



UNIVERSITA' DELLA CALABRIA

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica e Gestionale - DIMEG

Scuola di Dottorato

Scuola Pitagora in Scienze Ingegneristiche

Indirizzo

Ingegneria Meccanica

CICLO

XXVII

**Progettazione Integrata mediante Metodologie CAx di Dispositivi per lo Sfruttamento di
Energia da Fonti Rinnovabili**

**Settore Scientifico Disciplinare ING-IND/15 DISEGNO E METODI DELL'INGEGNERIA
INDUSTRIALE**

Direttore: Ch.mo Prof. Leonardo Pagnotta

Firma

Supervisore: Ing. Luigi De Napoli

Firma

Dottorando: Dott. Andrea Perrone

Indice

Indice.....	<u>1</u>
Abstract.....	<u>4</u>
Introduzione.....	<u>5</u>
1 L'energia eolica, le VAWT e le HAWT	<u>8</u>
1.1 Aerogeneratori ad asse verticale e orizzontale.....	<u>8</u>
1.1.1 Generalità.....	<u>8</u>
1.1.2 Turbine ad asse verticale.....	<u>9</u>
1.1.3 Turbine ad asse orizzontale.....	<u>11</u>
1.1.4 Tip Speed Ratio (TSR).....	<u>12</u>
1.2 Potenza prodotta dagli Aerogeneratori a Resistenza	<u>15</u>
1.3 Turbine a resistenza vs turbine a portanza.....	<u>17</u>
2 Richiami sulle ODE e sulle condizioni al contorno.....	<u>21</u>
2.1 Richiami sulle equazioni differenziali ordinarie.....	<u>21</u>
2.2 Richiami sulla dinamica del moto rigido piano.....	<u>22</u>
2.3 Richiami sulle condizioni al contorno.....	<u>22</u>
2.3.1 Condizione al contorno di Neumann.....	<u>22</u>
2.3.2 Equazioni differenziali ordinarie (Neumann).....	<u>22</u>
2.3.3 Condizione al contorno di Dirichlet.....	<u>23</u>
2.3.4 Equazioni differenziali ordinarie (Dirichelet).....	<u>23</u>
2.3.5 Condizione al contorno di Cauchy.....	<u>23</u>
3 Scelta dei Software.....	<u>26</u>
3.1 Prefazione.....	<u>26</u>
3.2 Pro-Engineer/Creo.....	<u>27</u>
3.3 modellazione parametrica ed esplicita.....	<u>28</u>
3.3.1 Modellazione solida parametrica.....	<u>28</u>
3.3.2 Modellazione esplicita	<u>28</u>
3.3.3 Modellazione solida parametrica VS modellazione esplicita.....	<u>29</u>
3.4 Comsol Multiphysics.....	<u>30</u>
3.5 MathCad.....	<u>31</u>
3.5.1 La modellazione CAD e il nuovo LiveLink™ for Creo™ Parametric.....	<u>32</u>
3.5.2 Creare e associare modelli COMSOL Multiphysics con progetti PTC® Creo® Parametric™.....	<u>33</u>
3.5.3 Modificare un progetto e preservarne la fisica.....	<u>34</u>
3.5.4 Preparare progetti CAD per la simulazione.....	<u>34</u>
3.6 Importazione ed esportazione di file CAD.....	<u>35</u>
4 La formulazione ALE e il modello multifisico.....	<u>36</u>
4.1 Introduzione.....	<u>36</u>
4.1.1 Formulazione Lagrangiana.....	<u>36</u>
4.1.2 Formulazione Euleriana.....	<u>37</u>
4.2 Descrizioni di movimento.....	<u>39</u>
4.2.1 Premessa.....	<u>39</u>
4.2.2 Punto di vista Euleriano e Lagrangiano.....	<u>39</u>
4.2.3 Descrizione cinematica di ALE.....	<u>42</u>
4.3 Modellazione attraverso la metodologia CAE integrata.....	<u>46</u>
4.4 Implementazione del modello matematico.....	<u>52</u>
4.5 Integrazione con il modello CAD.....	<u>53</u>
4.6 Applicazione della procedura di progettazione.....	<u>54</u>

4.7 Modellazione in Comsol Multiphysics.....	<u>55</u>
4.7.1 Modello 2D in Comsol Multiphysics.....	<u>55</u>
4.7.2 Modello 3D in Comsol Multiphysics.....	<u>58</u>
4.7.3 Equazioni nel Modello	<u>60</u>
4.7.4 Impostazioni per l'ODE.....	<u>61</u>
4.7.5 Impostazioni per il Moving Mesh.....	<u>62</u>
4.8 Valori e andamento del Drag coefficient	<u>63</u>
4.9 Calcolo del numero di Reynolds.....	<u>64</u>
4.10 Calcolo del numero di MACH	<u>66</u>
4.11 Validazione del Modello	<u>66</u>
4.11.1 Validazione del Modello Statico.....	<u>66</u>
4.11.2 Validazione del Modello Dinamico.....	<u>67</u>
4.12 Analisi dei risultati.....	<u>70</u>
4.12.1 Andamento delle pressioni sulla pala in funzione dell'angolazione.....	<u>70</u>
4.12.2 Andamento delle pressioni sulla pala in funzione della velocità.....	<u>78</u>
4.12.3 Andamento dei momenti e della potenza in funzione del tempo.....	<u>80</u>
4.12.4 Andamento della rotazione, della velocità e dell'accelerazione angolare in funzione del tempo.....	<u>82</u>
5 Turbina Sperimentale	<u>84</u>
5.1 In quale mercato si inserisce la turbina?.....	<u>84</u>
5.2 Descrizione della turbina sperimentale.....	<u>84</u>
5.3 Il movimento delle pale della turbina	<u>87</u>
5.4 Turbina sperimentale in Comsol MultiPhysics.....	<u>87</u>
5.5 ODE con Vincoli in Comsol.....	<u>88</u>
5.6 Interfaccia Matlab-Comsol.....	<u>88</u>
5.7 ODE per l'asse orizzontale.....	<u>90</u>
5.8 Risposta in frequenza ODE asse orizzontale e calcolo dei parametri di stabilizzazione dell'ODE.....	<u>90</u>
5.9 Verifica del funzionamento dei vincoli per l'ODE.....	<u>91</u>
5.10 Implementazione e soluzione del modello Multifisico.....	<u>94</u>
5.11 Realizzazione del prototipo fisico.....	<u>98</u>
5.11.1 Generatore a Magneti Permanenti.....	<u>98</u>
5.11.2 Inverter.....	<u>100</u>
5.11.3 Raddrizzatore.....	<u>101</u>
5.11.4 Schema di Collegamento.....	<u>102</u>
5.12 Considerazioni sulla turbina sperimentale	<u>103</u>
6 Conclusioni e sviluppi futuri.....	<u>104</u>
6.1 Integrazione CAD / CAE	<u>104</u>
6.2 Integrazione con un database di Cd, secondo le varie forme di pala.....	<u>105</u>
6.3 Integrazione con un database avente le proprietà fluidodinamiche di vari fluidi.	<u>105</u>
6.4 Diminuzione del CPU time per il modello con ODE con vincoli.....	<u>105</u>
7 Appendice : implementazioni dei modelli e impostazioni - integrazioni software .	<u>106</u>
7.1 Scelta dei moduli in Comsol Multiphysics.....	<u>106</u>
7.1.1 Modulo di meccanica strutturale	<u>106</u>
7.1.2 Modulo di Fluidodinamica	<u>107</u>
7.1.3 Modulo di movimento della mesh.....	<u>108</u>
7.1.4 Modulo per ODE.....	<u>109</u>
7.1.5 Identificativo dei moduli.....	<u>110</u>
7.2 Impostazioni moduli.....	<u>110</u>

7.2.1	Identificativi dei domini.....	110
7.2.2	Impostazioni modulo CFD.....	112
7.2.3	Impostazioni Modulo Strutturale.....	114
7.2.4	Impostazioni modulo EDO.....	115
7.2.5	Impostazioni modulo ALE.....	116
7.3	Inserimento delle sonde.....	117
7.4	Utilizzo delle variabili dipendenti per la convergenza della soluzione.....	119
7.5	Impostazioni per la soluzione del modello.....	120
7.5.1	Scelta della tipologia di Mesh.....	120
7.5.2	Impostazione della mesh.....	121
7.5.3	Impostazioni del solutore.....	124
7.5.4	L'operatore reacf.....	125
7.5.5	Impostazione flusso incomprimibile.....	125
7.6	Integrazione di Creo Parametric con MathCad Prime.....	127
7.7	Implementazione forze e momento.....	130
7.7.1	Implementazione della Forza lungo "x".....	130
7.7.2	Implementazione del Braccio della forza F_x	130
7.7.3	Implementazione della Forza lungo "y".....	130
7.7.4	Implementazione del Braccio della forza F_y	130
7.7.5	Implementazione del momento dovuto alla forza F_x sulla prima pala....	130
7.7.6	Implementazione del momento dovuto alla forza F_y sulla prima pala....	130
7.7.7	Implementazioni sulla seconda pala.....	131
7.7.8	Implementazione del momento risultante.....	131
7.7.9	Implementazione calcolo baricentro.....	131
7.7.10	Implementazione momento polare d'inerzia.....	131
7.7.11	Implementazione momento ribaltante.....	132
7.8	Implementazione delle funzioni di vincolo.....	132
	Ringraziamenti.....	134
	Bibliografia.....	135

Abstract

Lo studio di una turbina eolica è un perfetto esempio di progetto in cui è richiesto un team di progettazione interdisciplinare, infatti per un tale progetto sono necessari progettisti meccanici, strutturali e CFD.

Inoltre, negli ultimi anni, il Multi Domain Design è stato sostenuto dal continuo sviluppo di software per la computer-aided design: l'obiettivo finale è quello di proporre gli strumenti che assistono il progettista in tutte le fasi del progetto.

Il Multi Domain design, illustrato in questo elaborato, è basato su come progettare dispositivi che permettono lo sfruttamento delle energie rinnovabili in cui c'è lo spostamento di fluido, e non si tratta né di gestione dei processi e né della producibilità.

In particolare, sarà posta enfasi sull'integrazione tra CAD e software matematico di tipo generale e sull'integrazione CAD-CAE.

Introduzione

Il continuo sviluppo di software atti alla progettazione assistita, insieme all'incessante aumento del rapporto prestazioni/costi dei calcolatori, permette al progettista di avere a sua disposizione degli strumenti che lo assistono sempre più in tutte le fasi della progettazione e che gli consentono di ottimizzare i vari processi di produzione. Tutto ciò comporta grossi vantaggi dal punto di vista economico, che molto spesso si ripercuotono anche sull'impatto ambientale dei prodotti.

Infatti, quando si riesce a ottimizzare un processo produttivo, a diminuire lo sfrido di lavorazione, a migliorare le prestazioni del prodotto o a diminuirne il peso (e quindi ad utilizzare meno materia prime) si hanno degli enormi benefici anche sull'impatto ambientale. Da qui la necessità di utilizzare strumenti sempre più performanti che assistano i progettisti. In particolare, nell'ambito della ricerca verrà posta particolare enfasi alla integrazione tra CAD e software matematico di tipo generale e all'integrazione CAD-CAE-CAX.

L'oggetto del dottorato è quello di mettere a punto un pacchetto per la progettazione integrata di dispositivi che sfruttano l'energia rinnovabile.

Gli step di tale progetto di ricerca sono:

- I. Come meglio integrare i singoli pacchetti software e modellare il prodotto
- II. Sperimentazione numerica con inizio di sperimentazione sul campo
- III. Messa a punto dell'ambiente di sviluppo realizzato e validazione di quest'ultimo

Si integreranno quelli che sono i software all'avanguardia della modellazione parametrica, come ad es. Pro-Engineer, NX-Unigraphics e CATIA, inoltre saranno presi in analisi sia strumenti prettamente matematici, come ad es. MatLab, Mathematica Mathcad, che software prettamente ingegneristici come ad es. Comsol MultiPhysics, MSC ed ANSYS.

Lo scopo finale è quello di avere un'unica postazione da cui poter controllare tutto: dall'idea al prodotto finito.

Le difficoltà dello studio su una turbina, ad esempio, sono dovute a dover analizzare contemporaneamente le problematiche cineto-dinamiche, vibrazionali e fluidodinamiche, e data la difficoltà della geometria in esame si devono usare

strumenti integrati per avere contemporaneamente tutto sotto controllo.

Nella figura sottostante (Figura 1) è illustrata la mappa concettuale per una macchina a fluido

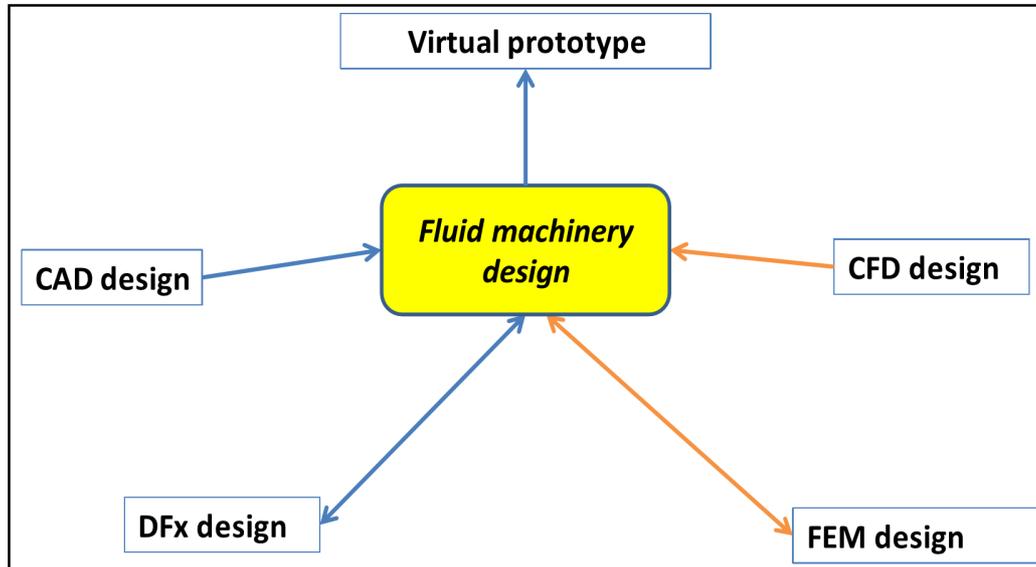


Figura 1: Multi domain design di una macchina a fluido

Per poter risolvere un problema simile sarà necessario creare un modello multifisico che contemporaneamente:

- risolva le equazioni di Navier-Stokes,
- calcoli gli sforzi sulla struttura e le vibrazioni dovute ad essi utilizzando come ingresso lo sforzo prodotto dal fluido sulla pala della turbina,
- risolva le equazioni che, utilizzando come dati in ingresso l'accelerazione angolare della turbina e le sue proprietà geometriche e di massa, permettono alla mesh di seguire il movimento della turbina - così la mesh di metodo ALE (ovvero Arbitrary Lagrangian-Eulerian method) conterrà in ogni istante tutte le informazioni dell'interazione Fluido-Struttura.

Inoltre sarà integrata la modellazione CAD con un software matematico, si legheranno bidirezionalmente le quote di progetto ai valori ottenuti dal modello multifisico in modo da riuscire a trovare facilmente il giusto compromesso tra il Design For X (facilità di realizzazione, di assemblaggio, basso costo, basso impatto ambientale, facilità di riciclaggio, ecc.) e l'ottimizzazione dal punto di vista energetico (che invece è l'obiettivo

del modello multifisico) (Figura 2)

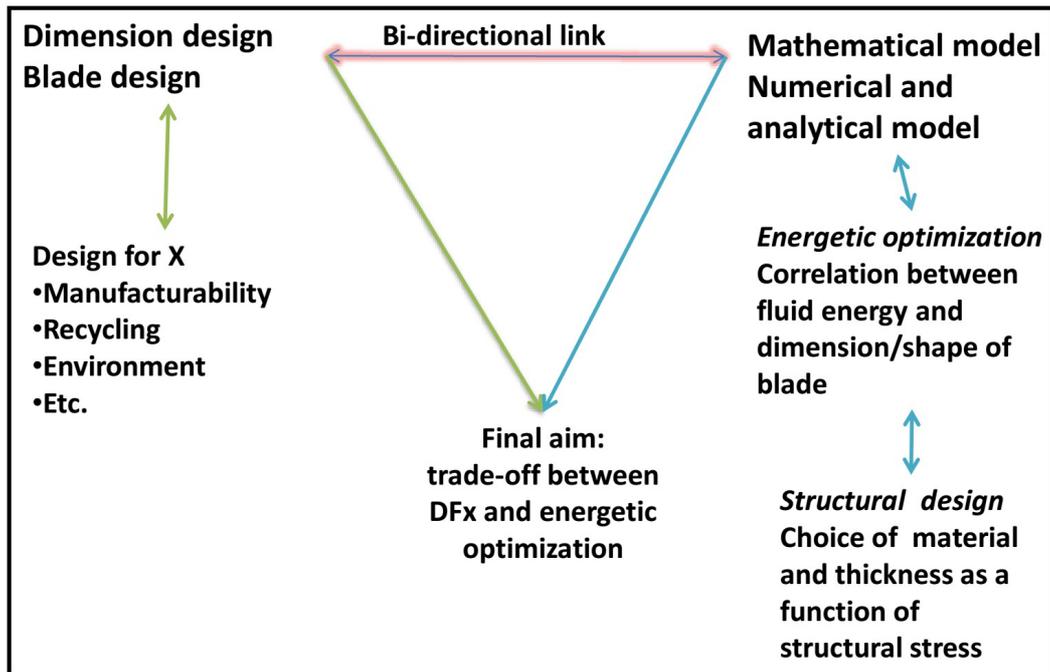


Figura 2 Integrazione tra CAD e software matematico

Nella parte finale dell'elaborato saranno riportate tutte le implementazioni e le impostazioni software necessarie alla creazione degli strumenti di analisi appena descritti, ed inoltre sarà accennata l'applicazione di tali strumenti di analisi su una turbina sperimentale.

