VALAHIA" UNIVERSITY from TÂRGOVISTE  
IOSUD - DOCTORAL SCHOOL OF ENGINEERING SCIENCES  
MECHANICAL ENGINEERING FIELD

2.3. Wind-solar complementarity

Definition: the degree to which the wind and PV series are temporally offset y combined profile more stable.

Indicators: correlations (Pearson/Kendall), joint-pdf by levels, cross-correlation with lag, ELCC/ELFP portfolio.

night vs. maximum PV in summer/day y flattening of the mixed profile, fewer "low-low" intervals.

Design implications

- PV:wind ratio that minimizes LOLP (loss of load probability)  
/LPSP(minimum charging power) at given SOC(state of charge); battery required more small; EMS rules (loading prioritization, ramp limitations, zero-export).
- Network integration: reduced curtailment, participation in flexibility; compliance smart-inverter functions.

Practical flow

1. Extract multi-year PVGIS/ERA5 series (GHI/DNI/DHI, wind/directions).
2. Transposition to POA + T<sub>cell</sub> (PV) and conversion to wind power (power curves at the hub height).
3. Calculate correlations/joint-pdf/ELCC.
4. Optimize the PV:wind + storage mix (HOMER/PVSyst/Simulink).
5. Validate locally with measurements.

2.4. Operating and sizing scenarios

Key variables: PPV, PW, EB (kWh), PB (kW), AC- vs. DC-coupled, size inverters, EMS rules (SOC targets, ramp, zero-export), interconnection requirements (EN 50549/RfG, IEEE 1547; EMC/anti-islanding).

Indicators: AEP, PR, capacity factor, curtailment, LPSP/LOLP, battery cycling, ELCC; enters CAPEX-OPEX-LCOE.

A) Off-grid (island)

- Targets: autonomy 12-48 h, LOLP y 1-5%, black-start, grid-forming. •

Sizing: typical mix 60:40...70:30 (PV:wind) (adjusted to local data); EB on

- Control: surplus loading, ramp-limit, dump-load on wind peaks.

B) Grid-tied prosumer

- Targets: max. self-consumption, zero-export, dynamic tariffs, DR.
- Sizing: PPV anchored during the day; PW for night/season; EB for peak-shaving.17

- Connection: smart-inverter functions (volt-VAR, ride-through).
- C) Weak network / local constraints
- Targets: minimum curtailment, voltage/harmonics within limits, capped export.
  - Sizing: AC/DC-coupled choice; sufficient PB for clip-shaving; EMS for export ramp/limitation.
- D) Campus/industrial microgrid
- Targets: resilience (island mode), N-1 criterion, minimum cost below TOU/peak.
  - Dimensioning: PV + wind + EB on "critical load"; participation in DR/VPP.
- E) Hybrid with conventional back-up (diesel)
- Targets: reducing fuel hours; operating at optimum efficiency point.
  - Sizing: PV+wind covers the base; EB takes the transients; generator starts at Critical SOC/load.

**Workflow (summary)**

1. Data: hourly/sub-hourly wind/solar series + load; QC/QA.
2. Modeling: POA + T<sub>cell</sub>; wind power curves; extreme scenarios (percentiles, episodes without sun/wind).
3. Optimization: scanning (PPV, PW, EB, PB, topology) to LCOE/LOLP targets; constraints export/ramp/standards.
4. Validation: HOMER/PVSystem/Simulink + sensitivities (battery price, tariffs, PV degradation).

Link to CFD/FEM (next chapter): scenarios provide design cases (wind-TI-gusts-y, y) for CFD and load combinations for FEM (wind/inertia/gravity, cycles).

- 2.5. Potential study for the chosen location Location conclusions and Economic & Environmental Analysis

- **Suitability: feasibility verdict based on resource + simulations + cost-benefit.** •

**Optimal configuration: turbine type, PV capacity, storage technology/size,**

**AC/DC topology, connection diagram, standard requirements and last but not least budget and ecology**

#### **Conclusion Chapter 2**

- **Solid data + coherent methodology (measurement y modeling y validation) = reduced uncertainty and optimal sizing.**
- **Wind-solar complementarity flattens the profile, decreases storage and curtailment at the same reliability.**
- **Operating scenarios connect the resource with equipment design (PV, wind, storage, conversion) and EMS rules, preparing CFD/FEM cases.**
- **The result: robust basis for a competitive, secure and bankable wind-PV hybrid system, adapted to the chosen site.**

## CHAPTER III

### MECHANICAL FUNDAMENTALS OF THE WIND-PV HYBRID ROTOR

This chapter introduces the central mechanical concept: a 3-meter diameter wind-photovoltaic hybrid rotor, consisting of 12 pivoting flat blades, covered with PV cells and stiffened by a peripheral ring. The design logic of the hub, collective pitch mechanism, stiffening elements and electrical collection solutions is described.

#### 1. Objective and context

- A hybrid rotor of 3 m diameter is proposed, with 12 flat pivoting blades covered with PV and stiffened by a peripheral ring.
- The concept aims at simultaneous cogeneration (wind + solar) on the same mobile surface, with a single foundation and a single electric chain.
- Novelty: complete aero-electro-structural integration, absent from existing literature. • The ring reduces the moment at the blade root by ~70-75%; aerodynamic losses are moderate ( $\gamma C_p$  y 5-8%).
- PV power in rotation y 15-25% of nominal, depending on angle and shading.

#### 2. Research motivation

- Limitations of stand-alone solutions:
  - PV: intermittency, soiling, overheating; -
  - Small wind: high cut-in, modest  $C_p$ , sensitivity to turbulence.
- Advantage of the compact hybrid:
  - Day/night, summer/winter complementarity;
  - Reduced footprint, BOS and storage costs;
  - Increased capacity factor and energy reliability.
- Originality:
  - Dual surfaces (blade = aerodynamic + active PV);
  - Collective pivot for quick switching between modes;
  - Quantified real cogeneration (aero + synchronous PV);
  - Unified BEM-CFD-FEM methodology + dynamic I-V tests.

#### 1. Current state of research

- Typologies  $\gamma$  5 kW: PV umbrellas, VAWT with PV blades, plug-and-play kits, PV on nacelle.
- Identified gaps:
  - Lack of synchronized  $C_p$ - $\gamma$ PV data under real rotation
  - Lack of a collective pitch mechanism for PV-covered blades;
  - Reliability issues with movable masses and joints.

#### 3.3. Integration of PV cells on blades

- Reported approaches:
  - Thin laminated films (lightweight, but adhesive fatigue problems);
  - Curved modules on VAWT ( $C_p$   $\gamma$  0.23, with inertia  $\gamma$  and cost  $\gamma$ );
  - "Flush" recessed cells (optimal aero, but technologically complicated);
  - PV pivoting blades
  - Challenges: mechanical compatibility (fatigue), aerodynamic penalties, electrical ripple, thermal cooling.
- 3m rotor connection: adopts thin laminate + peripheral ring + fast MPPT.

#### 3.4. Adaptive blades and collective pitch

- Existing strategies: folding, feathering, morphing;
- Limitations for PV: difficulties in integrating laminates and wiring. •

Thesis novelty: robust collective pivot (helicopter style), which allows:

- Dual-mode operation (PV plan, wind with optimal  $\gamma$ );
- Control of burst loads;
- Maintaining the incidence of PV in rotation.

Adaptive blade strategies in low-power wind-PV hybrid concepts

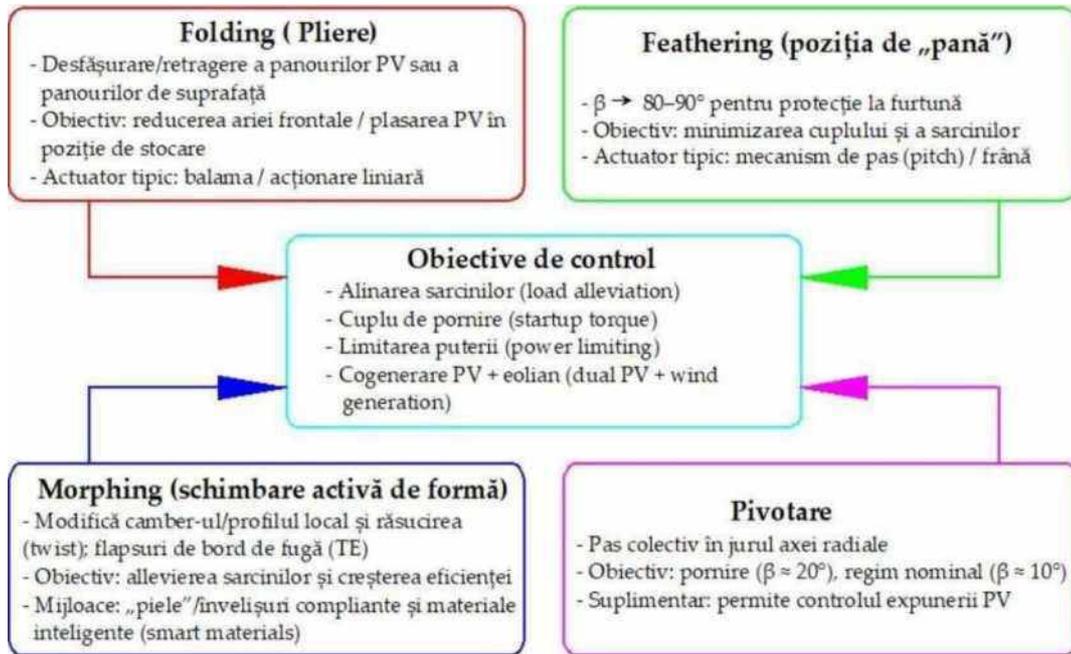


Figure 3.1. Schematic classification of folding, feathering, morphing and collective pivoting strategies (thesis concept)