1 L'energia eolica, le VAWT e le HAWT

1.1 Aerogeneratori ad asse verticale e orizzontale

1.1.1 Generalità

La turbina eolica detta anche aerogeneratore è la macchina per eccellenza che trasforma l'energia cinetica di un flusso d'aria in lavoro meccanico ed eventualmente converte quest'ultimo in lavoro elettrico. Le masse d'aria in movimento fanno girare le pale di un'elica, queste a loro volta sono collegate ad un generatore che trasforma l'energia meccanica in energia elettrica. Le pale del generatore eolico sono fissate su un elemento meccanico definito mozzo con il quale formano l'elemento dell'aerogeneratore chiamato rotore. Le turbine eoliche sono svariate e classificabili in funzione della tipologia d'impiego e dell'energia sfruttata, della posizione dell'asse di rotazione, della taglia di potenza, del numero di pale e di molti altri fattori. Un'importante classificazione delle turbine è quella che distingue tra asse orizzontale e asse verticale, a seconda della posizione dell'asse attorno a cui ruota il rotore. Riconosciamo quindi:

- Turbine ad asse verticale – VAWT (Vertical Axis Wind Turbine)
- Turbine ad asse orizzontale – HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine)

Nella categoria delle VAWT, rientrano turbine di semplice costruzione, che non presentano problemi di orientamento, hanno una struttura autoportante, un minor costo, ma minore efficienza e maggiori sollecitazioni. Distinguiamo quindi:

- Turbine di tipo Savonius
- Turbine di tipo Darrieus
- Turbine ibride Darrieus-Savonius

Nella categoria delle turbine HAWT invece, rientrano innanzitutto quelle caratterizzate da una tecnologia ormai collaudata dall'esperienza che le rende altamente efficienti e quindi in grado di ricavare maggiori valori di energia per un dato ingombro frontale. Esse inoltre non presentano problemi di avviamento, di orientamento e di trasmissione di energia elettrica al suolo.

Distinguiamo:

- Turbine sopravento (upwind)
- Turbine sottovento (downwind)

Nella pratica le turbine ad asse orizzontale sono estremamente più diffuse di quelle ad asse verticale, che non hanno raggiunto un livello di affidabilità e di resa che le renda competitive rispetto alle prime e per questo motivo maggiormente utilizzate nel micro-eolico.

1.1.2 Turbine ad asse verticale

Esistono diversi modelli di turbina ad asse verticale, che possono essere classificati in due categorie, in base al principio sfruttato per produrre la coppia di rotazione: turbina a resistenza e turbine a portanza.

La Figura 3, raffigurante un rotore Savonius, è un tipico esempio di turbina a resistenza. Per questo modello le pareti curve disposte emisimmetricamente generano una differenza di resistenza che è sempre attiva nel senso della rotazione. Indipendentemente da come è strutturata la turbina, una parte di essa ruoterà in direzione opposta al vento e una a favore. La turbina Savonius concentra i suoi focus progettuali per evitare questo problema: essa è infatti costituita da due semigusci (nella versione più semplice) i quali non sono però uniti al rotore della turbina, bensì sono disposti in modo che una parte dei semigusci sia in comune e faccia fluire l'aria di spinta anche nella parte controvento.

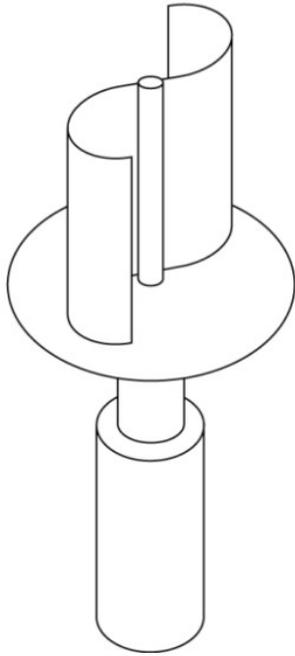


Figura 3 Rotore Savonius.

Nel caso delle turbine a portanza (rotore Darrieus), le pareti sono dei profili aerodinamici disposti in un piano orizzontale e liberi di ruotare intorno ad un asse verticale. Questo tipo di turbina è analoga a quelle ad asse orizzontale e viene analizzato con le stesse teorie aerodinamiche. Tuttavia lo studio delle turbine a portanza è piuttosto complesso a causa del fatto che durante la rotazione nel piano orizzontale la disposizione dei profili alari rispetto al vento cambia ciclicamente cambiando periodicamente l'incidenza. Il problema di questa tipologia di turbine è l'avviamento, in quanto la coppia ottenibile a fermo è nulla qualunque sia l'intensità del vento, e la turbina non è in grado di avviarsi spontaneamente, quindi deve essere avviata con un motore ausiliario che la porti ad una velocità minima di rotazione per l'autosostentamento. Per le turbine Savonius ciò non avviene poiché la differenza di resistenza offerta dal vento dalle due superfici curve esiste anche a macchina ferma garantendo l'avvio spontaneo della macchina. L'efficienza delle turbine a portanza è più alta di quella delle turbine a resistenza, ma resta sempre inferiore a quella delle turbine ad asse orizzontale. Questo perché durante una parte della rotazione la pala è inefficiente e l'energia del vento non può essere sfruttata.

1.1.3 Turbine ad asse orizzontale

La struttura di un generatore eolico con rotore ad asse orizzontale (Figura 4) è semplice: presenta infatti un sostegno (formato da fondamenta e torre) che reca alla sua sommità una gondola o navicella. In questo involucro sono contenuti l'albero di trasmissione lento, il moltiplicatore di giri, l'albero veloce, il generatore elettrico, i dispositivi di controllo e ausiliari. All'estremità dell'albero lento è fissato il rotore, costituito dal mozzo sul quale sono montate le pale. La forma delle pale è disegnata in modo tale che presentano profili geometrici differenti, così che il flusso dell'aria che le investe crea in corrispondenza della superficie superiore una zona di depressione rispetto alla pressione sulla faccia inferiore. Questa differenza di pressione produce sulla superficie della pala eolica una forza chiamata portanza aerodinamica, analogamente a quanto accade per le ali degli aerei, azionando così il rotore. Dal rotore, l'energia cinetica del vento viene trasmessa a un generatore di corrente. Quindi il generatore eolico funziona a seconda della forza del vento.

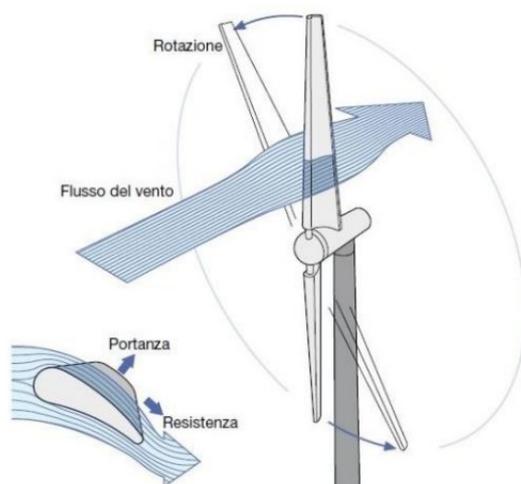


Figura 4 Interazione flusso ventoso – pala del rotore eolico.

1.1.4 Tip Speed Ratio (TSR)

Le caratteristiche aerodinamiche di una pala sono solitamente assegnate mediante il legame TSR- C_p (Figura 5). Il TSR (Tip Speed Ratio), identificato con il parametro λ , è definito come il rapporto tra la velocità tangenziale all'estremità delle pale e la velocità del vento in ingresso al tubo di flusso

$$\lambda = \frac{v_t}{v_1} = \frac{\Omega \cdot R}{v_1}$$

dove R è il raggio del rotore e Ω è la velocità angolare.



Figura 5: Legame $\lambda - C_p$ ($\beta = 1^\circ$)

Per una data pala, il legame $\lambda - C_p$ dipende dall'angolo di Pitch. Mantenendo costante l'angolo di Pitch, si possono fare le seguenti considerazioni:

- esiste un unico valore di TSR per cui l'efficienza di conversione è massima (C_{pmax}) dipendentemente dal tipo di pala;
- al variare della velocità del vento v_1 occorre variare volutamente la velocità di rotazione delle pale (come descritto nei capitoli seguenti) se si vuole mantenere il TSR costante e pari al valore per cui si ha C_{pmax} ;
- per valori bassi di TSR si ha una riduzione della portanza ed un aumento della resistenza fino al raggiungimento dello stallo;

- per valori alti di TSR si ha una riduzione sia della portanza che della resistenza in una condizione detta “di fuga” (In altri termini, per valori elevati di TSR, le pale ruotano così velocemente che di fatto costituiscono una parete rispetto al vento incidente, che quindi la scavalca anziché attraversarla con il conseguente annullamento della potenza estratta);
- il TSR ottimale dipende dal numero di pale n e minore è il numero di pale, più velocemente devono ruotare le pale stesse per estrarre la massima potenza dal vento (TSR aumenta);
- la forma della curva del legame TSR- C_p dipende dal tipo di turbina (Figura 6).

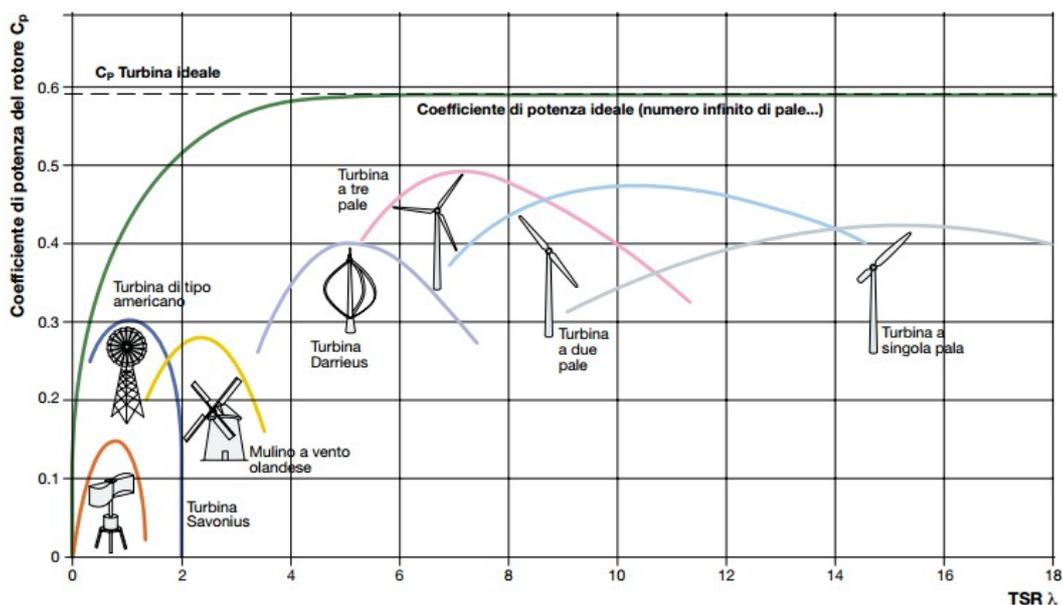


Figura 6: C_p in funzione del TSR e del tipo di turbina

Vengono definite “turbine veloci”, le turbine con un elevato valore ottimale di TSR, mentre “turbine lente”, le turbine con un TSR ottimale basso. Nella Tabella 1, con una velocità del vento di 7m/s, sono riportati i valori di velocità tangenziale periferica e angolare (calcolati con la equazione 1) per diversi tipi di turbine, valori determinati mediante i relativi TSR ottimali riportati in Figura 6).

Come si può notare dai valori in Tabella 1, le turbine ad asse orizzontale sono turbine veloci, poiché hanno un’elevata velocità tangenziale periferica, pur avendo una velocità angolare ridotta dato il raggio del rotore tipicamente molto maggiore di quello

delle turbine ad asse verticale.

Tipo di turbina	TSR ottimale λ	Velocità tangenziale V_t [m/s]	Raggio rotore R [m]	Velocità angolare Ω [giri/min]
VAWT Savonius	1	7	1	67
VAWT Darrieus	5	35	1.5	223
HAWT bipala	10	70	28	24
HAWT tripla	7	49	45	10

Tabella 1: TSR ottimale per VAWT e HAWT

Al fine di massimizzare l'energia annua prodotta il coefficiente di potenza C_p dovrebbe essere mantenuto al suo valore massimo durante il funzionamento dell'aerogeneratore per più tempo possibile, anche al variare della velocità del vento. Pertanto la velocità di rotazione del rotore dovrebbe variare per mantenere il TSR al valore che massimizza il C_p . In Figura 7 sono indicate le curve di potenza prodotta in funzione della velocità del rotore ed aventi come parametro la velocità del vento: per massimizzare la produzione energetica la turbina dovrebbe ruotare ad una velocità a cui corrisponde il valore massimo di potenza per ogni velocità del vento nel sito d'installazione.

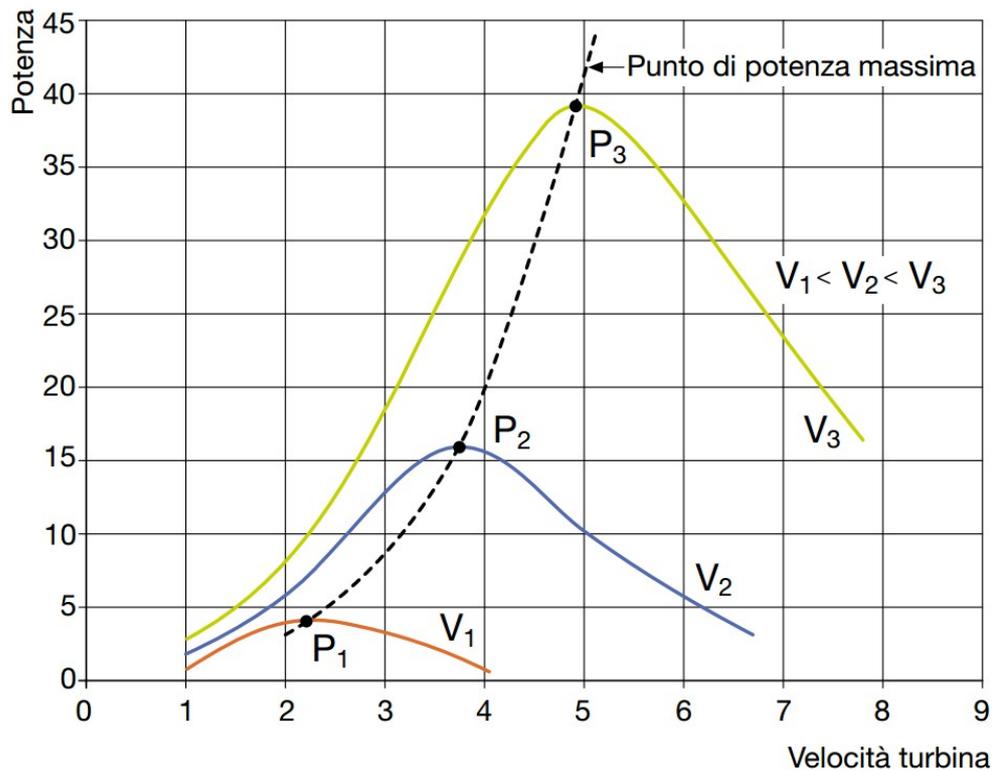


Figura 7: Curve di potenza in funzione della velocità del rotore

1.2 Potenza prodotta dagli Aerogeneratori a Resistenza

La Potenza estratta all'albero della macchina è il prodotto Forza F_D (generata dalla resistenza aerodinamica) per la velocità di traslazione v (vedi Figura 8). La resistenza dipende dal C_D del dispositivo e dalla sua velocità relativa u_{rel} rispetto alla velocità del vento u :

$$u_r = u - v$$

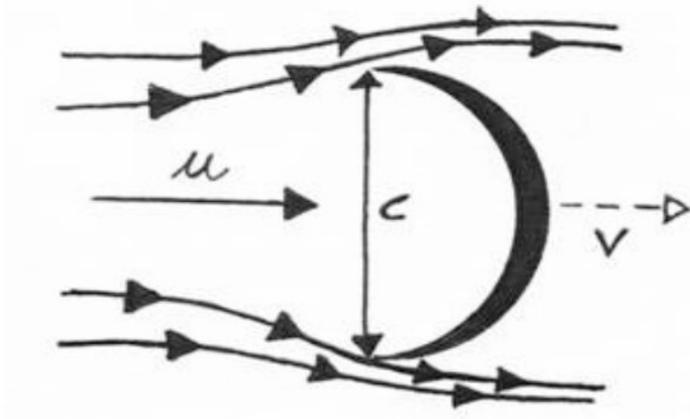


Figura 8 Velocità del vento e velocità della pala

Potenza=Forza×Velocità:

$$P = F_d \cdot v$$

Potenza Ottenuta $P = \frac{1}{2} C_d \rho \cdot A_f \cdot (u - v)^2 \cdot v$

Potenza Disponibile $P_d = \frac{1}{2} \rho \cdot A_f \cdot u^3$

Perchè il modello fisico sia sostenibile la velocità relativa deve essere maggiore di zero ovvero: $v < u$.