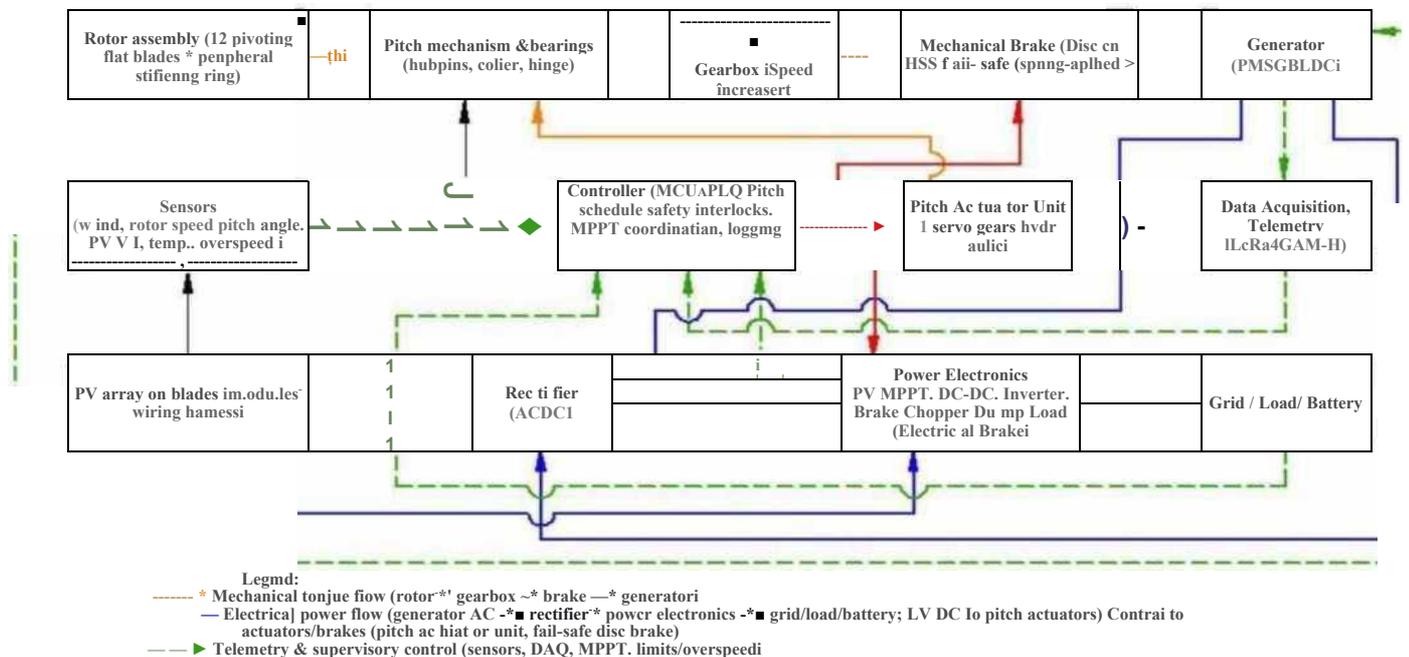


Figure 3.2. Hybrid wind-PV rotor: subassembly map and signal/power paths

### 3.7-3.9. Concept and subassemblies

- Key components: base, mast, yaw, tilt, nacelles, hub, pivoting blades with PV, ring peripheral, slip-ring or micro-inverters, collective step mechanism.
- Pitch mechanism: polygonal plate + connecting rods y synchronous pivot for all blades.
- Stiffening: peripheral ring + spokes = 70-75% reduction in moment at the root.
- Braking: electric (dump-load), aerodynamic (full feather), mechanical (fail-safe).
- Multiplication: planetary, belt/chain or direct-drive.

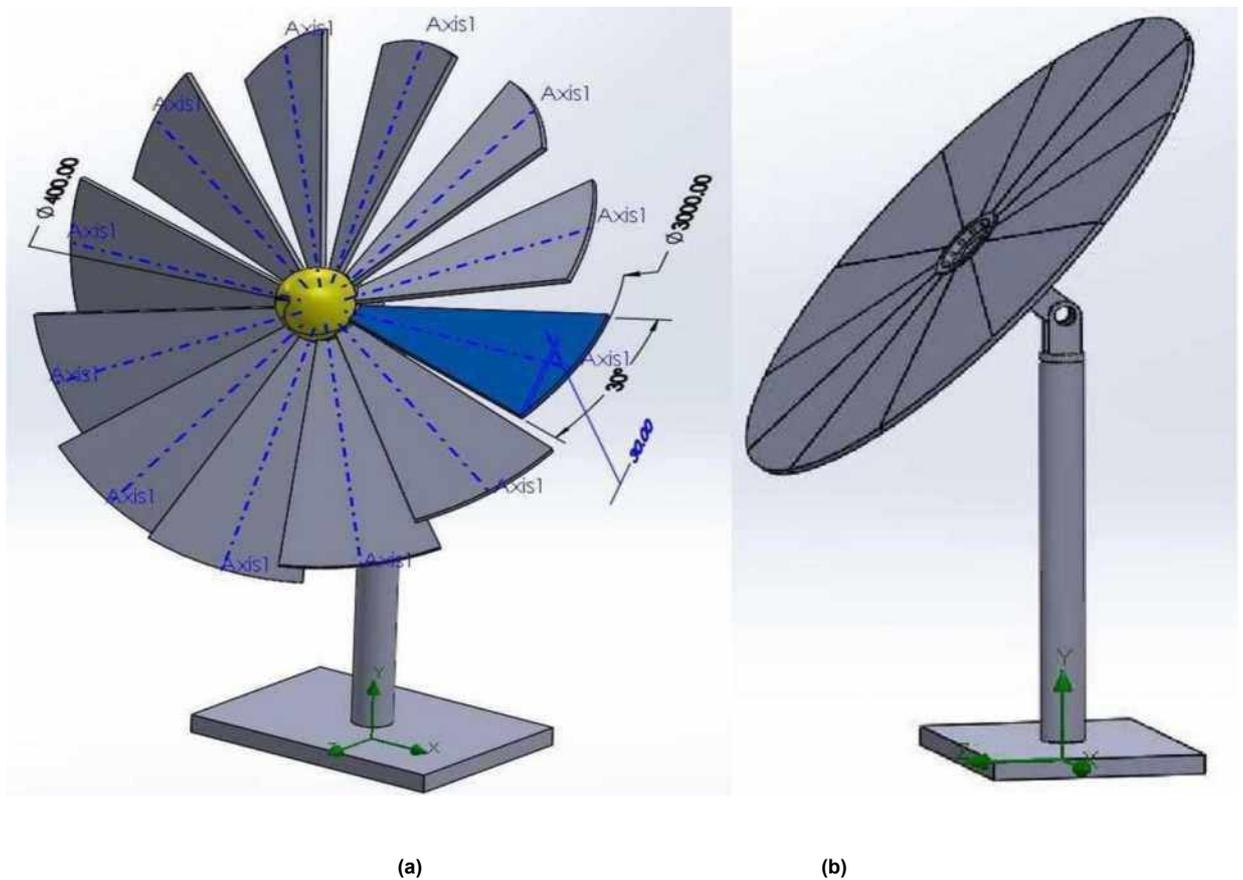


Figure 3.2. Hybrid wind-photovoltaic rotor (schematic model and operating positions) a) Wind turbine mode, with dimensions: total rotor  $\varnothing$  3000 mm; hub  $\varnothing$  400 mm (pivot radius 200 mm); blade sector  $30^\circ$ .

The dotted lines (blue) indicate the 12 pivot axes. b) Photovoltaic mode. The rotor disk is tilted towards the sun; the blades are interlocked to form a continuous PV surface, and the mast allows for daily sun tracking.

### Chapter 3 Conclusions and Future Directions

Estimates:  $C_{p,max}$  0.22-0.24;  $M_{root}$  reduction 70%;  $T_{cell}$  3...5 °C;  $\eta_{PV}$  15% of rated at 60-120 rpm.

- **Conclusion:** the hybrid rotor concept is technically feasible and economically competitive, with obvious benefits to footprint and capacity factor.
- **Challenges:** long-term reliability of PV laminates and slip rings, mechanical tolerances, transient control.
- BEM-CFD-FEM validation and physical prototype tested according to IEC 61400-2 (standard security in design, installation and maintenance).
- Multi-objective optimization and integration with storage.
- Standardized certification for SWT and PV/EMC safety.

## CHAPTER IV

### AERODYNAMIC MODELING AND SIMULATIONS

#### BEM (blade element momentum)/CFD (computational fluid dynamics)

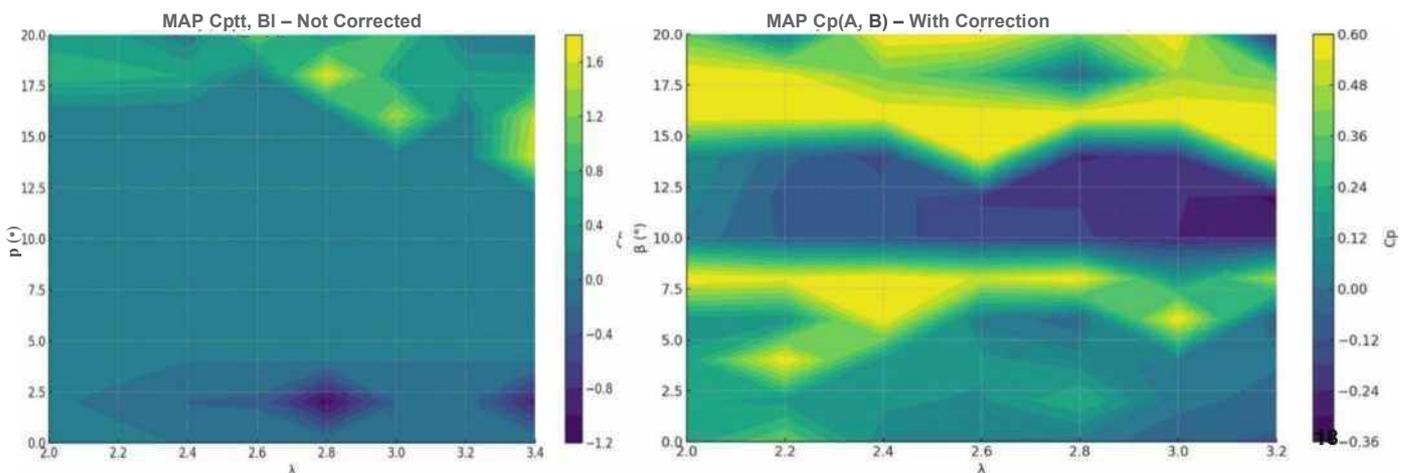
This chapter establishes the aerodynamic basis of the rotor, using a BEM model adapted for low Reynolds regimes and CFD validations. The performance maps ( $C_p$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$ ) and radial load distributions are obtained, which constitute inputs for the structural analysis.

#### 1. Objectives

- Evaluation of the hybrid wind-PV rotor ( $D=3$  m, 12 flat blades + peripheral ring). • Determination of aerodynamic performance and loads for structural analysis later.
- Validation by BEM and CFD for three key regimes: cut-in (3 m/s), nominal (5 m/s) and extreme (25 m/s, feathering protection).