Il fattore di potenza C_p è definito come il rapporto tra la potenza estratta e la potenza del vento che agisce su di un area pari a quella proiettata nella direzione ortogonale ad u del dispositivo. Quindi si ha

$$C_p = \frac{P}{P_D} = \frac{\frac{1}{2} C_d \rho \cdot A_f \cdot (u - v)^2 \cdot v}{\frac{1}{2} \rho \cdot A_f \cdot u^3} = \frac{C_D \cdot v}{u} \cdot \left(1 - \frac{v}{u}\right)^2 = C_D (1 - \lambda)^2 \cdot \lambda$$

Avendo indicato con λ il rapporto cinetico o tip-speed ratio :

$$\lambda = \frac{v}{u}$$

Nota su tip-speed ratio : è il parametro che mette in relazione la velocità del vento con la velocità di rotazione della macchina. In funzione di tale grandezza vengono in genere diagrammate tutte le caratteristiche della turbina e mediante il quale si effettua la classificazione tra macchine veloci e macchine lente.

Per trovare il massimo del coefficiente di potenza basta fare la derivata e risolvere l'equazione che ne scaturisce:

$$\frac{dC_p}{d\lambda} = -2C_D(1-\lambda)\cdot\lambda + C_D(1-\lambda)^2 = 0 \rightarrow \lambda = \frac{1}{3}$$

Inserendo nell'espressione del C_p il valore del tip-speed ratio così trovata si ha

$$C_{p \text{ Max}} = \frac{4}{27} C_{D \text{ Max}}$$

1.3 Turbine a resistenza vs turbine a portanza

Nelle turbine a resistenza la forza motrice che fa ruotare l'asse della turbina è la forza aerodinamica di resistenza risultante F_r , la quale è funzione del coefficiente di resistenza C_b e della velocità relativa del vento $v = v_1 - v_t = v_1 - \Omega \cdot r$ rispetto alla superficie del rotore (Figura 9) secondo la relazione [3.32] riportata di seguito

$$F_r = \frac{1}{2} \cdot C_b \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot C_b \cdot A \cdot \rho \cdot (v_1 - \Omega \cdot r)^2$$

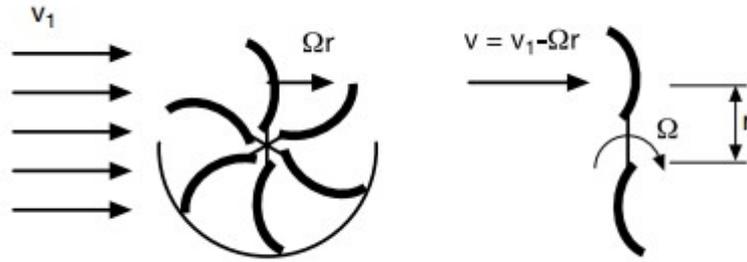


Figura 9: Velocità del vento in VAWT

La potenza meccanica estratta dal vento e trasmessa al rotore è il prodotto della forza complessiva di resistenza F_r per la velocità periferica equivalente della superficie del rotore v_t nel punto di applicazione della forza:

$$P = F_r \cdot v_t = \frac{1}{2} C_b \cdot A \cdot \rho \cdot (v_1 - \Omega \cdot r)^2 \cdot \Omega \cdot r = \frac{1}{2} [C_b \cdot \lambda \cdot (1 - \lambda)^2] \cdot A \cdot v_1^3 \quad 3$$

Il coefficiente di potenza $C_p = C_b \cdot \lambda \cdot (1 - \lambda)^2$ (rappresentato nel grafico in Figura 10 in funzione del coefficiente λ che rappresenta il TSR) è nullo, oltre che per $\lambda = 0$ (rotore fermo) anche per il valore limite $\lambda = 1$ (velocità di rotazione delle pale pari alla velocità del vento con conseguente annullamento della forza di resistenza).

Il valore massimo del coefficiente di potenza è raggiunto per $\lambda = 1/3$ ed è pari a 0.08.

Come si può notare il valore massimo teoricamente raggiungibile da C_p nelle turbine a resistenza è decisamente inferiore a quello raggiungibile nelle turbine a portanza soggette al limite di Betz ($C_{pmax} = 16/27 = 0.59$): ciò rappresenta il principale limite, in termini di efficienza di estrazione di potenza dal vento, delle turbine a resistenza rispetto a quelle a portanza.

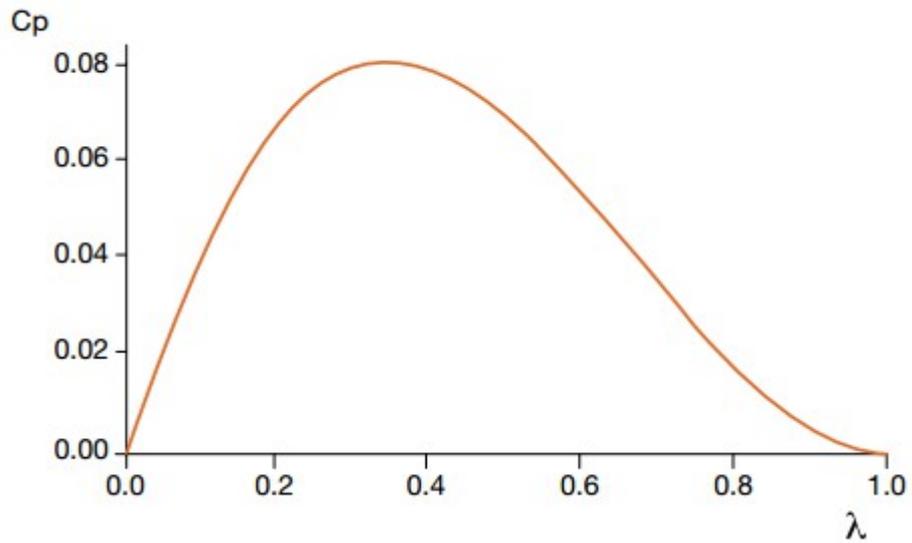


Figura 10: Coefficiente di portanza in funzione del TSR in VAWT

Tale limitazione dipende sia dal minor valore del coefficiente di resistenza C_b rispetto a quello di portanza C_a in condizioni non di stallo, sia dal principio costruttivo delle turbine a resistenza, in cui la velocità relativa del vento v rispetto alla superficie delle pale è sempre inferiore alla velocità assoluta del vento v_1 (Figura 9):

$$v = v_1 - \Omega \cdot r = v_1 \cdot (1 - \lambda) \quad \text{con } \lambda < 1 \quad 4$$

Nelle turbine a portanza invece la velocità relativa del flusso d'aria che lambisce le pale è sempre superiore alla velocità assoluta del vento (Figura 11):

$$v = \sqrt{v_1^2 + (\Omega \cdot r)^2} = v_1 \cdot \sqrt{1 + \lambda^2} \quad \text{con } \lambda \text{ fino a } 10-12 \quad 5$$

Poiché la forza motrice di portanza F_p è funzione sia del coefficiente C_a che della velocità relativa v , si ha che nelle turbine a portanza la forza motrice sviluppata è significativamente maggiore di quella che si crea nelle turbine a resistenza, il che si traduce in una maggiore coppia motrice resa all'albero del rotore e quindi in una maggiore efficienza di estrazione di potenza dal vento.

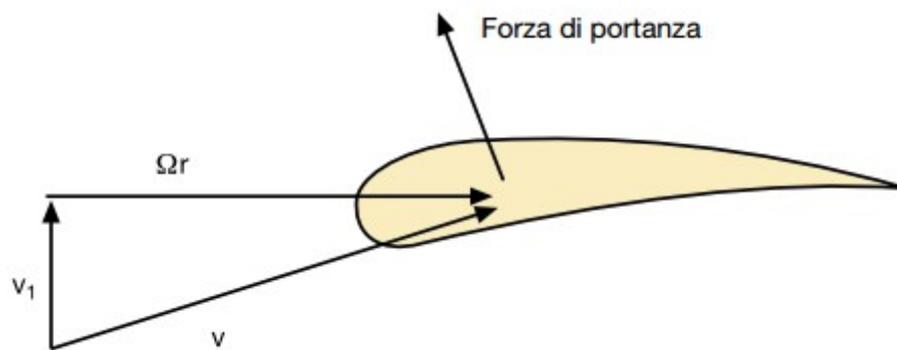


Figura 11: Vento su una pala di HAWT

[1]

2 Richiami sulle ODE e sulle condizioni al contorno

2.1 Richiami sulle equazioni differenziali ordinarie

Nell'analisi matematica, un'equazione differenziale è una relazione tra una funzione $u(x)$ incognita ed alcune sue derivate.

Nel caso in cui u sia una funzione

$$u: I \rightarrow \mathfrak{R}$$

definita in un intervallo I di \mathfrak{R} si parla di equazione differenziale ordinaria (abbreviato con ODE, acronimo di *ordinary differential equation*). Un esempio di ODE è la relazione

$$\ddot{u}(x): u(x) + \dot{u}(x)$$

La scrittura più generale di un'equazione differenziale ordinaria (in una variabile) di ordine n può essere espressa nella forma:

$$f(x, u(x), \dot{u}(x), \dots, u^n(x))$$

Bene noi tutti sappiamo che è possibile descrivere la maggior parte dei fenomeni fisici tramite equazioni differenziali più o meno complesse.

Il procedimento che si usa per costruire un modello matematico partendo da un fenomeno fisico è sostanzialmente quello messo in evidenza dal seguente schema (Figura 12).

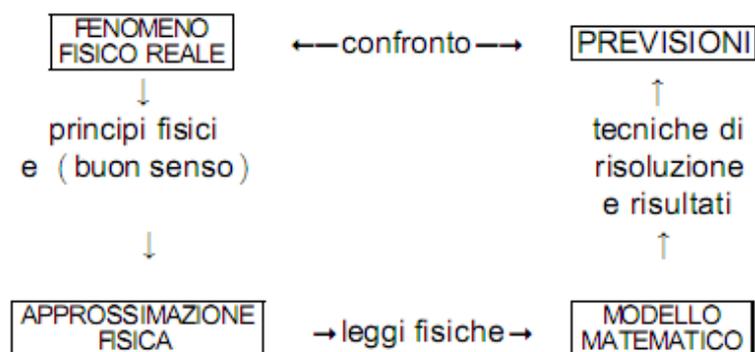


Figura 12: Procedimento per costruire un modello matematico

2.2 Richiami sulla dinamica del moto rigido piano

Un corpo rigido piano ha tre gradi di libertà: le coordinate x, y del baricentro e l'angolo di rotazione attorno all'asse z . le equazioni cardinali della dinamica sono (sistema di equazioni 6):

$$\left\{ \begin{array}{l} m_x \ddot{g} = R_x + R_x' \\ m_y \ddot{g} = R_y + R_y' \\ J_z \ddot{\theta} = M_z + M_z' \end{array} \right\} \quad 6$$

(dove l'operatore “..” indica la derivata seconda rispetto al tempo)

L'asse perpendicolare z è al piano del moto passante per il baricentro del corpo e I_z è il momento di inerzia rispetto a tale asse

Dove R sono le risultanti delle forze (M dei momenti) e R' le risultanti delle reazioni vincolari.

2.3 Richiami sulle condizioni al contorno

2.3.1 Condizione al contorno di Neumann

In matematica, le condizioni al contorno di Neumann (o di secondo tipo) sono un tipo di condizione al contorno, così chiamate in onore di Carl Gottfried Neumann.

Quando vengono imposte su una equazione differenziale ordinaria o una alle derivate parziali, specificano i valori che la derivata di una soluzione deve assumere sul contorno del dominio.

2.3.2 Equazioni differenziali ordinarie (Neumann)

Nel caso di un'equazione differenziale ordinaria definita su un intervallo a, b , per esempio:

$$\ddot{y} + y = 0$$

la condizione al contorno di Neumann assume la forma:

$$\begin{aligned}y'(a) &= \alpha_1 \\ y'(b) &= \alpha_2\end{aligned}$$

dove α_1 e α_2 sono valori dati.

2.3.3 Condizione al contorno di Dirichlet

In matematica, una **condizione al contorno di Dirichlet**, il cui nome è dovuto al matematico Peter Gustav Lejeune Dirichlet (1805–1859), è una particolare condizione al contorno imposta in un'equazione differenziale, ordinaria o alle derivate parziali, che specifica i valori che la soluzione deve assumere su una superficie, per esempio

$$y = f(r, t) .$$

2.3.4 Equazioni differenziali ordinarie (Dirichlet)

Nel caso delle equazioni differenziali ordinarie nella variabile $y(x)$, se il dominio è definito (del tipo $[a, b]$) le condizioni al contorno di Dirichlet prendono la forma:

$$\begin{aligned}y(a) &= \alpha_1 \\ y(b) &= \alpha_2\end{aligned}$$

dove α_1 e α_2 sono dei valori dati dal problema.

2.3.5 Condizione al contorno di Cauchy

In matematica, una **condizione al contorno di Cauchy**, il cui nome si deve al

matematico francese Augustin Louis Cauchy, è una condizione al contorno utilizzata nello studio di equazioni differenziali ordinarie o alle derivate parziali, in cui sono dati il valore della funzione incognita sui bordi del dominio di definizione del problema differenziale, e il valore della sua derivata direzionale normale a tale superficie. Ciò corrisponde a imporre sia una condizione al contorno di Neumann che una condizione al contorno di Dirichlet.

In un'equazione differenziale ordinaria del secondo ordine per avere una particolare soluzione si deve specificare il valore della funzione incognita e della sua derivata in un dato punto α iniziale o della frontiera del dominio di definizione dell'equazione:

$$\begin{aligned} y(a) &= \alpha \\ y'(b) &= \beta \end{aligned}$$

Le condizioni al contorno di Cauchy generalizzano questo tipo di impostazione. Scrivendo le derivate parziali come:

$$\begin{aligned} u_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ u_{xy} &= \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \end{aligned}$$

e considerando un'equazione alle derivate parziali (PDE) del tipo:

$$\psi_{xx} + \psi_{yy} = \psi(x, y)$$

si ha un dominio bidimensionale la cui frontiera è una curva parametrizzata da:

$$\begin{aligned} x &= \xi(s) \\ y &= \eta(s) \end{aligned}$$

In modo simile al caso dell'equazione ordinaria del secondo ordine, in ogni punto della

frontiera del dominio della PDE si devono conoscere il valore della funzione $\psi(s)$ e la sua derivata normale alla frontiera:

$$\frac{d\psi}{dn}(s) = n \cdot \nabla \psi$$

dove $\nabla \psi(s)$ è il gradiente. Solitamente il parametro s è il tempo.

[2], [3], [4]

3 Scelta dei Software

3.1 Prefazione

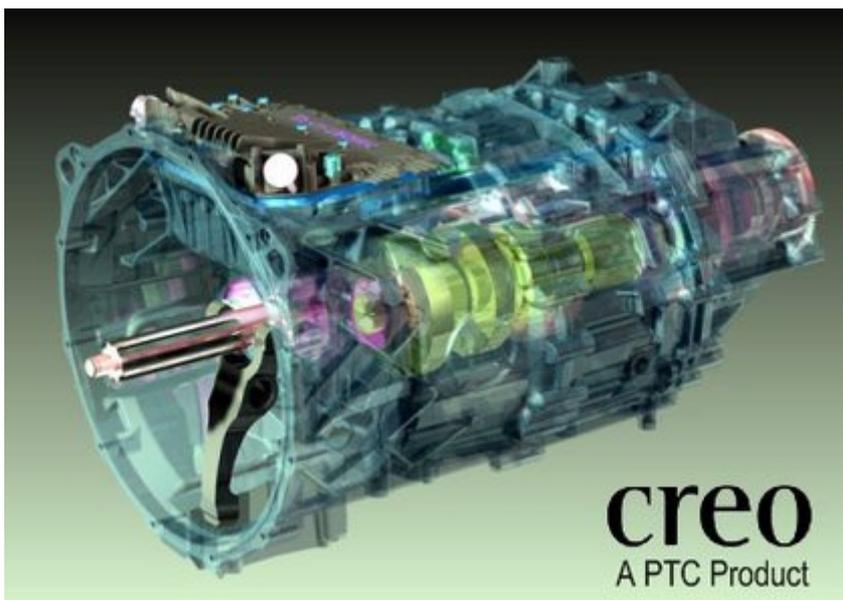
Durante il primo anno del dottorato di ricerca sono stati esaminati quelli che sono i software all'avanguardia della modellazione parametrica, come ad es. Pro-Engineer, NX-Unigraphics, Solidworks e CATIA, inoltre sono stati presi in analisi sia strumenti prettamente matematici, come ad es. MatLab, Mathematica e Mathcad, sia software prettamente ingegneristici come ad es. Comsol MultiPhysics, MSC ed ANSYS.