#### 2. Main BEM results

- Aerodynamic efficiency ( $C_p$ ): maximum  $\gamma$  0.35-0.38 at  $\gamma$  2.6-2.8 and  $\beta$  10-12°.
- Efficiency plateau: wide area ( $\gamma$  2.4-3.0,  $\beta$  8-14°) with  $C_p > 0.3$ . • Starting: at  $\beta$  20-22° sufficient torque for self-starting ( $\gamma$  3.5 N-m at 3 m/s).
- Extreme (feathering):  $C_p$  decreases towards 0; the rotor becomes an aerodynamic brake.



### 4.3. CFD results

• Cut-in:

- o  $y=0^\circ$  y torque y 0 (does not start).
- o  $y=10^\circ$  y low torque (y 2-3 N-m).
- o  $y=20^\circ$  y torque y 9 N-m, sufficient for starting.

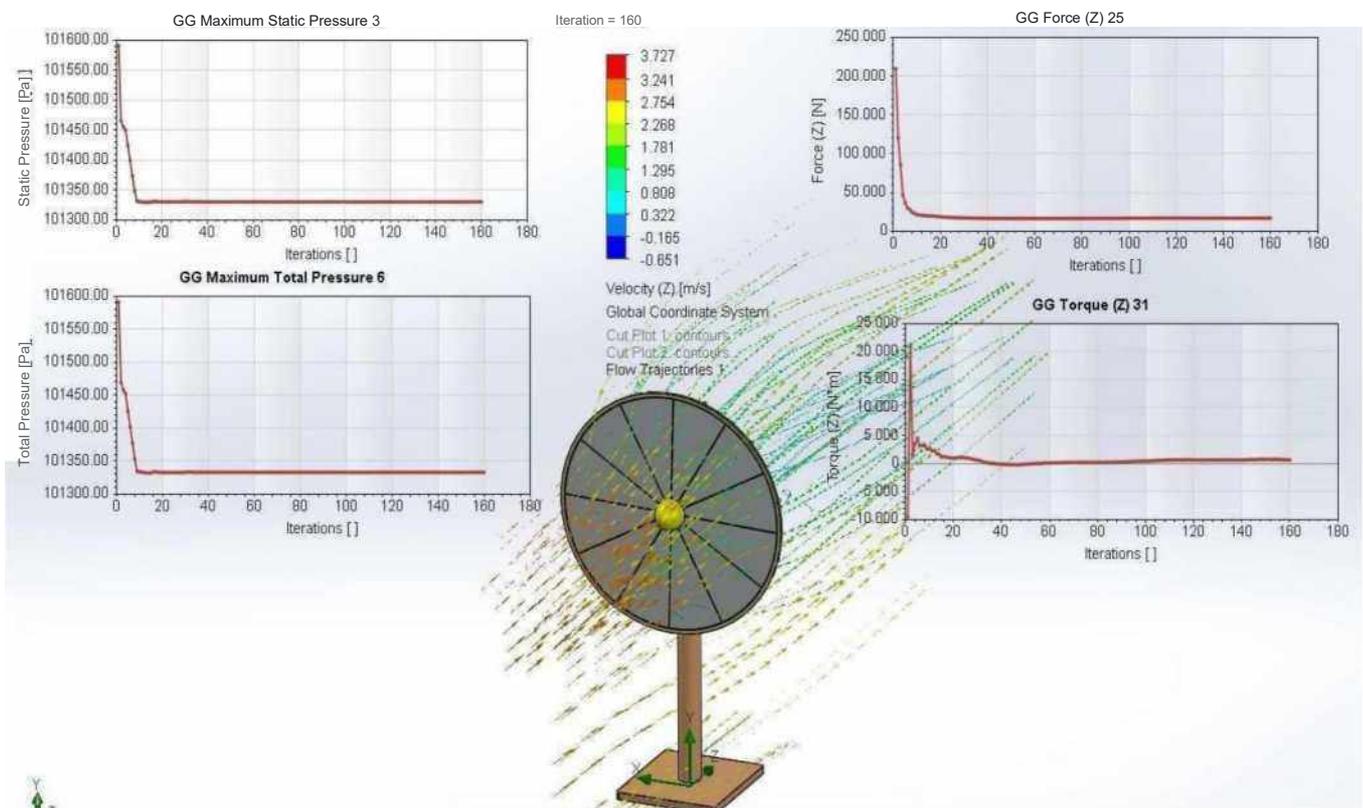


Figure 4.7. "Cut-in" case ( $y = 0^\circ$ ), CFD study

MINISTRY OF EDUCATION AND RESEARCH  
 "VALAHIA" UNIVERSITY from TÂRGOVISTE  
 IOSUD - DOCTORAL SCHOOL OF ENGINEERING SCIENCES  
 MECHANICAL ENGINEERING FIELD

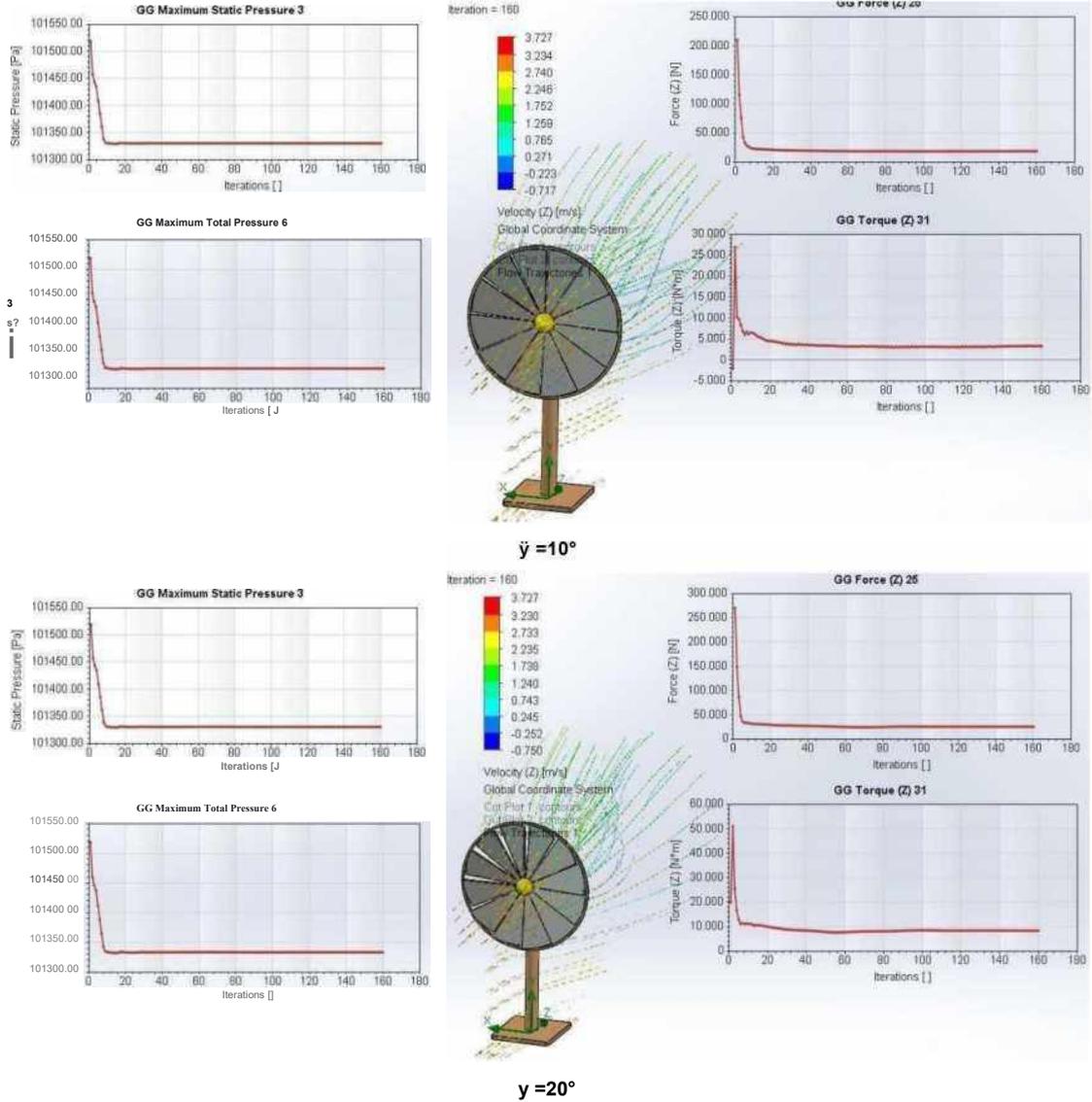


Figure 4.8. "Cut-in" case ( $\gamma = 10^\circ$ ,  $\gamma = 20^\circ$ ), CFD study

Interpretation

at  $\gamma = 20^\circ$  the center of pressure rises slightly - flow still attached, but the amplitude remains very small; flat blades do not create serious depressions at 3 m/s.

the double force at  $\gamma = 20^\circ$  confirms the increase in bearing capacity; the values are however modest  $\gamma$  non-critical axial load.

almost triple starting torque at  $\gamma = 20^\circ$  - sufficient to overcome mechanical friction ( $\gamma = 3$  N·m estimated from BEM).

- Nominal (5 m/s,  $\gamma=10^\circ$ ):
  - o Torque y 60 N-m, axial thrust y 50 N. o Maximum pressures y 0.2 kPa (safe).
  - o Power y 600 W, confirms BEM predictions.

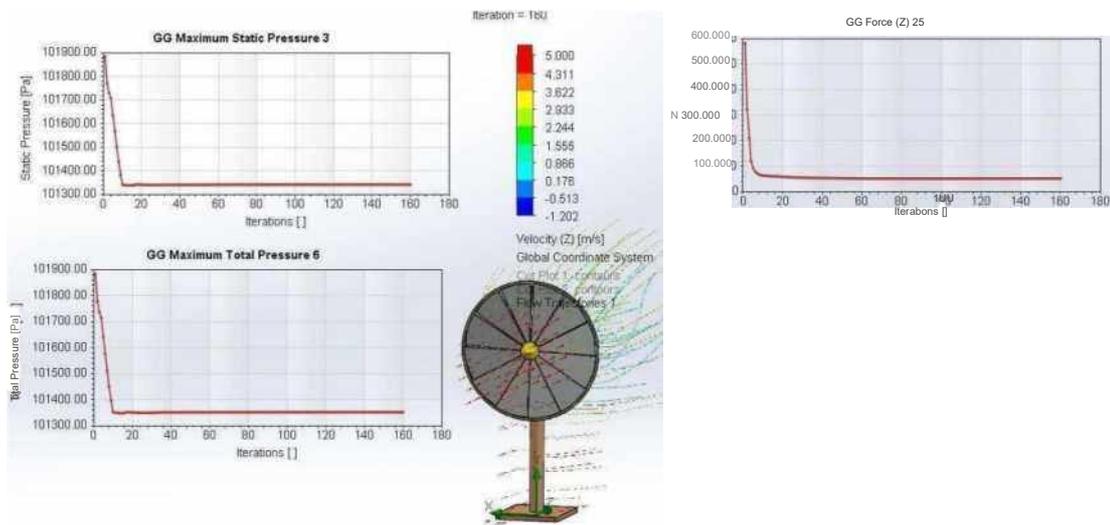


Figure 4.10. "Normal" case ( $V = 5$  m/s,  $\gamma = 100^\circ$ ), CFD study

MINISTRY OF EDUCATION AND RESEARCH  
 "VALAHIA" UNIVERSITY from TÂRGOVISTE  
 IOSUD - DOCTORAL SCHOOL OF ENGINEERING SCIENCES  
 MECHANICAL ENGINEERING FIELD

- Average wind (10 m/s,  $\gamma=20^\circ$ ):
  - o Torque y 100 N-m, thrust y 350 N.
  - o Power y 1.2 kW.
  - o The flow remains attached, without stalling.