Per quanto riguarda il software di modellazione la scelta è ricaduta su Pro-Engineer in quanto, oltre ad essere il CAD parametrico di cui ho le maggiori conoscenze, è il software CAD che meglio s'integra con gli altri pacchetti software.

Tra i software matematici è stato scelto Mathcad; esso in assoluto è meno performante rispetto a Mathematica e MatLab, che rappresentano rispettivamente il top per il calcolo simbolico (il primo) e per il calcolo numerico il secondo (MatLab), ma è (Mathcad) un buon compromesso tra i due software prima citati poiché permette di usare indistintamente sia il calcolo simbolico sia quello (il calcolo) numerico in modo relativamente semplice. Inoltre, Mathcad è un software principalmente sviluppato per il calcolo, la verifica e la documentazione di calcoli ingegneristici, quindi si adatta particolarmente bene a un utilizzo integrato con altri applicativi come Pro-Engineer. Difatti, è possibile legare i due software bidirezionalmente, cioè è possibile creare un legame bidirezionale tra quelle che sono le principali quote geometriche di progetto del dispositivo e il modello matematico realizzato in MathCad. MathCad avrà come input le dimensioni geometriche che sono oggetto dell'analisi, e restituirà come output il valore estratto dal modello matematico definito al suo interno; il tutto avverrà senza dover lanciare il software MathCad ma direttamente dall'ambiente di modellazione di Pro-Engineer.

Passando ai software CAE, invece, il più adatto a risolvere questa problematica è Comsol MultiPhysics; nonostante non sia il più userfriendly, tuttavia, esso offre la possibilità di realizzare toolkit "ad hoc" per ogni esigenza.

3.2 Pro-Engineer/Creo



Pro/ENGINEER (comunemente noto come Pro/E o ProE) è un modellatore CAD tridimensionale parametrico creato dalla Parametric Technology Corporation (PTC). Utilizza un approccio basato su feature ed è un sistema orientato alla meccanica. I suoi concorrenti diretti sono SIEMENS-NX e CATIA, mentre in certi ambiti anche sistemi a minore scalabilità quali SolidWorks, Inventor o Solid Edge possono costituire un'alternativa.

Pro/ENGINEER è un sistema CAD/CAM/CAE integrato volto all'ingegneria meccanica e

quindi si tratta di una suite di prodotti. Molto più comunemente, però, con questo nome si intende riferirsi al nucleo centrale, ovvero il modellatore solido creato dal Dott. Samuel P. Geisberg nella metà degli anni 80. Esso ha costituito un importante impulso nella storia dei sistemi CAD, avendo introdotto il concetto di Parametric, Feature-based Solid Modeling ovvero modellazione solida parametrica basata su feature; nel panorama odierno dei sistemi MCAD, pressoché tutti i software hanno adottato questo paradigma sebbene sussistano delle differenze verso l'approccio alla parametricità del modello, alla gestione degli eventi ed alle tecnologie matematiche ed informatiche per realizzarli.

3.3 modellazione parametrica ed esplicita

Vantaggi principali modellazione esplicita:

- Creazione e modifica dei dati di progettazione in tempo reale.
- Modifica del lavoro con tecniche dirette di taglia/incolla, spinta e trazione e trascinarsi della selezione.
- Esplorazione di concetti e variazioni tramite un approccio CAD 3D diretto.

3.3.1 Modellazione solida parametrica

Una variazione della modellazione solida classica che ha dato grande impulso allo sviluppo di applicazioni CAD è stata l'introduzione del concetto di solido parametrico basato su features, che si differenzia dal concetto di modellazione solida tradizionale in quanto il solido viene creato sulla base di operazioni comparabili a quelle da effettuare per realizzare un pezzo reale. Nella modellazione parametrica, inoltre, i solidi sono governati e messi tra loro in relazione da parametri di tipo fisico, matematico o geometrico.

3.3.2 Modellazione esplicita

Con esse è possibile creare progetti 3D in modo semplice e rapido tramite interazioni al

volto dirette con la geometria del modello.

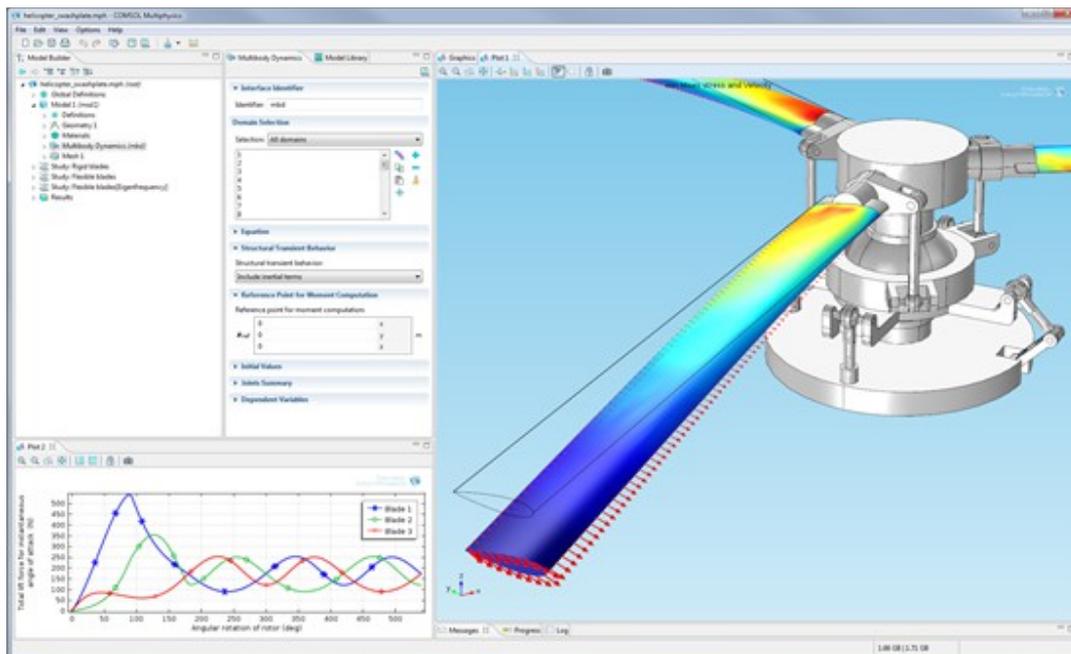
Con l'approccio della modellazione esplicita per la progettazione 3D, l'interazione è con la geometria del modello e non con un'intricata sequenza di features di design. Questo rende più facile la formazione iniziale per il software. Ma significa anche che i progettisti che lavorano con un sistema CAD 3D esplicito possono facilmente prendere un disegno realizzato da altri proprio come chiunque può immediatamente aprire e continuare a lavorare su un documento di Microsoft Word.

Quando i progettisti riutilizzano un modello, prendono un disegno esistente 3D CAD e lo trasformano radicalmente con tagli/copia/incolla della geometria in modo da giungere a un nuovo modello che non ha relazioni con il modello originale. Mediante l'approccio esplicito, si ha un'accelerazione dello sviluppo della produzione riutilizzando disegni già esistenti in nuovi e completamente differenti prodotti.

3.3.3 Modellazione solida parametrica VS modellazione esplicita

Anche con la funzionalità di modellazione diretta, l'approccio parametrico è ancora oggi progettato per sfruttare le informazioni incorporate nel prodotto. Diversamente, l'approccio esplicito, invece, limita intenzionalmente la quantità di informazioni acquisite come parte della definizione del modello al fine di fornire un processo di progettazione dei prodotti realmente leggero e flessibile.

3.4 Comsol Multiphysics

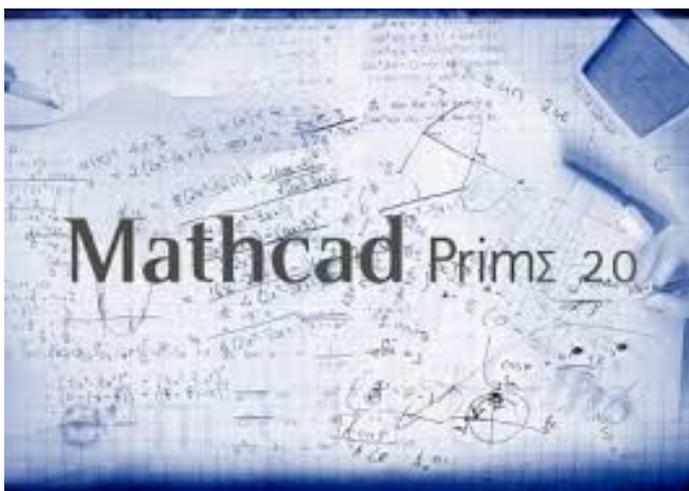


COMSOL Multiphysics® è una piattaforma software per uso generale basata su metodi numerici avanzati, finalizzata alla modellazione e alla simulazione di problemi basati sulla fisica. Con COMSOL Multiphysics sarà possibile tener conto di fenomeni multifisici o accoppiati.

COMSOL offre soluzioni software per la modellazione multifisica di un ampio spettro di applicazioni, in ambito sia industriale sia accademico, che consentono di analizzare e simulare più fenomeni fisici in relazione tra loro, senza limitazioni sulle tipologie di applicazioni e sul numero di fisiche considerate. Il software può essere utilizzato per la simulazione di applicazioni in molteplici ambiti: dalla progettazione e ottimizzazione di sonde a ultrasuoni per l'*imaging* (diagnostica per immagini) biomedicale alla produzione di detersivi e additivi, dalla progettazione di antenne all'analisi termica degli edifici. In questo ultimo caso, le tipologie di analisi che si possono effettuare spaziano dal recupero di edifici storici alla progettazione e ottimizzazione di nuovi edifici.

COMSOL Multiphysics e tutti i suoi moduli possono essere facilmente integrati con i principali strumenti CAD presenti sul mercato (AutoCAD, Inventor, Pro/ENGINEER, SolidWorks, SpaceClaim, Creo Parametric, Solid Edge, CATIA V5) ed ECAD. La connessione tra il software e gli strumenti CAD può anche essere di tipo associativo e bidirezionale grazie al supporto dei moduli **LiveLink**. In questo caso, la variazione di una *feature* del modello CAD comporta in COMSOL Multiphysics l'aggiornamento automatico della geometria, lasciando invariate tutte le altre impostazioni del modello.

3.5 MathCad



Mathcad è un software principalmente sviluppato per il calcolo, la verifica e la

documentazione di calcoli ingegneristici. Fu introdotto nel 1986 per DOS ed è stato il primo software ad introdurre la scrittura di formule matematiche con la risoluzione in tempo reale.

Con Mathcad gli ingegneri possono completare, documentare e condividere facilmente risultati di calcolo e progettazione. L'interfaccia di Mathcad accetta e visualizza notazione matematica con rilevazione automatica delle unità di misura tramite sequenze di tasti o clic su tavolozze di menu, senza che siano richieste operazioni di programmazione. Mathcad si distingue per la facilità di utilizzo. È infatti la prima soluzione che consente agli utenti di risolvere e documentare simultaneamente i calcoli di progettazione in un unico foglio di lavoro riutilizzabile, che può essere salvato o facilmente convertito in diversi formati. L'interfaccia intuitiva di Mathcad combina notazione matematica standard attiva, testo e grafici in un formato presentabile che consente la raccolta di informazioni, il riutilizzo e la verifica della progettazione per una migliore qualità dei prodotti.

Mathcad è parte di un ampio sistema di sviluppo di prodotto, infatti esso si integra con le altre soluzioni di PTC per lo sviluppo dei prodotti, tra cui Creo Elements / Pro, Windchill e Creo Elements / View. La sua integrazione in tempo reale a livello di funzionalità con Creo Elements / Pro-E consente ai modelli analitici di Mathcad di essere utilizzati direttamente nella guida della geometria CAD, e mediante la sua integrazione all'interno di Windchill consente calcoli dal vivo per essere riutilizzati e ri-applicato verso più modelli di progettazione.

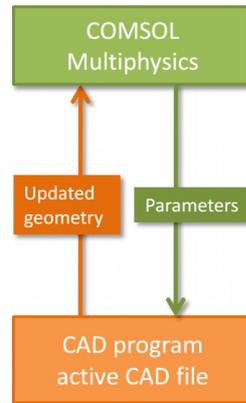
3.5.1 La modellazione CAD e il nuovo LiveLink™ for Creo™ Parametric

Con il LiveLink for Creo Parametric COMSOL Multiphysics si integra completamente con il software di progettazione di PTC. Ciascuna modifica apportata nel modello CAD di Creo Parametric viene automaticamente propagata nella geometria associata in COMSOL Mutliphysics mentre le impostazioni fisiche restano invariate, la connessione bidirezionale dei due software è così garantita.

Inoltre tutti i parametri specificati in Creo Parametric sono disponibili e modificabili in COMSOL Multiphysics, grazie a questa ulteriore integrazione è possibile realizzare una

simulazione dove la geometria è parametrizzata e la soluzione ottimizzata viene automaticamente propagata verso il programma CAD.

- Physics settings retained in COMSOL model
- Automatic mesh
- Automatic solve
- Automatic result plots



3.5.2 Creare e associare modelli COMSOL Multiphysics con progetti PTC® Creo® Parametric™

LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™ è un componente aggiuntivo di COMSOL Multiphysics che associa senza soluzione di continuità i progetti 3D creati con il sistema CAD PTC® Creo® Parametric™ alle geometrie del modello COMSOL Multiphysics ai fini della simulazione. Creo Parametric è uno standard di settore per il CAD 3D e include un set completo di strumenti per la massima flessibilità e produttività. COMSOL Multiphysics con LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™ consente di sfruttare le funzionalità avanzate di Creo Parametric per creare progetti innovativi e quindi integrarli in un modello di COMSOL Multiphysics per l'analisi e l'ottimizzazione.

LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™ aggiorna il flusso di lavoro di progettazione con le funzionalità della simulazione multifisica per comprendere meglio il comportamento di un prodotto o progetto nell'ambiente operativo di destinazione. I modelli in COMSOL Multiphysics possono includere praticamente tutti gli effetti fisici rilevanti e le loro interazioni per simulare accuratamente un progetto. LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™ include funzionalità per preparare le geometrie CAD alla simulazione e per aggiornare i progetti durante la simulazione per l'uso con sweep parametrici

automatizzati o studi di ottimizzazione.

3.5.3 Modificare un progetto e preservarne la fisica

LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™ sincronizza i progetti creati in Creo Parametric con i modelli COMSOL Multiphysics e propaga automaticamente le modifiche mentre i due programmi sono in esecuzione contemporaneamente. Non è necessario esportare o importare manualmente i modelli CAD in COMSOL Multiphysics ad ogni modifica. I parametri, comprese le quote o le posizioni dei componenti, definiti in Creo Parametric sono accessibili in modo iterativo da COMSOL Multiphysics per poter eseguire simulazioni con sweep parametrici e studi di ottimizzazione. Grazie alla sincronizzazione diretta, LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™ conserva le definizioni fisiche associate sui domini e superfici del modello anche quando si aggiungono o modificano le entità geometriche di un progetto.

3.5.4 Preparare progetti CAD per la simulazione

LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™ prevede una funzionalità per identificare automaticamente e riparare le anomalie geometriche di un progetto ed eseguire operazioni di semplificazione per preparare un modello CAD alla simulazione. Durante l'importazione di un modello CAD vengono applicate tolleranze predefinite atte a identificare i problemi e assicurare che le superfici o i solidi importati siano definiti correttamente. Anche la chiusura degli spazi vuoti è un'operazione automatica durante l'importazione ed è intesa a garantire che si crei un solido adatto per la mesh e la simulazione. Dettagli piccoli e spesso insignificanti o anomalie geometriche creano zone a mesh molto fitta, che richiedono tempi di simulazione maggiori. Dopo l'importazione, sarà possibile semplificare ulteriormente la geometria identificando questi dettagli minuti sulla base delle impostazioni di tolleranza e decidere quali elementi rimuovere tra quelli identificati che rispondono ai criteri specificati. I dettagli geometrici eliminabili con questa tecnica comprendono frammenti, piccole facce o lati ed elementi progettuali come i raggi di raccordo.

Le operazioni di geometria virtuale di COMSOL Multiphysics sono un mezzo alternativo per ridurre la complessità computazionale della simulazione dovuta a una mesh fitta. La geometria virtuale si crea selezionando i piccoli dettagli geometrici di un progetto che gli strumenti di mesh dovranno ignorare. Durante l'eliminazione delle entità geometriche, l'algoritmo chiude i fori risultanti allungando o accorciando le facce o i lati adiacenti. Tale operazione modifica inevitabilmente la curvatura locale dell'oggetto geometrico. Le operazioni di geometria virtuale consentono di mantenere la curvatura originale, poiché le superfici e i lati non sono rimossi o modificati, ma solo nascosti. La mesh di simulazione su una geometria virtuale riduce le risorse computazionali necessarie ma rimane comunque basata sul progetto originale, anche nei minimi dettagli per quelle applicazioni di simulazione che li richiedono.

3.6 Importazione ed esportazione di file CAD

I file CAD, anziché collegarli o sincronizzarli direttamente con un modello COMSOL Multiphysics, possono essere importati ed esportati in svariati formati. Con LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™, è possibile importare i file CAD 3D nei formati Creo Parametric (.prt, .asm), ma anche in uno dei formati più diffusi come Parasolid®, ACIS®, STEP e IGES. Inoltre, si possono importare i file nativi dei sistemi CAD Inventor® e SOLIDWORKS®. L'opzione File Import for CATIA® V5 consente di importare il formato di file nativo di questo sistema. I modelli CAD 3D importati vengono convertiti in geometrie Parasolid per la modifica nell'ambiente di COMSOL Multiphysics. Le modifiche alla geometria Parasolid in COMSOL Multiphysics possono includere operazioni booleane o l'aggiunta di domini fluidi a un modello che altrimenti sarebbe composto di soli solidi. Se si modifica la geometria importata o si creano nuove geometrie per illustrare un concetto, si potrà esportare il progetto così modificato in formato Parasolid o ACIS per condividere il lavoro svolto con i colleghi che utilizzano altri strumenti CAD.

4 La formulazione ALE e il modello multifisico

4.1 Introduzione

Lo studio della dinamica della turbina in esame richiede un approccio multifisico; infatti il problema da risolvere vede da una parte l'analisi della coppia generata dall'interazione fluido struttura, dall'altra il calcolo cinetodinamico della rotazione generata dalla coppia precedentemente calcolata. Tali analisi, in fase progettuale, sono state svolte mediante il software multifisico Comsol MultiPhysics nel quale è presente il modulo "Moving Mesh" che permette di simulare modelli nei quali la geometria (in verità la mesh) cambia forma (nel caso in questione si ha una variazione della posizione del rotore rispetto allo statore) a causa dei fenomeni fisici implementati nel modello. Il "Moving Mesh" è basato sulla formulazione ALE (Arbitrary Lagrangian – Eulerian) della quale è stato discusso nel seguito del paragrafo dopo aver richiamato i concetti fondamentali della formulazione Lagrangiana ed Euleriana, che sono state sintetizzate al meglio nella formulazione ALE.

4.1.1 Formulazione Lagrangiana

Ogni nodo individuale del dominio computazionale (della mesh computazionale) segue l'associata punto materiale durante il movimento; esso è principalmente usato nella meccanica strutturale. La descrizione Lagrangiana segue un semplice tracciamento delle superfici libere e delle interfacce (connessioni) tra differenti materiali. Facilita anche il trattamento di materiali la cui storia (deformazioni già avvenute, ecc.) dipende da relazioni costitutive. La sua debolezza sta nella incapacità di seguire le grandi distorsioni del dominio computazionale, senza ricorrere a frequenti operazioni di remeshing (operazione che data una configurazione deformata a cui è associata una mesh molto distorta vi associa una nuova mesh, ovviamente non più distorta, e mantiene la configurazione raggiunta).

4.1.2 Formulazione Euleriana

Tali algoritmi sono ampiamente utilizzati nella dinamica dei fluidi. Qui la mesh computazionale è fissa e il continuo muove in riferimenti alla griglia. Nella descrizione Euleriana le grandi distorsioni del movimento del continuo possono essere trattate con relativa facilità, ma in genere questo va a scapito della precisa definizione dell'interfaccia (connessione) e della risoluzione del flusso di informazioni.

A causa dei difetti della descrizioni puramente Lagrangiana ed Euleriana, è stata sviluppata una tecnica che riesce, in una certa misura, a combinare le migliori caratteristiche di entrambi gli approcci Lagrangiano e Euleriano. Tale tecnica è nota come la descrizione arbitraria Lagrangiana - Euleriana (ALE). Nella descrizione ALE, i nodi della maglia di calcolo possono essere spostati con il continuo nel normale modo Lagrangiano, oppure resteranno fissi in modo Euleriano, o ancora mossi in qualche modo arbitrariamente specificato a dare una continua capacità di "rezoning". Grazie a questa libertà di movimento del dominio computazionale offerta dalla formulazione ALE, può essere seguita una maggiore distorsione del continuo di quella che sarebbe consentita da un metodo puramente Lagrangiano, con una risoluzione migliore di quella offerta da un approccio puramente Euleriano.

Nelle figure seguenti viene mostrato:

- un esempio unidimensionale di mesh Lagrangiana, Euleriana e ALE e di movimento della particella (Figura 13)
- Descrizione di Lagrange vs ALE in un dominio bidimensionale (Figura 14)

Nel capitolo sono stati usati indifferentemente i termini particella materiale, punto materiale e particella per indicare un oggetto il quale ha una massa e una posizione osservabile nello spazio, ma non ha una estensione geometrica, essendo confinata in un singolo punto.

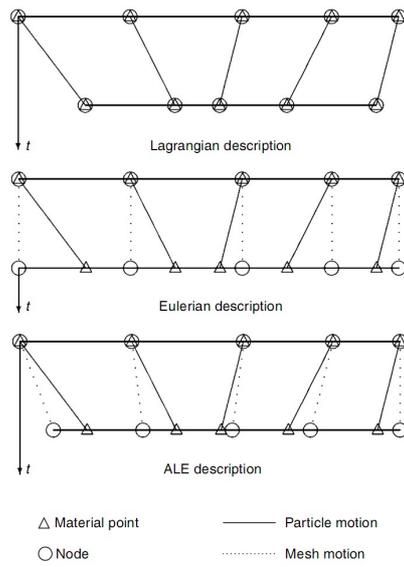


Figura 13: Esempio unidimensionale di mesh Lagrangiana, Euleriana e ALE e di movimento della particella,

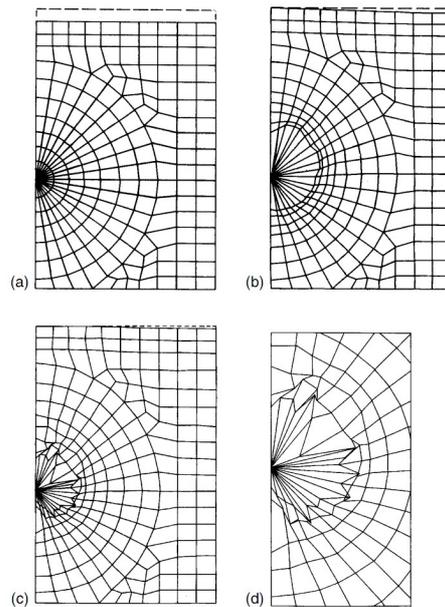


Figura 14: Lagrangian versus ALE descriptions: (a) initial mesh; (b) ALE mesh at $t = 1$ ms; (c) Lagrangian mesh $t = 1$ ms; (d) details of interface in Lagrangian description,

4.2 Descrizioni di movimento

4.2.1 Premessa

Poiché la descrizione della formulazione ALE è una generalizzazione delle formulazioni Lagrangiana e Euleriana, di seguito viene riportato un breve riassunto di queste descrizioni classiche del movimento.

4.2.2 Punto di vista Euleriano e Lagrangiano

Nella meccanica del continuo sono comunemente utilizzati due domini: il dominio materiale $R\mathbf{X} \subset R^{n_{sd}}$, con n_{sd} dimensioni spaziali, composto dai punti materiali X , e il dominio spaziale R_x , costituito da punti spaziali x .

Il punto di vista Lagrangiano consiste nel seguire i punti materiali del continuo nel loro movimento. A tale fine, come mostrato in Figura 15 si introduce una griglia computazionale, la quale segue il continuo nel suo movimento essendo i nodi della griglia collegati in modo permanente allo stesso punto materiale. Le coordinate del materiale, X , consentono di identificare la configurazione di riferimento, R_x .

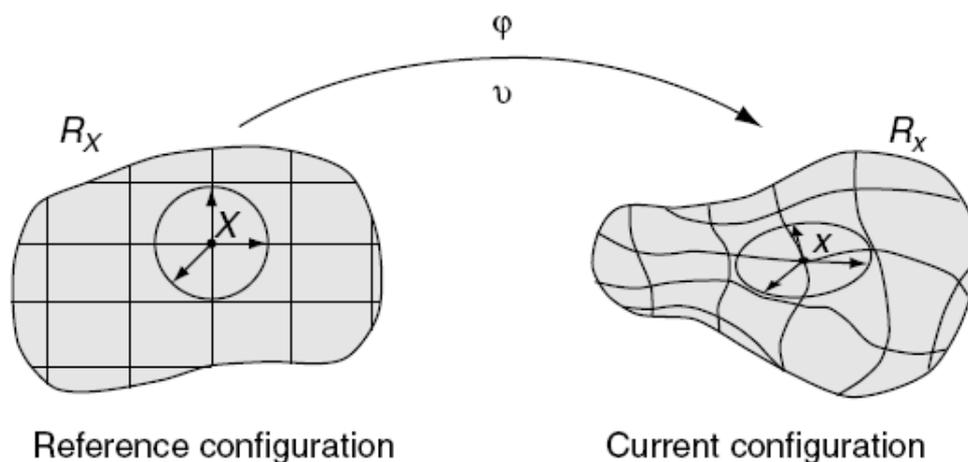


Figura 15: Descrizione Lagrangiana del movimento

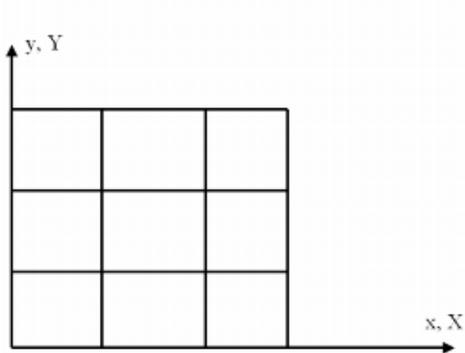


Figura 16: Una mesh indeformata: il frame (x,y) spaziale e il frame (X,Y) di riferimento coincidono,

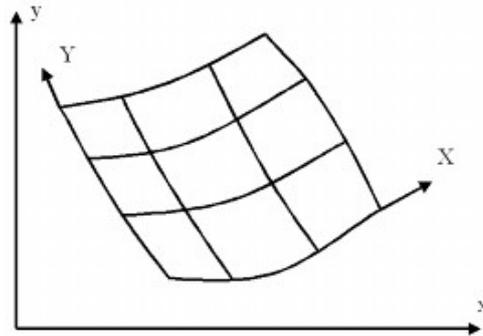


Figura 17: Una mesh deformata con il frame (x,y) spaziale e il frame (X,Y) di riferimento

Il movimento del punto materiale mette in relazione le coordinate del materiale, X , a quelle spaziali, x . Essa è definita da una trasformazione ϕ tale che

$$\phi: R^3 \times [t_0, t_{final}] \rightarrow R^3 \times [t_0, t_{final}]$$

$$(\mathbf{X}, t) \rightarrow \phi(\mathbf{X}, t) = (\mathbf{x}, t) \quad (7)$$

che ci permette di collegare X e x nel tempo dalla legge di movimento, cioè

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}(\mathbf{X}, t), \quad t = t \quad (8)$$

che afferma esplicitamente la natura particolare di ϕ : in primo luogo, le coordinate spaziali x dipendono sia dalle particelle materiali, X , sia dal tempo t ; in secondo luogo, il tempo fisico è misurato dalla stessa variabile t in entrambi i domini materiale e spaziale. Per ogni istante t fissato, la mappatura ϕ definisce una configurazione nel dominio spaziale. È conveniente utilizzare una matrice per rappresentare il gradiente di ϕ ,

$$\frac{(\partial \phi)}{(\partial \mathbf{X}, t)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{X}} & \mathbf{v} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

dove $\mathbf{0}^T$ è un vettore-riga nullo e la velocità materiale \mathbf{v} è:

$$\mathbf{v}(\mathbf{X}, t) = \left. \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} \right|_{\mathbf{x}} \quad (10)$$

con $|x$ che significata appartenente alle coordinate del materiale con X fissa. Ovviamente, la mappatura uno a uno di f deve verificare $\det(\partial x/\partial X) > 0$ (deve essere non zero in modo da imporre una corrispondenza uno a uno e positivo per evitare di cambiare l'orientamento degli assi di riferimento) in ogni punto X e istante $t > t_0$. Questo permette di conservare il tracciamento della storia del movimento e, attraverso la trasformazione inversa $(X, t) = \phi^{-1}(x, t)$, di identificare, a ogni istante, la posizione iniziale della punto materiale che occupa la posizione x all'istante t . Dato che i punti materiale coincidono con i medesimi punti griglia durante l'intero movimento, nella computazionale Lagrangiana non ci sono effetti convettivi: la derivata del punto materiale si riduce a una semplice derivata rispetto al tempo. Il fatto che ogni elemento finito di una mesh Lagrangiana contiene sempre la stesso punto materiale rappresenta un vantaggio significativo dal punto di vista computazionale, in particolare nei problemi che interessano materiali con comportamento "storia-dipendente". Tuttavia quando si verificano grandi deformazioni del materiale, per esempio nei vortici dei fluidi, gli algoritmi Lagrangiani perdono di precisione e può anche darsi che non siano in grado di concludere il calcolo a causa delle eccessive distorsioni del dominio computazionale legato al materiale.

Le difficoltà causate da un eccesso di distorsione della griglia degli elementi finiti sono superate dalla formulazione Euleriana. L'idea di base nella formulazione Euleriana, che tra l'altro è molto popolare in fluidodinamica, consiste nell'esaminare come evolvono nel tempo le quantità fisiche associate con la particelle di fluido che passano attraverso una fissa regione di spazio. In una descrizione Euleriana la maglia degli elementi finiti è fissa mentre è il continuo a muoversi e deformarsi con riferimento alla griglia computazionale. Le equazioni di conservazione sono formulate in termini delle coordinate spaziali x e del tempo t . Pertanto, la descrizione di moto Euleriano, coinvolge solo variabili e funzioni che hanno un significato istantaneo in una fissa regione di spazio. La velocità del materiale v a un dato nodo della mesh corrisponde alla velocità del punto materiale coincidente al tempo t considerato con il nodo considerato. La velocità v è conseguentemente espressa con riferimento all'elemento fisso della mesh senza nessun riferimento alla configurazione iniziale del continuo e delle coordinate del materiale $X: v = v(x, t)$.

Poiché la formulazione Euleriana dissocia i nodi della mesh dai punti materiali

appaiono effetti convettivi dovuti al movimento relativo tra il materiale deformato e il dominio computazionale. Gli algoritmi Euleriani presentano difficoltà numeriche dovute al carattere non simmetrico degli operatori di convezione, ma permettono un facile trattamento del movimento complesso del materiale. Questo è in contrasto a quanto accade nella descrizione Lagrangiana, la quale si trova in serie difficoltà in seguito alla deformazione di connessioni (interfacce) e contorni mobili.

4.2.3 Descrizione cinematica di ALE

Il richiamo soprastante della descrizione classica Lagrangiana e di quella Euleriana ha evidenziato i vantaggi e gli svantaggi di ogni singola formulazione. Essa ha inoltre dimostrato il potenziale interesse in una descrizione generale in grado di combinare al meglio gli aspetti interessanti delle descrizioni classiche della mesh sebbene minimizzi il più possibile i loro svantaggi. Tale descrizione generalizzata è denominata descrizione "Arbitraria Lagrangiana-Euleriana" (ALE). I metodi ALE sono stati proposti inizialmente nel contesto delle differenze finite e dei volumi finiti. Solo successivamente il metodo è stato adottato negli elementi finiti.

Nella descrizione di movimento ALE non vengono prese come riferimento né la configurazione del materiale R_X né la configurazione spaziale R_x . Pertanto è necessario introdurre un terzo dominio: la configurazione di riferimento R_χ dove le coordinate di riferimento χ sono introdotte per l'identificazione dei punti griglia. La Figura 18 mostra questo dominio e le trasformazioni uno a uno collegate alle configurazioni. Il dominio di riferimento R_χ è mappato nel dominio materiale e spaziale rispettivamente da Ψ e Φ . Il movimento ϕ del punto allora può essere espresso come $\phi = \Phi \circ \Psi^{-1}$, mostrando chiaramente che le tre mappature Ψ , Φ e ϕ non sono indipendenti.