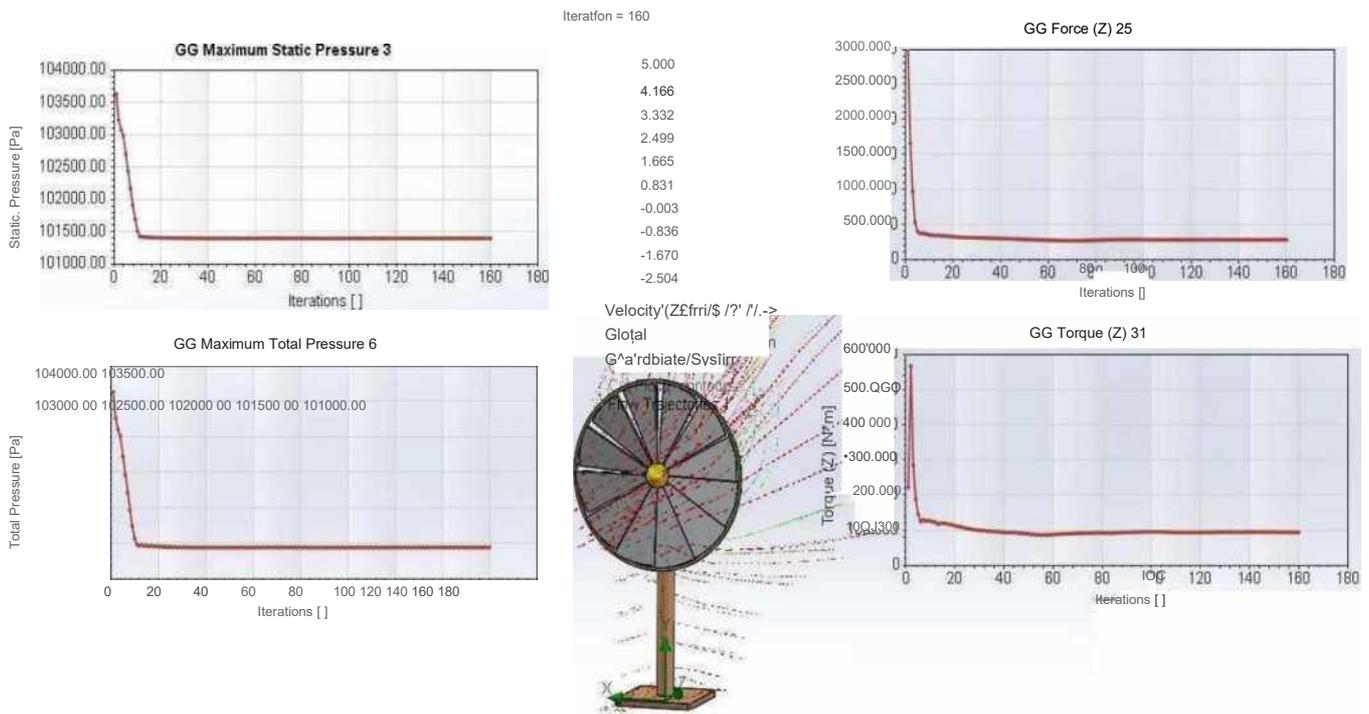


Figure 4.11. "Normal" case ( $V = 10$  m/s,  $\gamma=20^\circ$ ), CFD study  
CFD interpretation

---

axial traction 7 times higher than at 5 m/s; remains below the designed axial bearing capacity of 1 kN, hence structural safety.

---

double the nominal torque (80 N m at 5 m/s); at  $\gamma = 20^\circ$  and  $P = 1.2$  kW results, confirming the  $C_p(\gamma)$  curve for  $\gamma = 20^\circ$ .

---

the local pressure increases linearly with  $\gamma^2$ ; the value remains well below 1 kPa—as expected for flat blades.

---

**robust solution, adequate mesh ( $\gamma < 1$ ).**

---

the flow remains attached to the chord  $\gamma = 20^\circ$  is still below the stall angle even at  $Re = 5 \cdot 10^5$ .

• Extremes (25 m/s):

o  $\gamma=80^\circ$  y high torque (~400 N-m) y insufficient for protection. o  $\gamma=90^\circ$  y torque y 0, thrust < 1 kN y effective protection ("invisible" rotor aerodynamic).

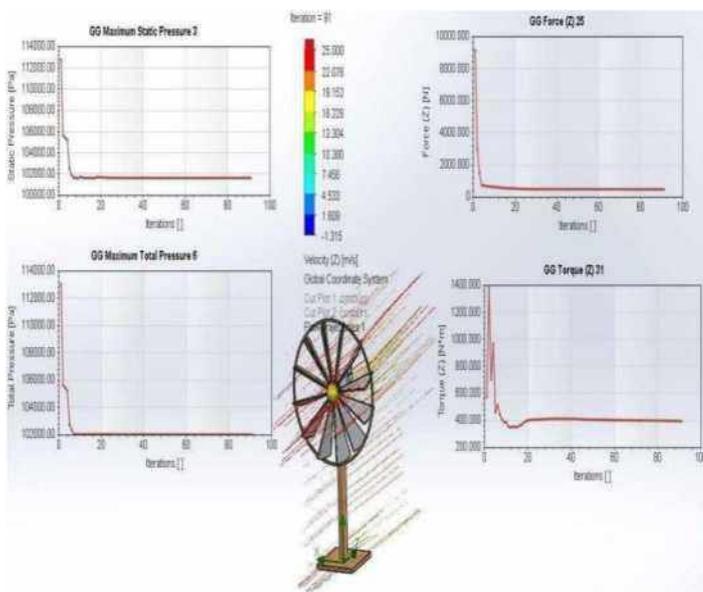


Figure 4.12. "Extreme" case (V = 25 m/s,  $\gamma=80^\circ$ ), CFD study

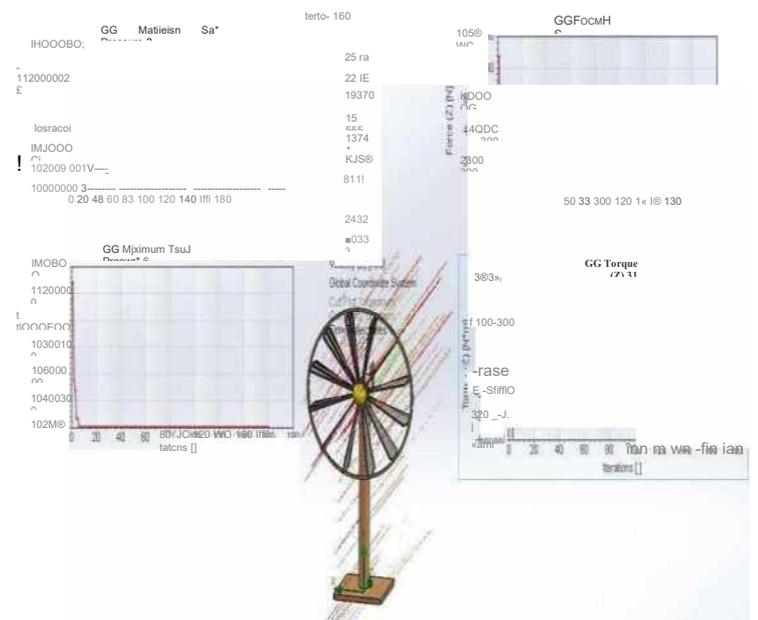


Figure 4.12. "Extreme" case (V = 25 m/s,  $\gamma=90^\circ$ ), CFD study

**Conclusions chapter 4**

1. The flat blade + ring rotor can achieve competitive performance at low Re ( $C_p$  max  $\gamma$  0.37).
2. Optimal pitch control strategy:
  - a  $\gamma$   $20^\circ$  for starting,
  - a  $\gamma$   $10-12^\circ$  for nominal,
  - o  $\gamma$   $90^\circ$  for storm/protection.
3. The load distributions provided by BEM/CFD are ready for analysis structural FEM.
4. The peripheral ring reduces the moments at the root by  $\gamma$  75% and stabilizes the blade, essential for strength and durability.

## CHAPTER V

### FEM STRUCTURAL ANALYSIS

This chapter performs structural validation through FEM modeling. Critical operational regimes (cut-in, nominal, extreme/feathering), stresses, displacements and structural stability are analyzed. The role of the peripheral ring is confirmed and sizing recommendations are formulated for key elements.

#### 5.1. Objective

Structural validation of the hybrid wind-PV rotor ( $D = 3$  m, 12 flat blades + peripheral ring), using the aerodynamic loads obtained in Chap. IV (BEM + CFD). The FEM analysis verifies stresses, displacements and safety factors in Cut-in (3 m/s), Nominal (5 m/s) and Extreme/feathering (25 m/s), according to IEC 61400-2.

#### 5.2. Scenario 1 - Individual palette

- Fixed/Fixed (locked spindles):  $\sigma$  10 MPa, displacement 0.07 mm, FOS 3 y structure very rigid.
- Fixed/Hinge:  $\sigma$  11 MPa, displacement 0.67 mm y higher, but safe. • Hinge/Hinge:  $\sigma$  392 MPa, displacement 17 mm, FOS < 1 y plastic failure.

Conclusion: the pallet is durable, but the step mechanism must ensure locking torsional; otherwise the spindles will fail.