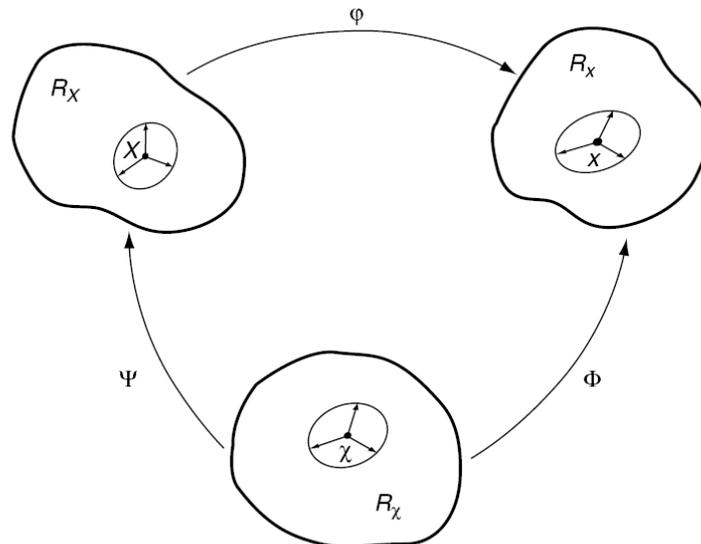


Figura 18: Relazione tra le mappature del Materiale X , spaziale x e di riferimento χ ,

La mappatura di Φ dal dominio di riferimento al dominio spaziale, che può essere intesa come il movimento dei punti griglia nel dominio dello spazio, è rappresentato da:

$$\Phi: R_{\chi} \times [t_0, t_{\text{final}}[\rightarrow R_x \times [t_0, t_{\text{final}}[$$

$$(\chi, t) \rightarrow \Phi(\chi, t) = (\mathbf{x}, t) \quad 11$$

e il gradiente è

$$\frac{(\partial \Phi)}{(\partial \chi, t)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \chi} & \hat{\mathbf{v}} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{pmatrix} \quad 12$$

dove ora la velocità della mesh

$$\hat{\mathbf{v}}(\chi, t) = \left. \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} \right|_{\chi} \quad 13$$

è complicata. Si può notare che sia il materiale che la mesh si muovono rispetto al sistema di riferimento sperimentale. Pertanto la rispettiva velocità del materiale e della mesh sono state definite derivando rispettivamente le equazioni del movimento del materiale e del movimento della mesh rispetto al tempo (vedi equazioni 10e 13).

Infine, per quanto riguarda Ψ , è conveniente rappresentarlo direttamente con il suo inverso Ψ^{-1} ,

$$\Psi^{-1}: \mathbb{R}_{\mathcal{X}} \times [t_0, t_{\text{final}}[\rightarrow \mathbb{R}_{\mathcal{X}} \times [t_0, t_{\text{final}}[$$

$$(\mathbf{X}, t) \rightarrow \Psi^{-1}(\mathbf{X}, t) = (\boldsymbol{\chi}, t) \quad 14$$

e il suo gradiente è

$$\frac{(\partial \Psi^{-1})}{(\partial \mathbf{X}, t)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \boldsymbol{\chi}}{\partial \mathbf{X}} & \boldsymbol{\omega} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{pmatrix} \quad 15$$

dove la velocità $\boldsymbol{\omega}$ è definita come

$$\boldsymbol{\omega} = \left. \frac{\partial \boldsymbol{\chi}}{\partial t} \right|_{\mathbf{X}} \quad 16$$

e può essere interpretata come la velocità del punto nel dominio di riferimento, dal momento che misura la variazione di tempo delle coordinate di riferimento $\boldsymbol{\chi}$ appartenente al punto materiale \mathbf{X} fisso. La relazione tra velocità \mathbf{v} , $\hat{\mathbf{v}}$, e $\boldsymbol{\omega}$ può essere ottenuta differenziando $\phi = \Phi \circ \Psi^{-1}$,

$$\begin{aligned} \frac{(\partial \phi^{-1})}{(\partial \mathbf{X}, t)}(\mathbf{X}, t) &= \frac{(\partial \Phi)}{(\partial \boldsymbol{\chi}, t)}(\Psi^{-1}(\mathbf{X}, t)) \quad \frac{(\partial \Psi^{-1})}{(\partial \mathbf{X}, t)}(\mathbf{X}, t) \\ &= \frac{(\partial \Phi)}{(\partial \boldsymbol{\chi}, t)}(\boldsymbol{\chi}, t) \quad \frac{(\partial \Psi^{-1})}{(\partial \mathbf{X}, t)}(\mathbf{X}, t) \quad 17 \end{aligned}$$

o in forma matriciale:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{X}} & \mathbf{v} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \boldsymbol{\chi}} & \hat{\mathbf{v}} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial \boldsymbol{\chi}}{\partial \mathbf{X}} & \boldsymbol{\omega} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{pmatrix} \quad 18$$

che produce, dopo le operazioni di moltiplicazione,

$$\mathbf{v} = \hat{\mathbf{v}} + \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \boldsymbol{\chi}} \cdot \boldsymbol{\omega} \quad 19$$

Questa equazione può essere riscritta come

$$\mathbf{c} := \mathbf{v} - \hat{\mathbf{v}} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \boldsymbol{\chi}} \cdot \boldsymbol{\omega} \quad 20$$

così definendo la velocità convettiva \mathbf{c} , che è la velocità relativa tra il materiale e la mesh.

La velocità convettiva \mathbf{c} (equazione 20), non deve essere confusa con $\boldsymbol{\omega}$ (equazione 16). Come affermato in precedenza $\boldsymbol{\omega}$ è la velocità del punto (inteso come punto materiale) come osservato dal dominio di riferimento R_χ , mentre \mathbf{c} è la velocità relativa del punto rispetto alla mesh come visto nel dominio spaziale R_x (sia \mathbf{v} che $\hat{\mathbf{v}}$ sono variazioni di coordinate \mathbf{x}). Infatti l'equazione 20 implica che $\mathbf{c}=\boldsymbol{\omega}$ se e solo se $\partial\mathbf{x}/\partial\chi=\mathbf{I}$ (dove \mathbf{I} è il tensore identità), quando il moto della mesh è puramente traslazionale, ovvero senza rotazioni o deformazioni di nessun tipo.

Dopo che sono stati presentati i fondamentali sulla cinematica ALE, dovrebbe essere osservato che entrambe le formulazioni Lagrangiana ed Euleriana possono essere ottenute come suoi casi particolari. Scegliendo $\boldsymbol{\Psi}=\mathbf{I}$, l'equazione 9 si riduce a $\mathbf{x}\equiv\boldsymbol{\chi}$ e risulta una descrizione Lagrangiana: la velocità del materiale e della mesh, equazioni 10 e 13, coincidono e la velocità convettiva \mathbf{c} (equazione 20) è nulla (non ci sono termini convettivi in questa legge di conservazione). Se d'altra parte poniamo $\boldsymbol{\Phi}=\mathbf{I}$ l'equazione 8 si semplifica in $\mathbf{x}\equiv\boldsymbol{\chi}$, questo implica una descrizione Euleriana: una velocità della mesh nulla è ottenuta dall'equazione 13 e la velocità convettiva \mathbf{c} è semplicemente identica alla velocità del materiale \mathbf{v} .

Nella formulazione ALE la libertà di movimento della mesh è veramente suggestiva. Essa aiuta ad unire i rispettivi vantaggi delle formulazioni Lagrangiana ed Euleriana. Questo potrebbe, tuttavia, essere offuscato dall'onere di specificare le velocità della griglia ben adattate al particolare problema in esame. Di conseguenza l'implementazione pratica della descrizione ALE richiede che sia fornito un algoritmo automatico di prescrizione degli spostamenti della mesh.

[5], [6]

4.3 Modellazione attraverso la metodologia CAE integrata

Al fine di realizzare un modello di una turbina eolica mediante metodologie CAE, la strategia di design si basa sulla combinazione di CFD con la tecnica del moving mesh, il FEM e le EDO (equazioni differenziali ordinarie)

Così, nel modello sarà necessario creare un adeguato modello multifisico, il quale allo stesso tempo è in grado di:

- risolvere le equazioni di Navier-Stokes
- calcolare le sollecitazioni sulla struttura e le vibrazioni indotte dal flusso, usando come input la sollecitazione prodotta dal fluido sulla pala della turbina;
- risolvere le equazioni che, utilizzando la velocità angolare e l'accelerazione della turbina e le sue proprietà geometriche e di massa come dati di entrata, permettono mediante una corretta mesh di descrivere il movimento turbina (è utilizzata la mesh di tipo ALE - ossia metodo Arbitrary Lagrangian-Euleriano); così il modello conterrà tutte le informazioni dell'interazione fluido-struttura in ogni momento.

Al fine di risolvere i problemi sopra esposti, sarà necessario creare un modello multifisico composto da:

- Modulo di fluidodinamica computazionale;
- Modulo di meccanica strutturale;
- Modulo di EDO (equazioni differenziali ordinarie);
- Modulo di moving mesh.

Questi quattro moduli sono collegati in cascata e lavorano ciclicamente - ogni ciclo rappresenta un istante di tempo: il ciclo finisce quando il moto è completamente sviluppato, cioè quando la velocità angolare del ciclo i -esimo è inferiore a quella del ciclo $i-1$.

All'inizio del processo, il modulo di calcolo fluidodinamico (CFD) riceve la velocità del vento e la geometria delle pale delle turbine come input, e calcola la pressione del fluido sulle pale come uscita.

Il modulo meccanico strutturale ha come input la pressione sulle pale (cioè l'uscita del

modulo CFD), oltre alla geometria della pala e le caratteristiche meccaniche del materiale. Come uscita, questo modulo darà tensione e valori di deformazione sulle pale e il momento di coppia risultante sopra (Figura 19).

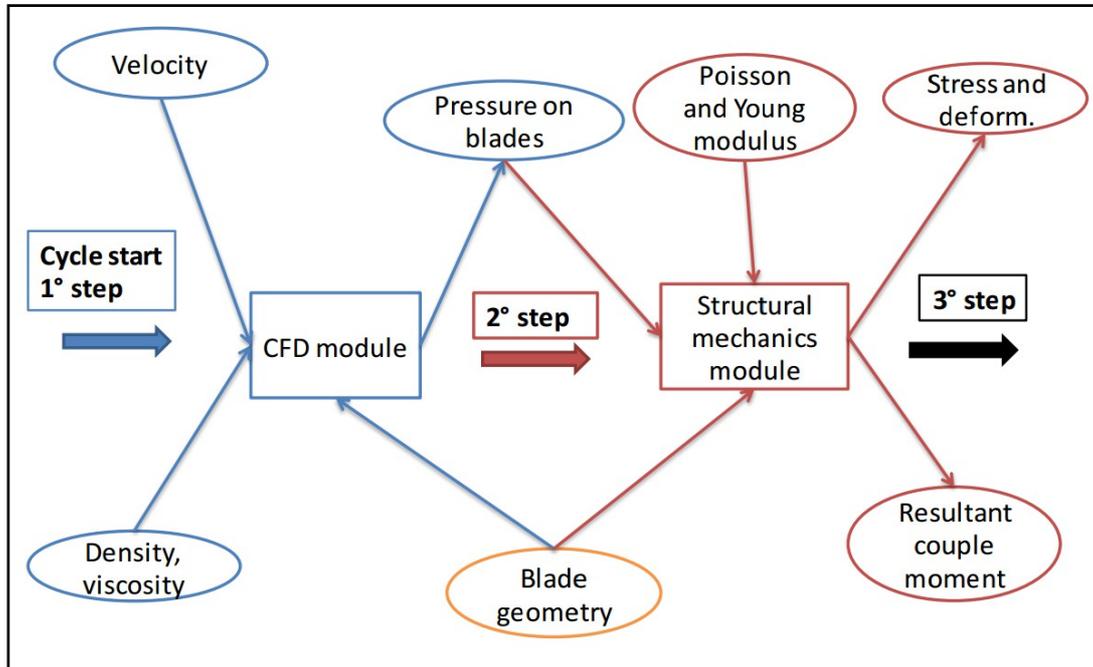


Figura 19: Mappa concettuale del modello multifisico 1/3

Invece, attraverso il modulo EDO (equazione differenziale ordinaria), è possibile simulare la dinamica turbina. Questo modulo avrà come input la legge del moto (equazione 21), il momento d'inerzia polare e il momento risultante sulle pale (che è l'uscita del modulo strutturale). Come uscita, il modulo ODE darà l'angolo di rotazione, la velocità angolare e l'accelerazione angolare:

$$\ddot{\theta} = \frac{M}{J} \quad 21$$

dove:

$\ddot{\theta}$ è l'accelerazione angolare,

M è il momento risultante sulle pale,

J è il momento polare di inerzia,

con le condizioni al contorno per l'integrazione (rispettivamente Neumann e Dirichlet)

$$v(t_0) = C1 \cdot t = \text{velocità all'istante zero} = 0$$

$$s(t_0) = C2 \text{ posizione all'istante zero} = 0$$

Il momento risultante sulle pale "M" è calcolato come segue equazione 22

$$M = F \cdot d \quad 22$$

dove

d è il baricentro delle forze

F per il modello 2D e 3D rispettivamente (equazione 23 e 24)

$$F = \int_l \sigma_f dl \quad 23$$

$$F = \int_A \sigma_f dA \quad 24$$

Dove σ_f è lo stress causato dalla interazione fluido-struttura e viene calcolato dalle equazioni di Navier-Stokes e dl e dA sono la sezione frontale e l'area della pala, rispettivamente nei modelli 2D e 3D, .

Inoltre, la rotazione della mesh del dominio mobile segue la matrice di trasformazione (matrice 1),

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\vartheta & -\sin\vartheta \\ \sin\vartheta & \cos\vartheta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (1)$$

dove:

dx e dy sono gli spostamenti della mesh,

ϑ è l'angolo di rotazione, ed è calcolato integrando l'equazione differenziale (21),

x e y sono la generica posizione del dominio mobile.

Infine, il modulo del Moving Mesh riceve in ingresso la geometria della turbina, la matrice di rotazione e l'angolo di rotazione (cioè l'uscita del modulo di EDO). Come uscita, darà la geometria nella nuova configurazione generata dalla rotazione angolare della turbina (Figura 20).

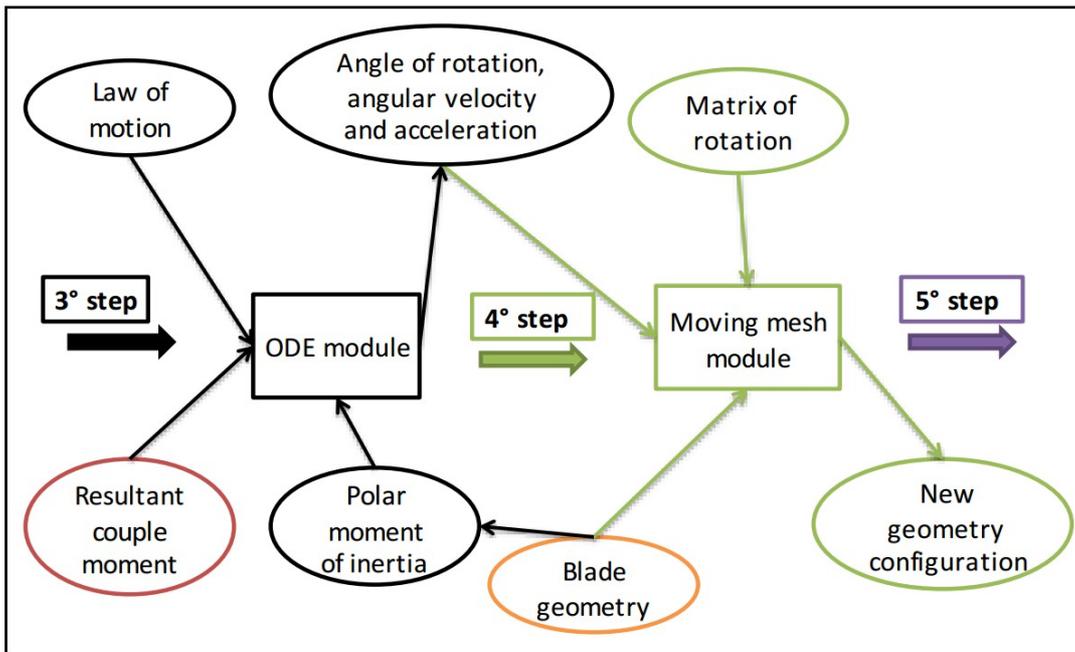


Figura 20: Mappa concettuale del modello multifisico 2/3

Se il moto è completamente sviluppato l'analisi si ferma, altrimenti ri-parte dallo step 1° (Figura 21)

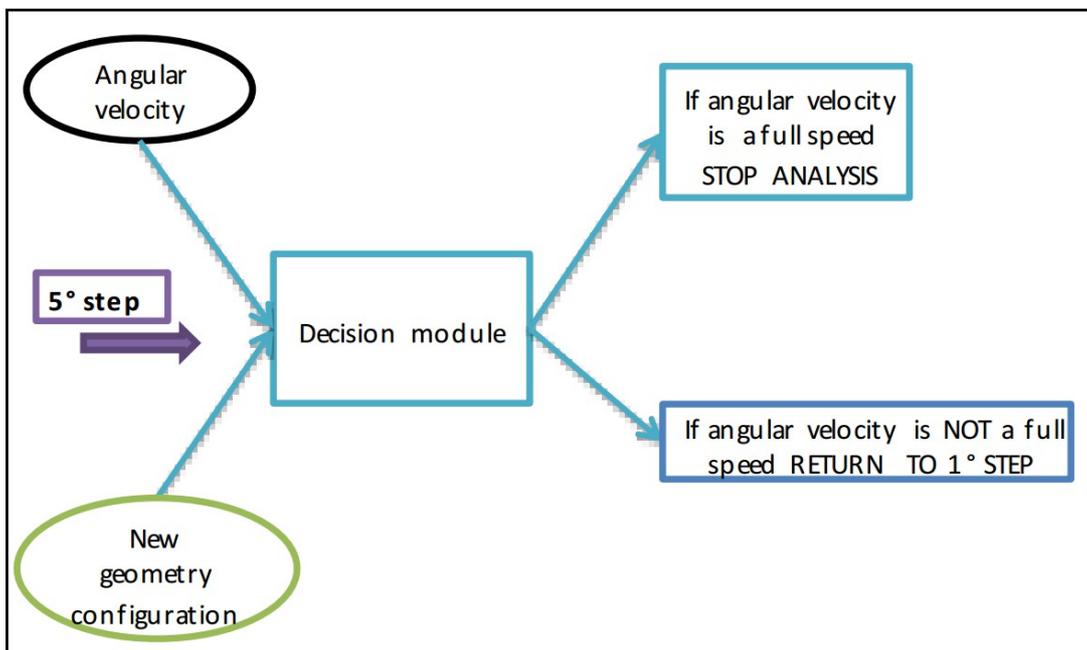


Figura 21: Mappa concettuale del modello multifisico 3/3

Segue la mappa concettuale di modello modello multifisico (Figura 22)

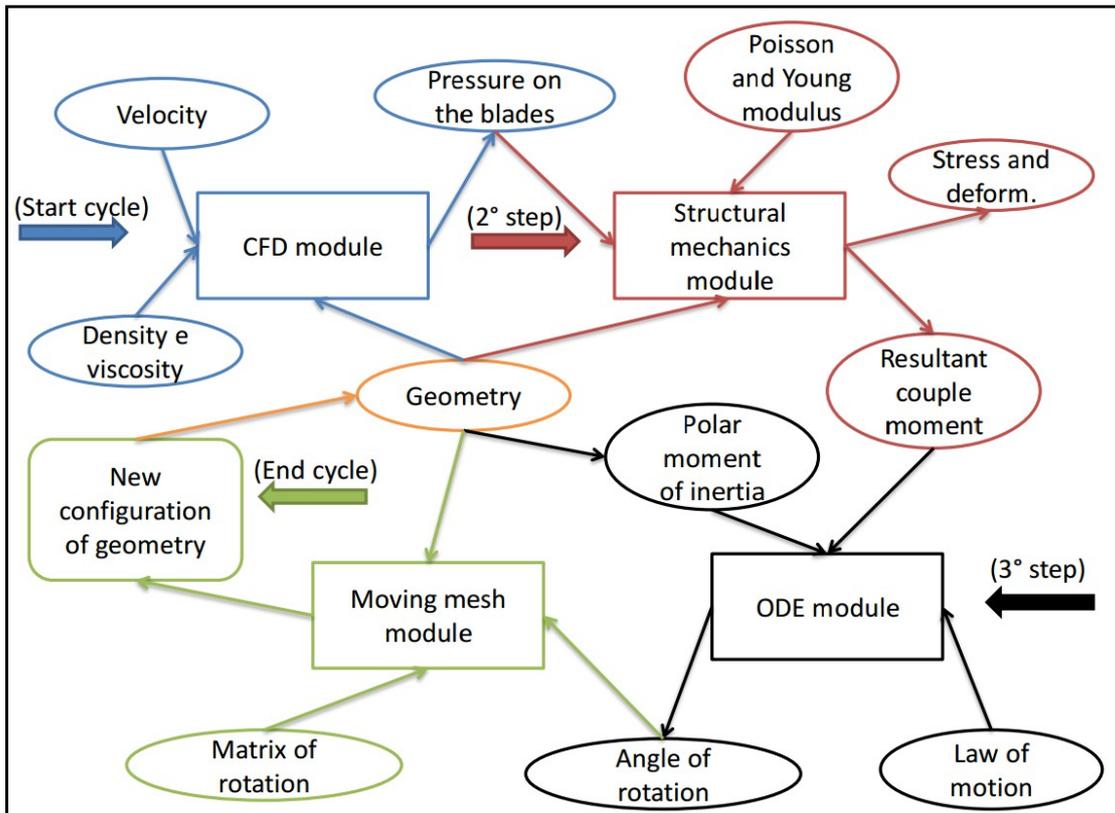


Figura 22: Mappa concettuale di modello modello multifisico

Questa mappa concettuale di modello modello multifisico è stata implementata sia in 2D sia in 3D.

La scelta tra un modello a 2 o a 3 dimensioni segue la seguente logica:

- Se la geometria della pala è rappresentabile in piano, (come nella turbina Savonius), il modello sarà in 2D,
- Se la geometria della pala non è rappresentabile in piano, (come turbina assiale, la pala è deformata), il modello sarà in 3D.
- Indipendentemente dalla macchina a fluido, è necessario identificare e modellare il dominio della mesh fissa e mobile: il dominio mobile è sempre costituito dalle pale e da un'area circolare che le include (modello 2D vedi Figura 23, modello 3D l'area circolare è sostituita da un cilindro o da una sfera, vedi Figura 24).; il dominio fisso è costituito da un rettangolo/quadrato (2D) o da un prisma / cubo (3D).

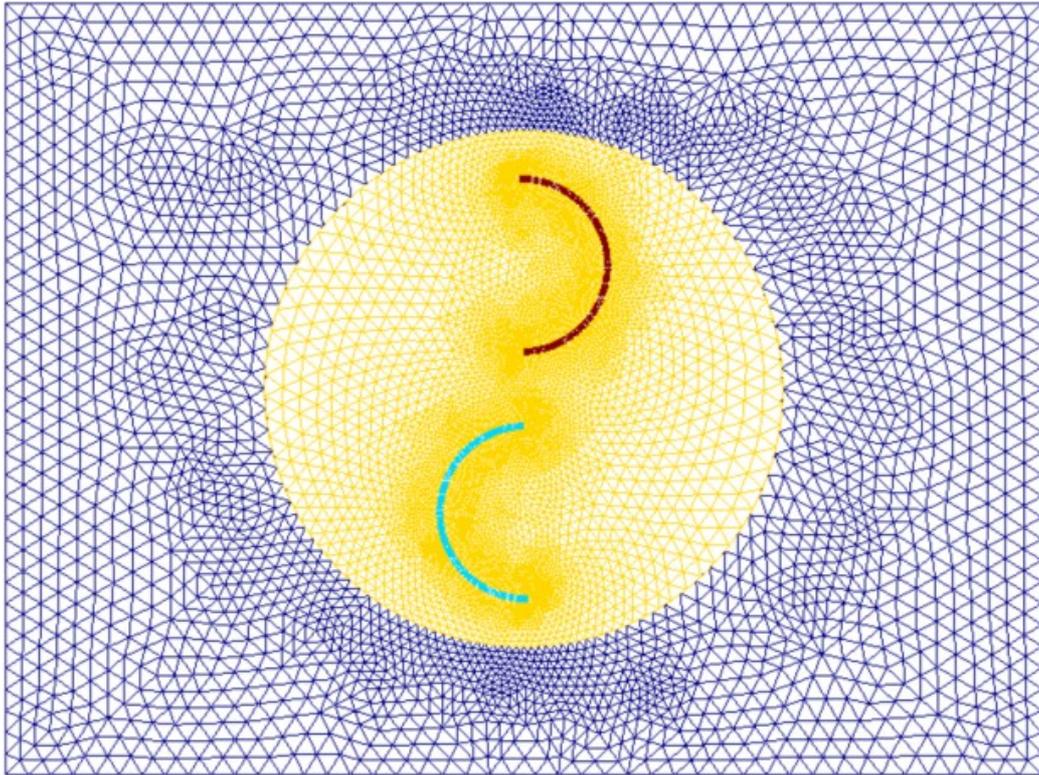


Figura 23: Modello 2D in Comsol Multiphysics

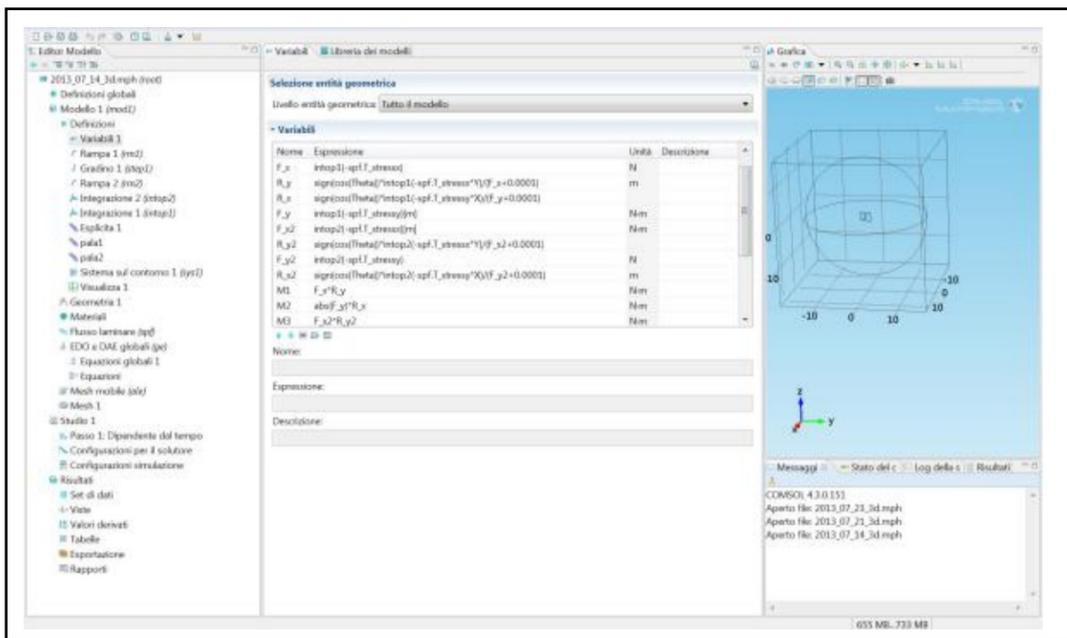


Figura 24: Modello 3D in Comsol Multiphysics

[7], [8], [9], [10], [11], [12]

4.4 Implementazione del modello matematico

Dopo aver completato il modello multifisico, sarà possibile estrarre i dati necessari per realizzare il modello matematico. Esso è stato messo a punto attraverso un software matematico, facile da integrare con un CAD (Mathcad Prime) e poi è stato integrato con un CAD (Creo Parametric). Nel modello matematico (in Mathcad Prime, vedi Figura 25) i risultati convalidati delle analisi numeriche multifisiche vengono messi in input; in questo caso particolare il valore C_d (il coefficiente di resistenza) è stato estrapolato secondo le varie velocità del vento e alle varie dimensioni e forme delle pale. Nota bene, il valore C_d (il coefficiente di resistenza) viene valutato sia staticamente (con le pale della turbina in blocco) e sia dinamicamente (con le pale della turbina in movimento).

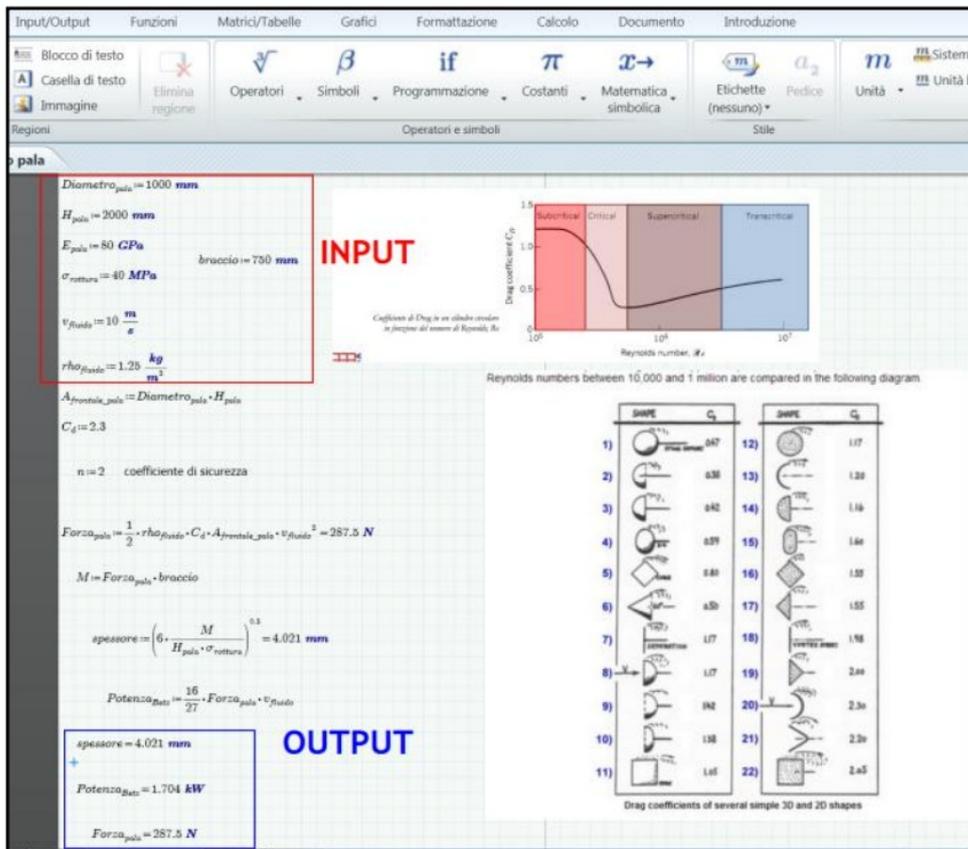


Figura 25: Modello matematico in MathCad Prime

Inoltre sono incluse le equazioni necessarie per calcolare lo spessore minimo con cui produrre pale e la potenza massima teorica producibile (limite di Betz [6] - equazione 25, forza massima - equazione 26). Queste equazioni sono funzione del materiale con

cui le pale sono prodotte, della velocità massima del vento alla quale saranno sottoposte, e delle loro dimensioni (diametro e altezza) e forma.

$$P_{Betz} = \frac{16}{27} F \cdot v \quad 25$$

dove :

v è la velocità del fluido

F è calcolata come segue

$$F = \frac{1}{2} \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2 \quad 26$$

dove

ρ è la densità del fluido

C_d è il Coefficiente di resistenza

A è l'area frontale

v è la la velocità del fluido

[13]

4.5 Integrazione con il modello CAD

Per quanto riguarda il modello CAD, una volta che la geometria della pala della turbina è stata progettata, sarà necessario collegare i parametri progettuali con parametri CAD che sono gli input nel software matematico (vedi Figura 26). Ci sono due possibilità:

- I. collegare i parametri di progetto ai parametri CAD
- II. collegare i parametri CAD ai parametri di progetto

Se scegliamo la prima soluzione, le modifiche sul modello CAD avverranno modificando i parametri (CAD) direttamente lì (i parametri di progetto vengono aggiornati, di conseguenza); se si sceglie la seconda opzione, modifiche sul modello CAD saranno effettuate indirettamente attraverso la modifica dei parametri di progettazione e parametri CAD saranno aggiornati automaticamente.