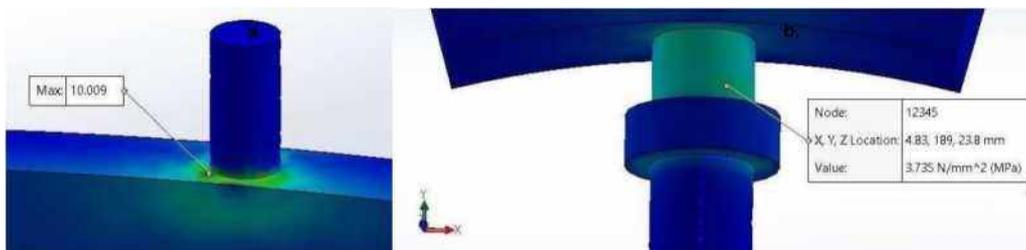
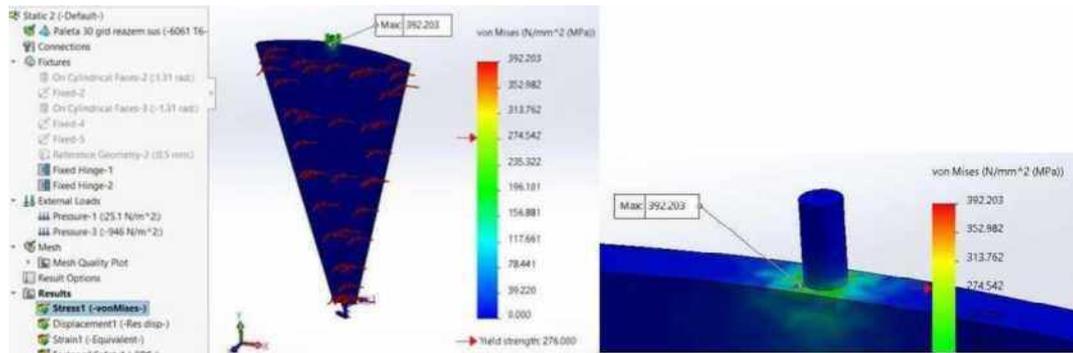
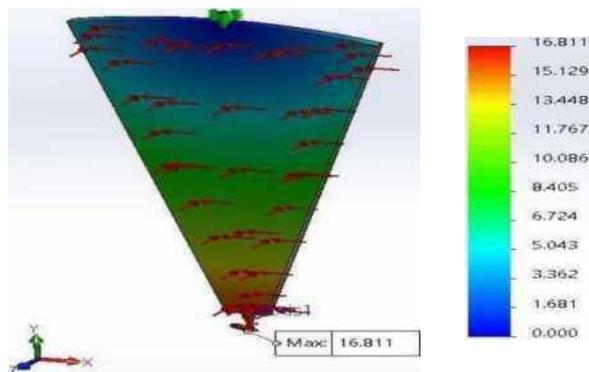
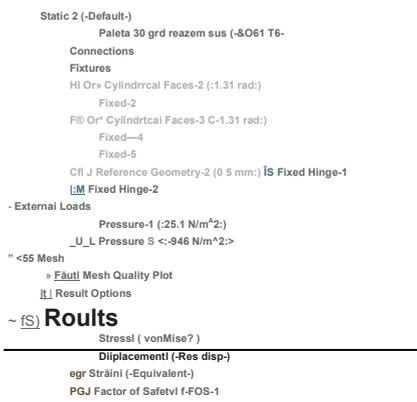


Figure 5.2. Scenario No. 1, Fixed/Fixed

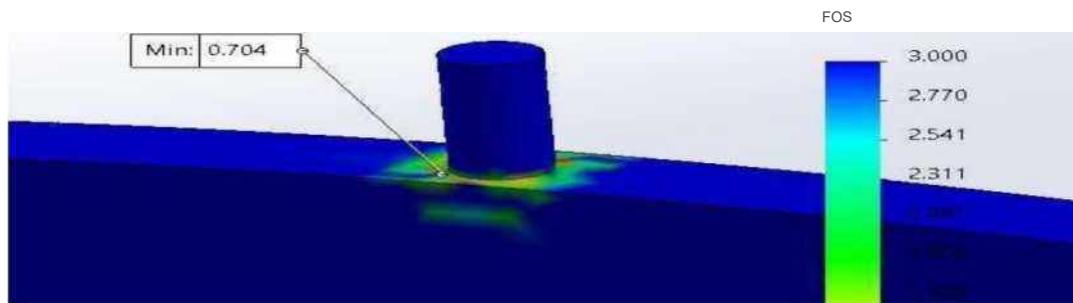
MINISTRY OF EDUCATION AND RESEARCH  
 "VALAHIA" UNIVERSITY from TÂRGOVISTE  
 IOSUD - DOCTORAL SCHOOL OF ENGINEERING SCIENCES  
 MECHANICAL ENGINEERING FIELD



a.



b.



c.

Figure 5.3. Scenario No. 1, Hinge/ Hinge

5.3. Scenario 2 - Complete rotor (vanes + hub + ring)

• Cut-in ( $\gamma=0-20^\circ$ ):

- o Max. stresses 27-50 MPa, displacements 1-3 mm y high safety.
- o FOS (factor of safety)  $> 5$  y no structural problems.

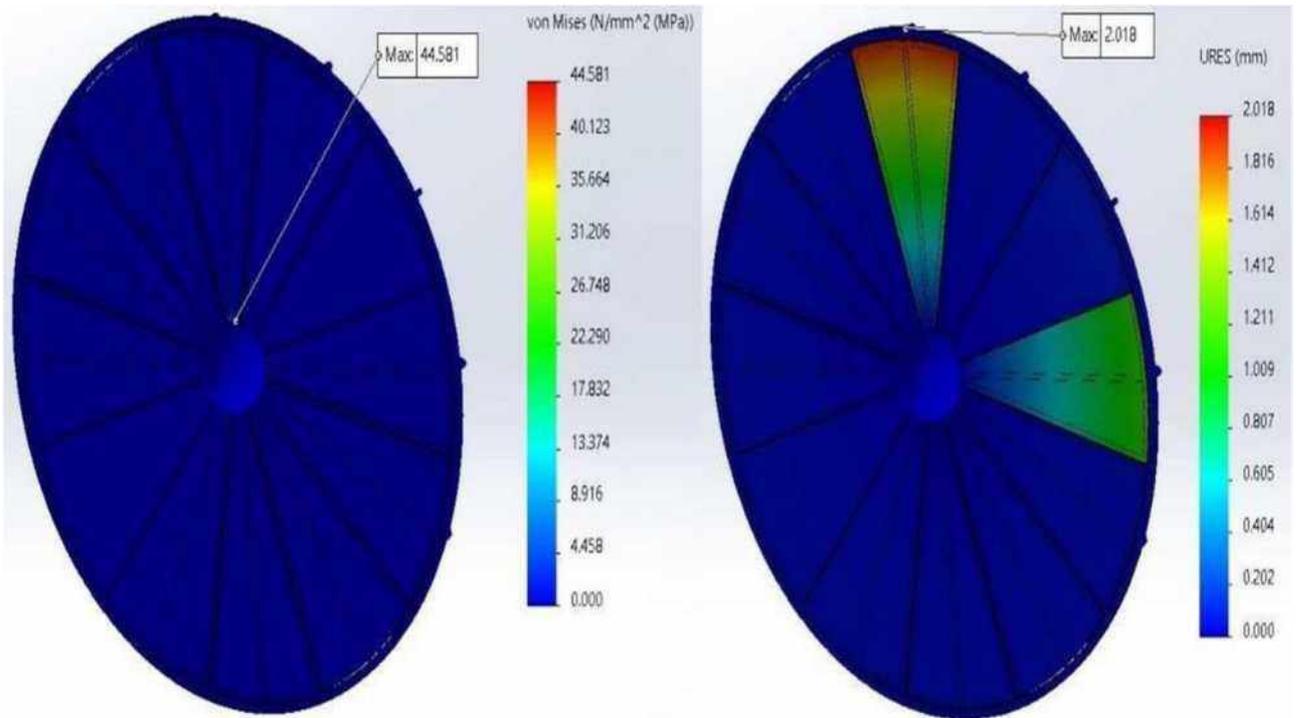


Figure 5.4. "Plane" case ( $\gamma = 0^\circ$ )

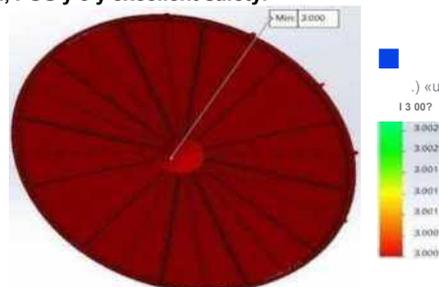
• Nominal ( $\gamma=10^\circ$ ,  $V=5$  m/s): In the

• inițial configurație:  $\sigma$   $\gamma$  117 MPa, displacement  $\gamma$  6.8 mm, FOS  $\gamma$  2.3  $\gamma$

**it works, but close to the limit.**

o After resizing (spindle 030 mm, ring 50x50 mm, spokes 040 mm):  $\sigma$  decreases to  $\gamma$  9-10 MPa,

displacement  $\gamma$  1.2 mm, FOS  $\gamma$  3  $\gamma$  excellent safety.



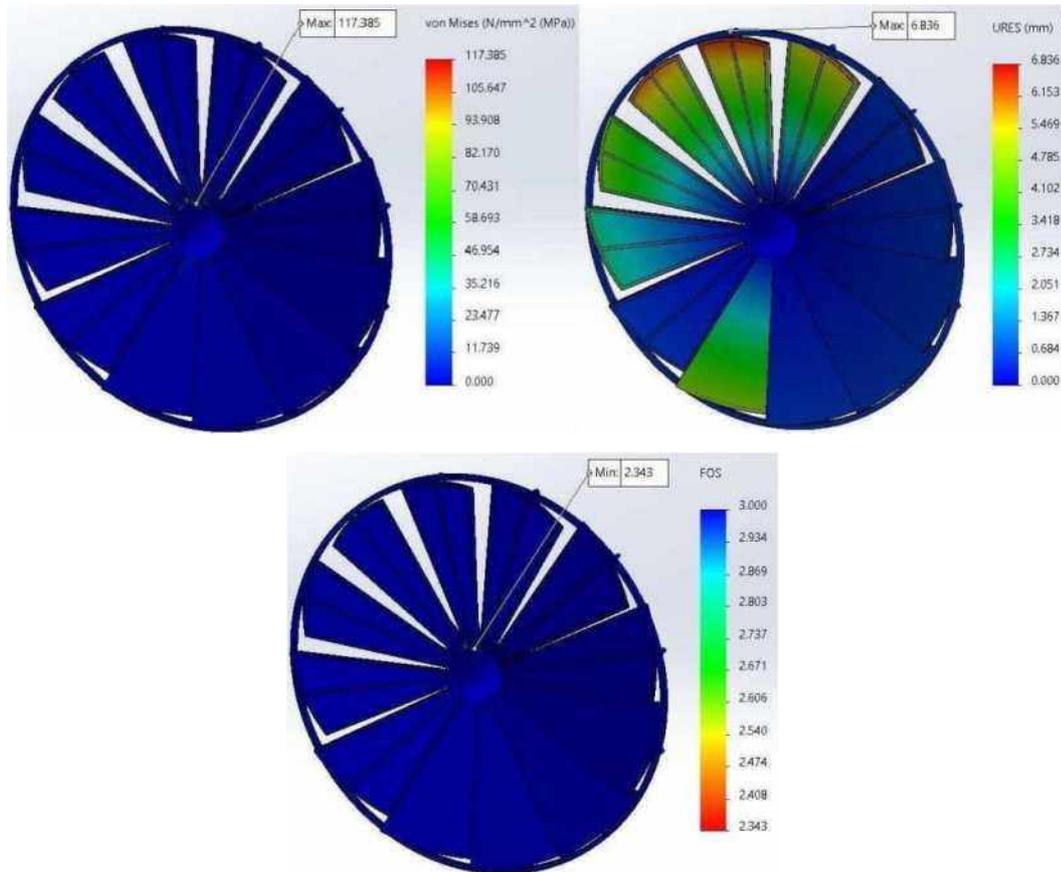
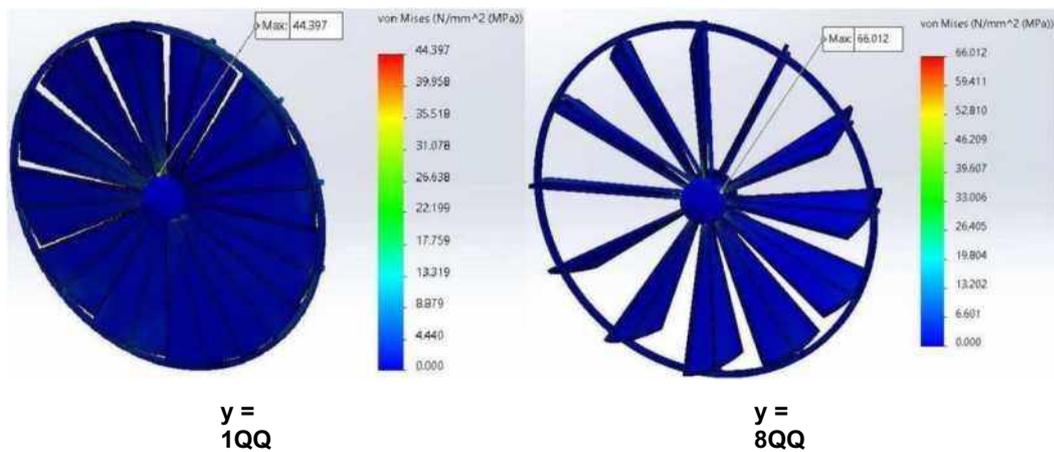


Figure 5.6. "Nominal" case ( $y = 1QV = 5 \text{ m/s}$ )

• Extremes ( $V=25 \text{ m/s}$ ):

o  $y=1Q^\circ$  (exposed rotor):  $y$  44 MPa, displacement  $y$  4 mm, FOS  $> 3$ .

o  $y=8Q^\circ$  (feathering):  $y$  66 MPa, displacement  $y$  3 mm, FOS  $> 3$  y the rotor brakes efficient, remains elastic.



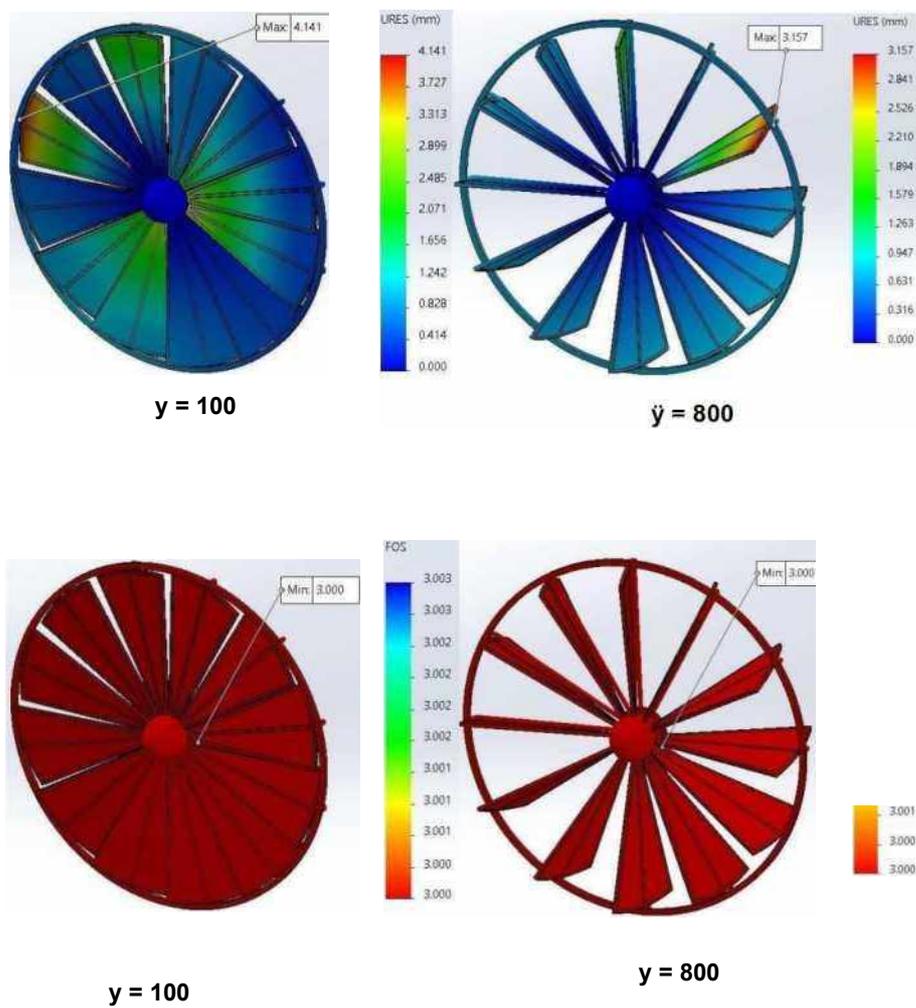


Figure 5.8. "Extreme" case ( $y = 200$ ,  $y = 800$ ), resizing

## **General conclusions chapter 5**

- 1. Structural validation: the flat blade + peripheral ring design is robust for all the modes (Cut-in, Nominal, Extreme).**
- 2. The role of the ring: reduces root moments and deflections by 70-75%, preventing buckling.**
- 3. Step mechanism: must ensure firm torsional locking; Hinge/Hinge variant is unacceptable.**
- 4. Re-sizing the spindles and ring: reduced the maximum stresses and lowered displacements below 1 mm to nominal, with FOS y 3.**
- 5. Additional mass: increases inertia (y1.8x), but does not affect starting and helps with damping shocks.**
- 6. Compatibility: all values comply with IEC 61400-2 requirements (y/Rp0.2, Utip/R, FOS).**
- 7. Recommendations: reinforcement at the blade-ring connection, fatigue verification, bench testing and in the field for calibration.**

## CHAPTER VI

### DRIVE MECHANISMS AND MECHATRONIC INTEGRATION

The chapter details the mechatronic integration, with yaw, tilt, collective pitch and braking mechanisms. The drive Solutions are designed based on the load distributions obtained in chapters 4 and 5, and the system is prepared for the integration of the power train and conversion electronics, being framed by the requirements of IEC 61400-2 for microturbines and good industrial practices for small turbines.

#### 1. Functional requirements and interfaces

The functionality of the drive mechanisms derives directly from the aerodynamic regimes: large pitch for starting, nominal pitch for maximum efficiency and extreme pitch for protection. These scenarios result in stroke, torque, response time and robustness requirements, complemented by international standards.

An interface matrix ensures coherence between subsystems:

- Mechanical: actuator strokes and moments, bearing loads and tolerances structural.
- Power: slip-ring routes, dynamic braking circuits and compatibility with generators.
- Control and sensors: absolute encoders for yaw/tilt/pitch, speed sensors and temperature, logical interlocks for safe stops.
- Compliance: environmental resistance (IP65), emergency stops and functional checks according to IEC and SWCC guidelines.

#### 2. Mast sizing

The mast has been dimensioned for critical load cases:

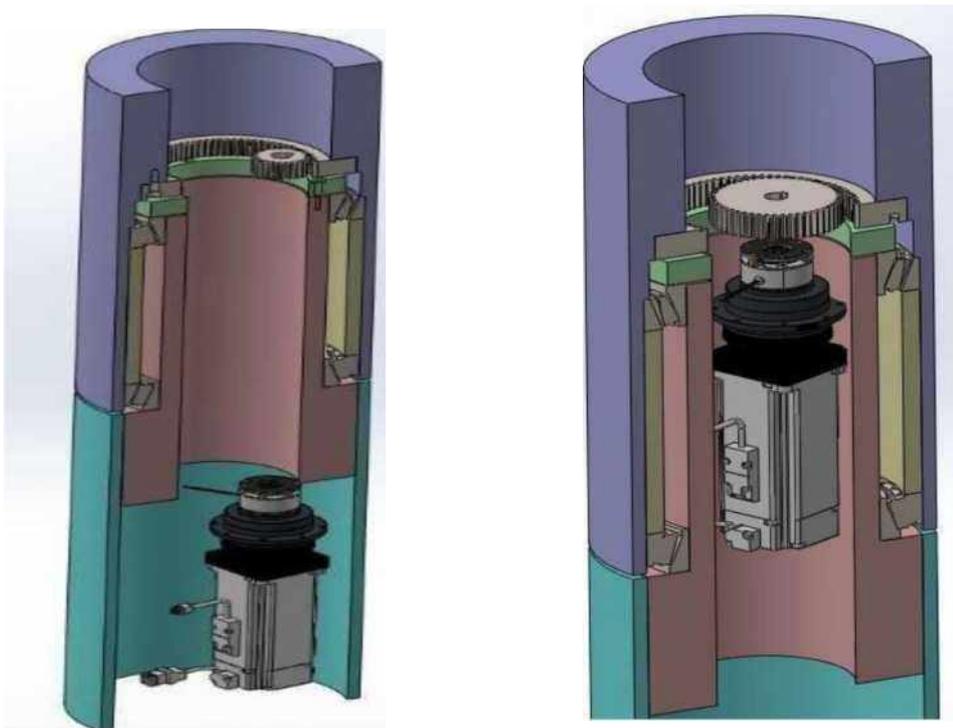
- extreme regime with feathering (moderate, stabilized axial forces), • PV disk exposed to wind (worst case, with axial forces of the order of kN).

The analysis shows that this second scenario becomes governing for the main bearing, yaw and foundation. Standardized S355 steel tubes (0219-0273 mm, thickness 8-10 mm), which provides acceptable strength, rigidity and mass.

### 6.3. Azimuthal rotation (yaw) bearing

The yaw bearing was designed as a tube-in-tube assembly, with a fixed pivot on the mast and rotating housing on the nacelle. Two tapered roller bearings, mounted "back to back", take up axial, radial loads and bending moments. Preload eliminates play and stabilizes the rigidity of the assembly.

For the drive, a transmission with an internal gear crown and pinion was chosen, driven by a servomotor through planetary reducer and electromagnetic clutch. The solution allows free- passive yaw, respectively controlled actuation for PV mode.



a) Pinion  $z_1 = 25$ ; b) Pinion  $z_1 = 50$  teeth

Figure 6.1. Section through the azimuthal rotation (yaw) bearing

#### 6.4. Rotor main bearing

For the 3 m rotor, a pair of tapered roller bearings (32948) was adopted, mounted "back to back". They simultaneously support axial, radial and tilting loads, with a very long theoretical service life. Tests have shown that, for rigidity, the distance between the bearings must be 300-350 mm and controlled pre-tightening must be ensured to prevent unloading the lower bearing.

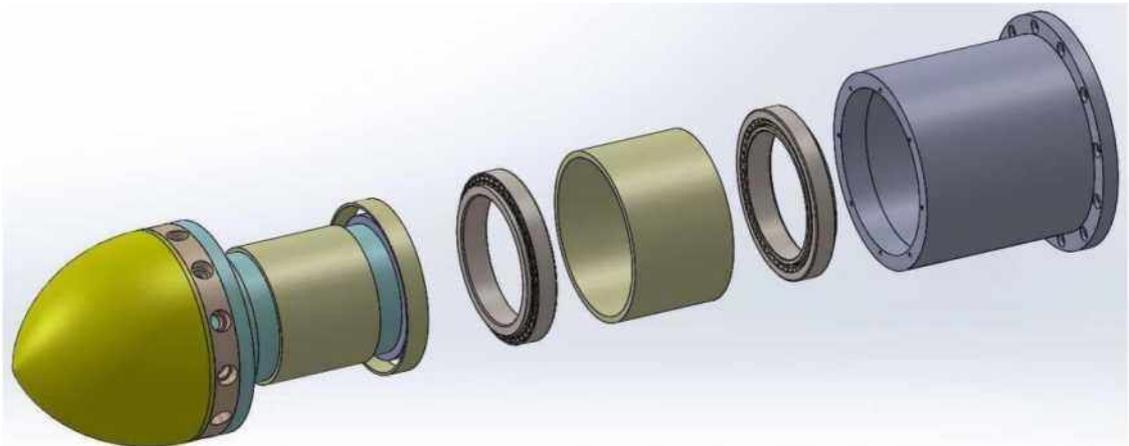


Figure 6.7. Selection of bearings for the rotor bearing

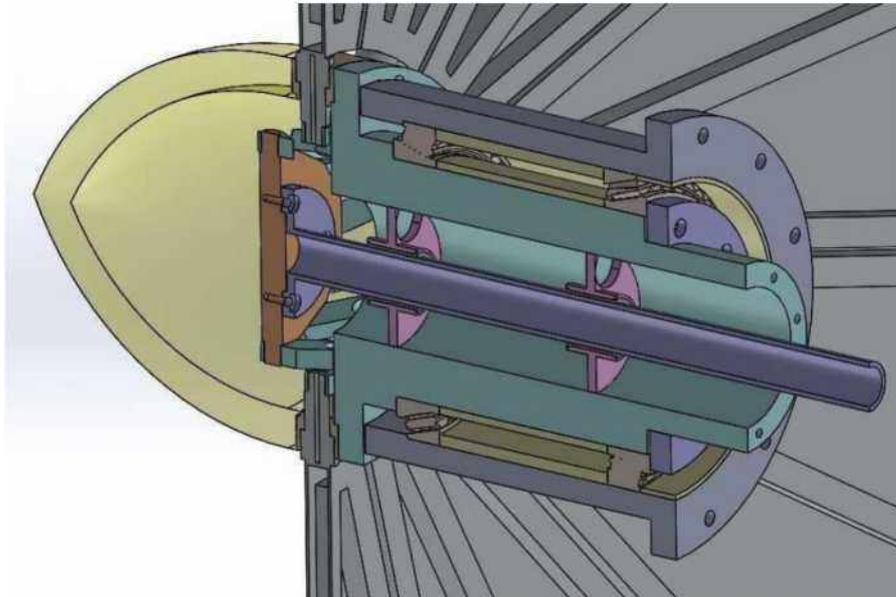


Figure 6.10 - Axial support of the rod

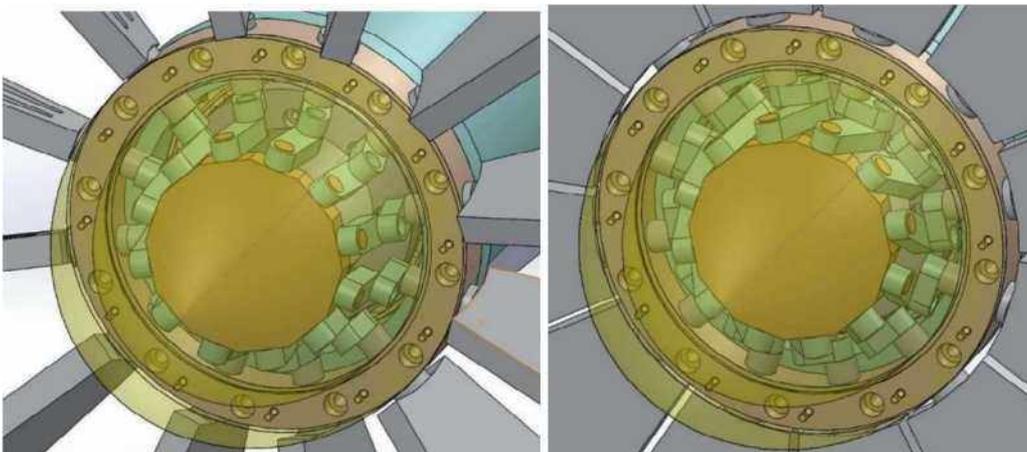
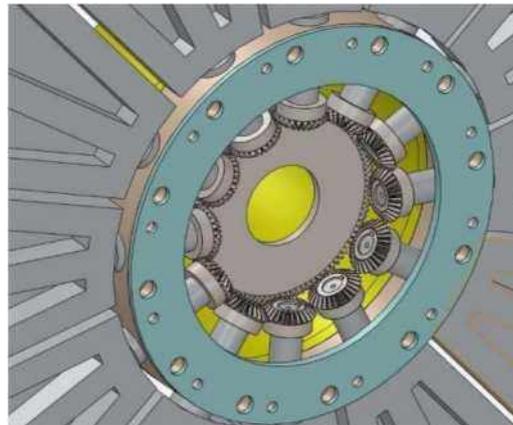
#### 6.5. Collective pitch mechanism

For the simultaneous rotation of the 12 blades, two variants were analyzed:

- Bevel gear - rigid, but complicated to implement in rotating mode.
- Polygonal plate with connecting rods - simple, compact, easy to operate with a linear actuator.

The second variant was adopted. The polygonal plate transmits the axial movement of the rod to the 12 vanes through the connecting rods, with minimal play and precise control of the pitch angle. The requirement fast switching (under 2 s for feathering) and redundancy (safe position upon loss of voltage) are satisfied.

Figure 6.8 - Bevel gear



### 6.6. Tilt mechanism

The tilt ensures the orientation of the rotor in PV mode and safe positioning during storms. The axis passes through the center of gravity of the assembly, reducing gravitational loads on the bearings and reducer.

The drive is done through a coaxial harmonic reducer, with servomotor and fail-safe brake. The support is made with tapered roller bearings mounted "back to back" in trunnion lugs, with low preload and IP65+ seals. The system allows  $\pm 60^\circ$  of tilt, with mechanical stops and absolute position sensor.

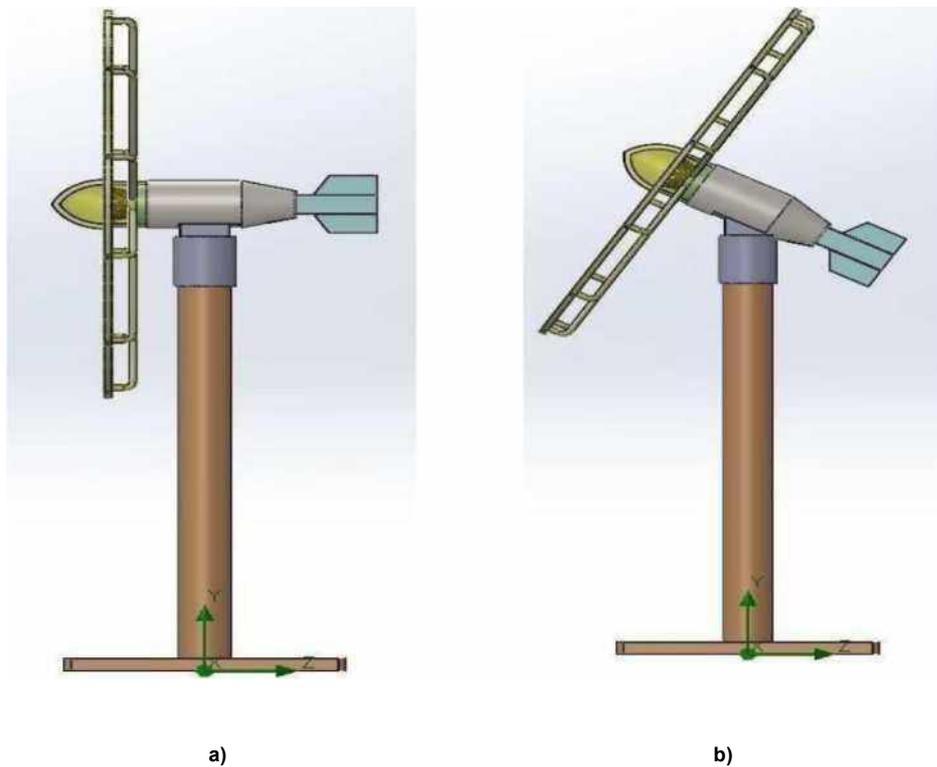


Figure 6.11 - Tilt of the plane in PV operating mode (tilt)

a) 0 degrees

b) 30 degrees - intermediate position (max. 60 degrees )

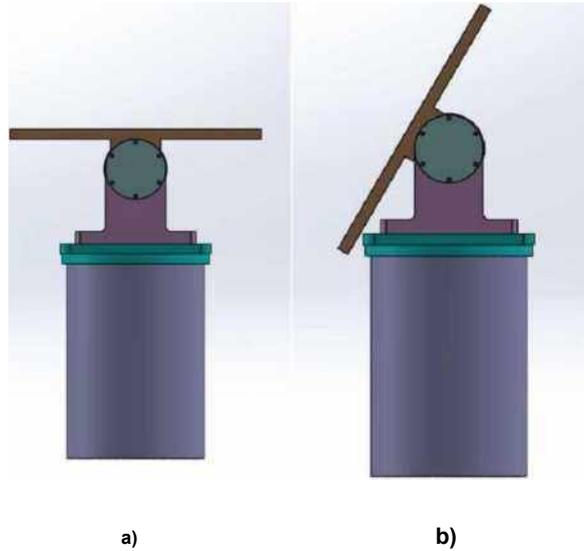


Figure 6.12 - Tilting the nacelle support plate in PV operating mode (tilt)  
 a) 0° b) 60° - end position

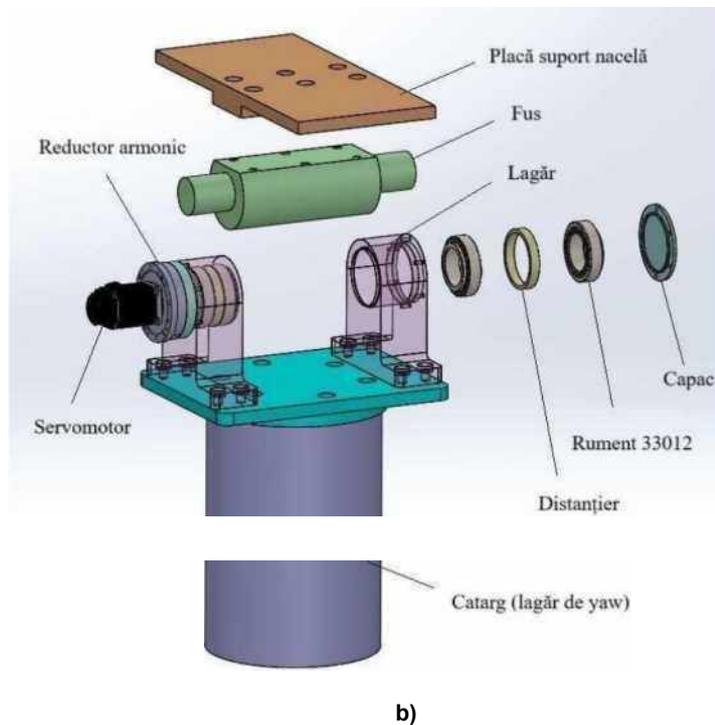


Figure 6.13 - Tilt mechanism components  
 a) tilt mechanism      b) composition of the tilt mechanism

### **Conclusions chapter 6**

The chapter defined and validated four critical mechanisms:

- **Yaw:** DB tapered roller bearing, crown and pinion transmission, servo with reducer planetary and electromagnetic clutch.
- **Main bearing:** pair of DB tapered roller bearings, sized for axial loads and moments, with very long theoretical lifetime.
- **Collective step:** mechanism with polygonal plate and connecting rods, with simple, robust and compact axial drive.
- **Tilt:** coaxial harmonic reducer, DB tapered bearings, compact and safe architecture for all regimes.

**Mechatronics integration includes absolute sensors, seals and lubrication points, wiring through slip-ring and redundancy in braking. The proposed solutions are feasible and scalable, compliant with safety requirements and ready for prototype validation.**

## GENERAL CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH DIRECTIONS

Chapter I and Chapter II establish the theoretical framework and justification of the thesis. The first demonstrates the relevance of wind-PV hybridization for grid flexibility and life cycle cost reduction. The second shows the importance of resource data quality (wind and solar), measurement methods and statistical processing, underpinning subsequent scenarios. Together, they outline the logical flow “data y scenarios y optimization y validation”, which supports the modeling and design rotor.

Chapter III confirms the mechanical feasibility of the 12-bladed rotor with peripheral stiffening ring. The main advantages: reduced root moments, robust integration of collective pitch, routing of PV cables through the hollow shaft and compatibility with IEC standards for microturbines. Critical risks (slip-ring, PV adhesive fatigue, mechanical play) are also identified, together with practical countermeasures.

Chapter IV provides aerodynamic validation:

- BEM-CFD correlation with errors below 5% at global loads;
- confirmation of the stepwise control strategy;

Chapter V validates the structural concept. In the resized configuration (Ø30 mm spindles, 50x50 mm ring, Ø40 mm spokes), the rotor complies with the IEC 61400-2 criteria and the results confirm the structural robustness and highlight the critical role of the step mechanism and the ring stiffening

Chapter VI translates the aerodynamic and structural requirements into concrete drive mechanisms:

- Azimuthal rotation (yaw) bearing with back-to-back tapered roller bearings, inner crown and servo-motorized pinion; main bearing
- sized for high moments and hollow shaft; collective pitch mechanism
- with polygonal plate and connecting rods, simple and robust; conical harmonic tilt with gear and barrings

Mechatronic integration (sensors, redundant brakes, cables, IP65) ensures safety and easy maintenance.

### **Own contributions**

The work makes a number of original contributions:

1. Defining the task paths and demonstrating the role of the peripheral ring in reducing moments at the blade root and deflections.
2. Design and argumentation of a collective pitch mechanism for 12 blades, compatible with the constraints of mass and space.
3. Establishing design cases (cut-in, nominal, extreme/feathering) and parameters key mechanics (TSR ratio - type speed ratio, pitch angle, fatigue criteria).
4. Integrating yaw and tilt requirements with safe and reliable electrical collection solutions.

These contributions are included in the specialized literature by proposing an architecture innovative hybrids and its validation through numerical and analytical methods.

The central objective

The general goal of the research is to design a coherent mechanical skeleton for a rotor wind-PV hybrid, capable of being sized and manufactured with controlled risks regarding resistance, vibrations and maintenance. This rotor forms the basis for further developments regarding energy performance, grid integration and hybrid system optimization.

By combining solar and wind resources in a single device, the work demonstrates the potential of innovative solutions that can help accelerate the energy transition and strengthen the green infrastructures of the future.

### **Future research directions**

- **Experimental validation on prototype - 3 m rotor testing with full instrumentation**
- **Advanced aerodynamics and noise - URANS/LES simulations for gusts and yaw, correlation with tests; modeling and noise reduction.**
- **Multi-objective optimization - mechanical-aero-PV design, geometry and control variables.**
- **Structural and PV laminate reliability - rotating coupon fatigue tests, verification adhesives and layering, conditional monitoring.**
- **Control and electronics - fast MPPT (<10 ms), brake-feather-dump load coordination, EMC compatibility.**
- **Mechanisms - yaw refinement, collective pitch with linear actuator, tilt with harmonic reducer; validations of wear and backlash.**
- **Packaging and nacelle - integrated CAD with cable routing, maintenance access, protections anti-corrosion and lightning protection.**
- **Certification - test plan according to IEC 61400-2 and PV standards, preparation of the certification file type-certification.**
- **Economic and ecological analysis of the prototype, scenarios with and without batteries.**
- **Scaling and piloting - 2-5 kW versions, installation on various sites and data collection for a pre-series version.**

## Bibliographic references

- 1 IPCC. AR6 Synthesis Report: Summary for Policymakers. 2023.
- 2 IEA. Renewables 2024. Market Report. 2024.
- 3 REN21. Renewables 2025 Global Status Report. 2025.
- 4 IRENA. World Energy Transitions Outlook 2024. 2024.
- 5 BloombergNEF. Battery Price Survey 2024. 2024.
- 7 EUR-Lex. Regulation (EU) 2021/1119 - European Climate Law.
- 8 European Commission. The European Green Deal - OverView.
- 9 IEA. Energy and AI. 2025.
- 10 UNFCCC. Paris Agreement. 2015.
- 11 European Environment Agency (EEA). Impacts of renewable energy use on decarbonisation and air pollutant emissions.
- 12 WHO. Ambient air quality and health.
- 13 ENTSO-E / EU Commission Reg. 2016/631 (RfG) & EN 50549.
- 14 IEEE Std 1547-2018. Standard for Interconnection of DER.
- 15 IEC 62116. Islanding prevention test procedure.
- 16 IEC 61000 (series). Electromagnetic compatibility.
- 17 European Commission. Grids, the Missing Link - EU Action Plan for Grids. 2023.
- 18 ENTSO-E. Network Code Requirements for Generators (RfG).
- 19 Fraunhofer ISE. Photovoltaics Report. 2025.
- 20 Global Market Insights. Small Wind Turbine Market Outlook 2025-2034. 2025.
- 21 US DOE. Distributed Wind Market Report: 2023 Edition. 2023
- 22 Small Wind Certification Council (SWCC). Standards—Small Wind Turbines. 2025.
- 22 Soleolico Green Power SL. Soleolico Dossier. 2023.
- 24 Martinez-Turino, S.; Mi'guez, J. Fast-MPPT Algorithms under Rapid Irradiance Change. *Electronics*, 2023.
- 25 Sopranzetti, F.; Gosselin, R. BEM-RANS Coupled Assessment of Added Mass on PV-Coated Rotors. *Wind Energy*, 2023
- 26 Johnson, GL *Wind Energy Systems*. 2nd ed. Prentice Hall, 2023.
- 27 Chrifi-Alaoui, L. et al. Overview of Photovoltaic and Wind Hybrid Systems. *Energies*, 2023.
- 28 Giedraityte, A. et al. Hybrid Renewable Energy Systems - A Review. *Appl. Sci.*, 2025.
- 29 Rosato, A. et al. Commercial Small-Scale Wind Turbines: A Review. *Energies*, 2024.
- 30 IEC 61400-2:2019. Design Requirements for Small Wind Turbines.
- 31 Hansen, MOL *Aerodynamics of Wind Turbines*. 3rd ed. Routledge, 2015.
- 32 Tchakoua, P. et al. Wind Turbine Condition Monitoring: Review. *Energies*, 2014.
- 33 NREL. Mapping Aerodynamic Loads to Structural Models: A Guide for Small Wind Turbi