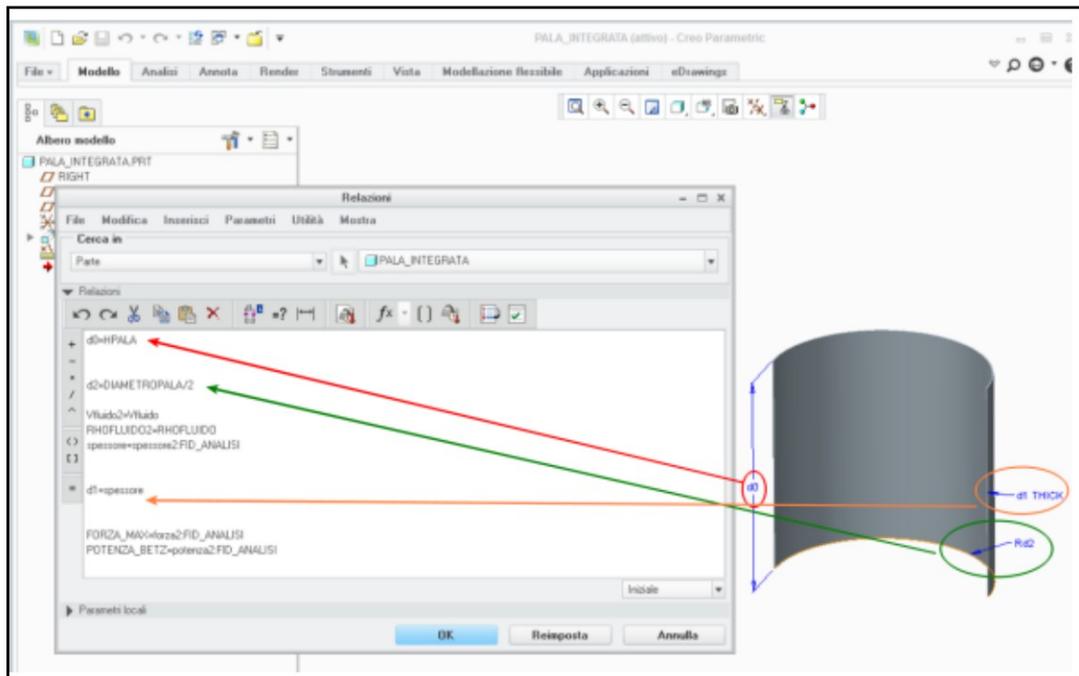


Figura 26: Link unidirezionale tra le dimensioni e i parametri del modello CAD

[14]

4.6 Applicazione della procedura di progettazione

Il designer modifica il diametro della pala e la sua altezza, in ambiente di modellazione (ad esempio tramite il software Creo Parametric), e seleziona il materiale appropriato e assegna infine i parametri relativi alla massima velocità e densità del fluido. Il modello in MathCad Prime restituisce il valore minimo spessore della pala, la potenza massima teorica estraibile e la forza massima a cui le pale sono sottoposte (vedi Figura 27). In particolare, per quanto riguarda il parametro dello spessore minimo della pala, esso è collegato al parametro CAD: il modello 3D si aggiorna automaticamente con il valore di spessore minimo. A questo punto, il designer deve solo arrotondare lo spessore al primo valore utile "commerciale": per esempio, se di volesse fabbricare la pala con polycarbonato, e se lo spessore minimo della pala fosse 7,8 millimetri, il designer avrebbe il compito di arrotondare fino a 8 mm, poiché il polycarbonato commerciale di 8 mm ha una maggiore diffusione e quindi un prezzo inferiore a quelli 7,8 millimetri.

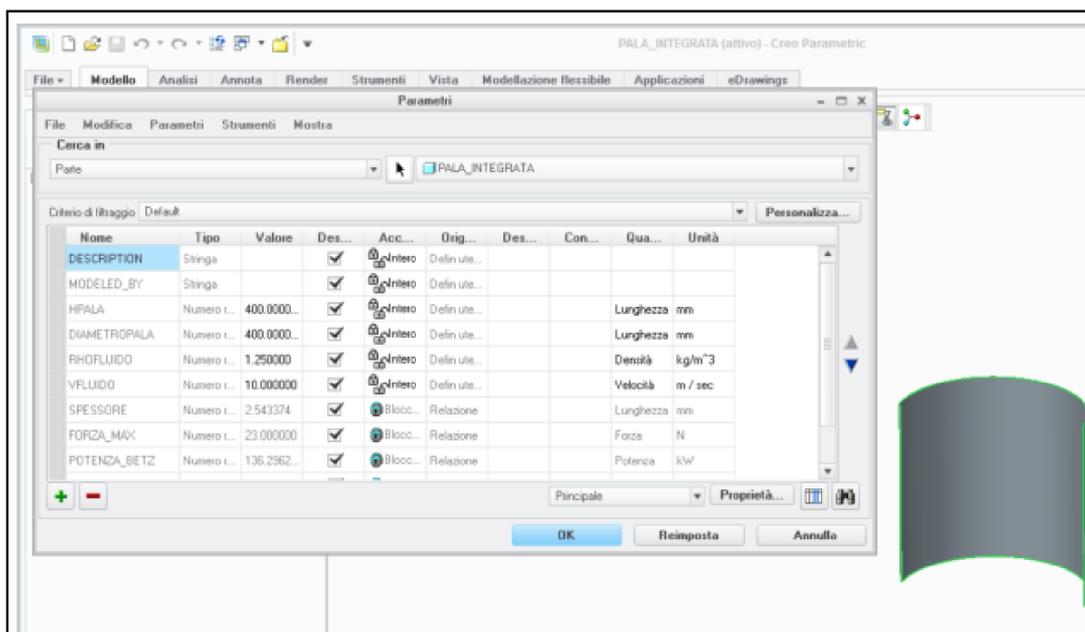


Figura 27: Lista finale dei parametri in Creo Parametric

Questa procedura è semplice e può essere utilizzata anche dal progettista che non sa come usare un software matematico (in particolare Mathcad Prime) e da chi non ha conoscenza di fluidodinamica, necessarie per la progettazione della pala.

4.7 Modellazione in Comsol Multiphysics

4.7.1 Modello 2D in Comsol Multiphysics

A oggi è iniziata solo la modellazione CAD semplificata; è stato realizzato un modello CAD finalizzato a essere utilizzato esclusivamente nel modello FEM. Non è ancora iniziata, invece, la modellazione dettagliata del prodotto.

E' stato realizzato un modello di prova 2D che permette di analizzare la turbina sia dal punto di vista strutturale, sia dal punto di vista fluidodinamico e sia dal punto di vista cineto-dinamico.

In Figura 28 è possibile osservare il modello 2D realizzato in Comsol Multiphysics, le pale hanno sezione semicilindrica e sono libere di ruotare rispetto al centro della circonferenza. Vengono mostrate quelle che sono le condizioni al contorno, ingresso e uscite, le due condizioni di parete, e il dominio di mesh fissa (ovvero la mesh che

durante l'analisi non subirà nessun moto rigido) e la mesh mobile (ovvero la mesh che subirà il moto rotativo durante l'analisi). Inoltre, anche se non è visibile nell'immagine, il modello ha le pale mobili (possono ruotare rispetto al centro della circonferenza) e sono soggette a un flusso d'aria che va da sinistra verso destra, che è perfettamente orizzontale e che ha una velocità di 1 m/s.

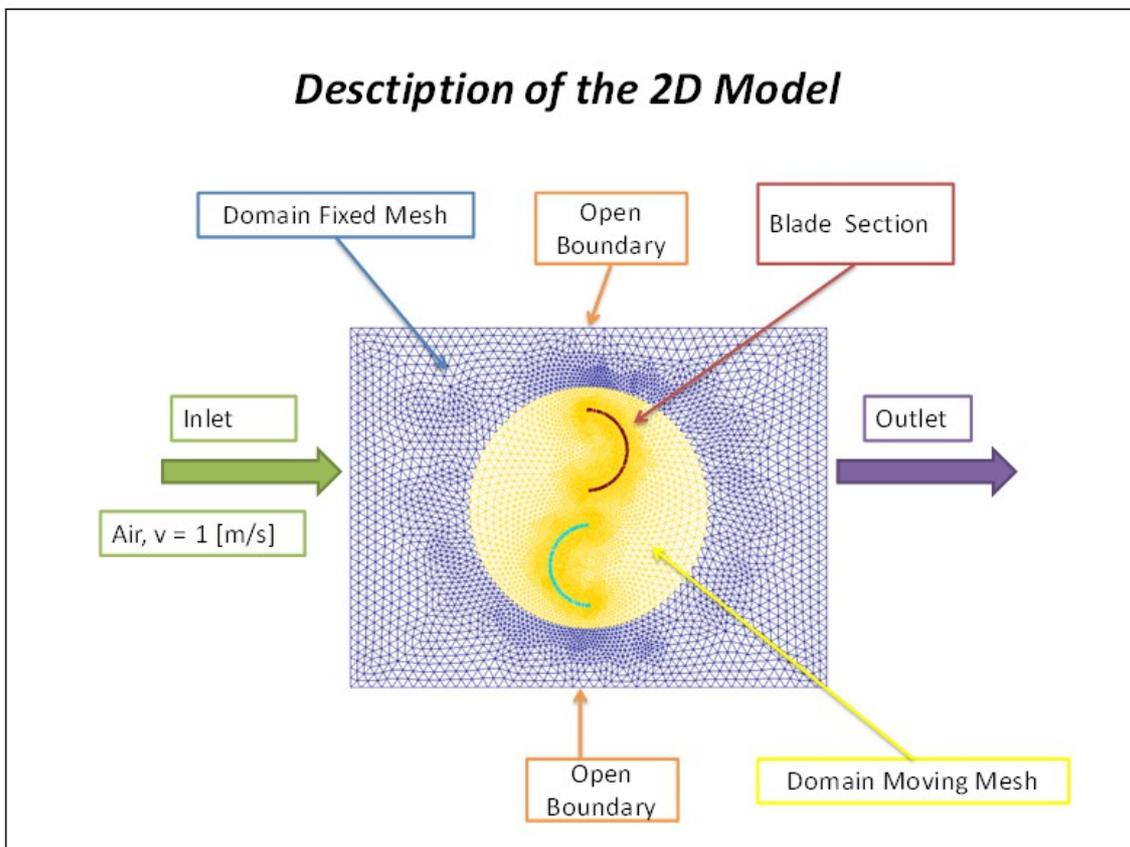


Figura 28: Descrizione del modello 2D

In Figura 29 è riportata l'istanza della soluzione del campo delle velocità qualche istante dopo l'inizio della rotazione delle pale (dopo solo 14 ms) e quindi quando ancora è massimo lo sforzo che l'aria esercita su di esse (in quanto le pale sono ancora perfettamente perpendicolari, o quasi, alla direzione del flusso d'aria e la loro velocità angolare è pressoché nulla).

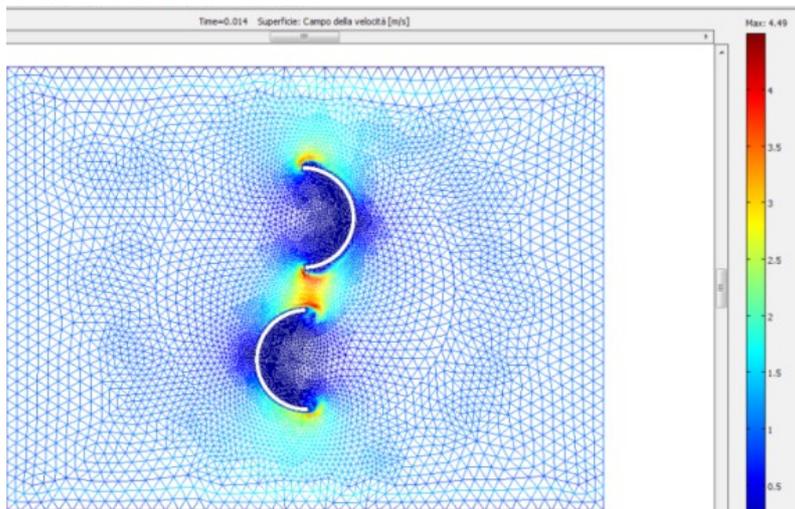


Figura 29: Campo della velocità a pale perpendicolare al flusso d'aria

Infine in *Figura 30* sono riportate le linee di flusso del campo della velocità e lo sforzo di Von Mises sulle pale. L'istanza seguente (estratta ad un tempo successivo all'inizio della rotazione delle pale) mostra cosa accade alle linee di flusso del campo di velocità e come sono sollecitate le pale della turbina quando esse (le pale) iniziano a ruotare (le linee nere rappresentano la geometria nella posizione iniziale). Questa immagine (*Figura 30*) descrive appieno quello che è lo scopo dell'elaborato, ovvero poter analizzare contemporaneamente quelli che sono i risultati dell'analisi fluidodinamica e di quella strutturale nelle varie configurazioni temporali dovute alla dinamica del modello (la quale a sua volta è soggetta alla interazione fluido-struttura).

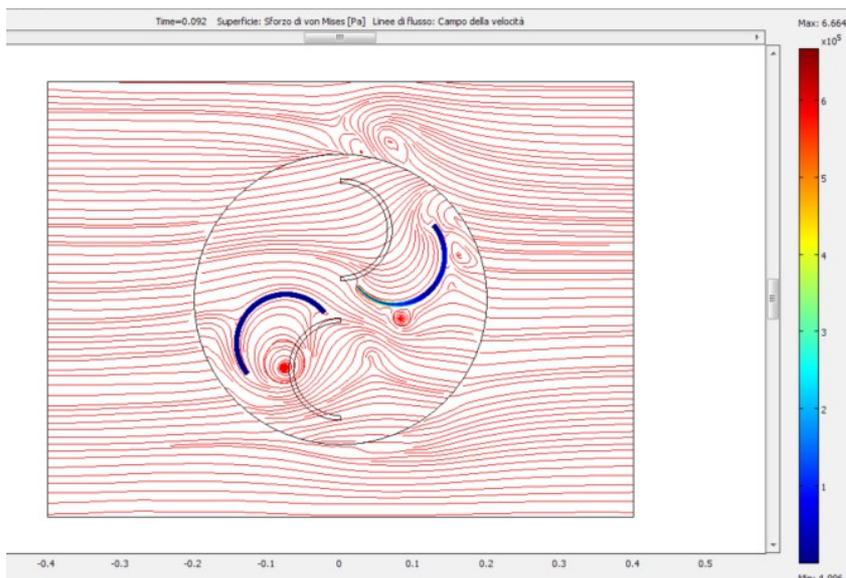


Figura 30 Linee di flusso del campo della velocità e lo sforzo di Von Mises

4.7.2 Modello 3D in Comsol Multiphysics

Il modello 3D ha ovviamente le stesse condizioni al contorno del modello 2D e descritte nella Figura 28, inoltre, com'è possibile osservare nella Figura 31, il modello multifisico 3D realizzato in Comsol Multiphysics, è composto di quattro domini: il cubo esterno che rappresenta l'aria intorno alla turbina, la sfera interna al cubo che rappresenta la parte di aria alla quale è stata data la possibilità ruotare tramite la mesh mobile (moving mesh di tipo ALE - Arbitrary Lagrangian Eulerian) e le due pale della turbina (ad esse è stato attribuito come materiale il polycarbonato e la possibilità di ruotare)

Come è possibile osservare sempre in Figura 31 il modello 3D è stato creato sfruttando in parte quanto fatto in 2D. Il problema principale nel passare dal 2D al 3D è che nel 2D è possibile infittire a piacimento senza troppi problemi, nel 3D no altrimenti in quanto l'onere computazionale diventa insostenibile.

Inoltre, a causa del disinfittimento della mesh, nel modello 3D è stato necessario aumentare la dimensione del dominio preso in esame.

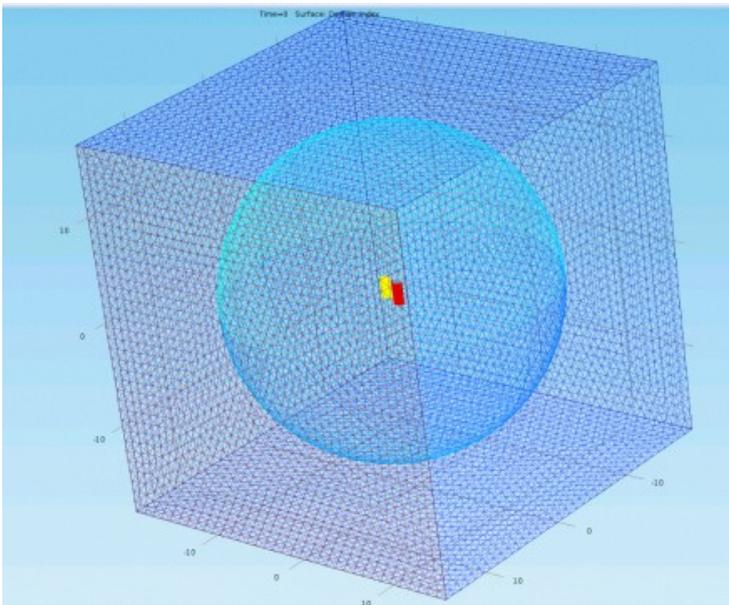


Figura 31: Modello 3D in Comsol MultiPhysics

A differenza del modello 2D che aveva un onere computazionale e un CPU Time contenuto (9-10 ore su un pc portatile a 64 bit con HDD a stato solido, 8 GB ram e

Centrino2 vPro da 2.8 GHz), il modello 3D ha un onere computazionale davvero enorme: infatti il modello 3D consta di 304853 elementi tetraedici (si è optato per tale tipologia di elementi dopo aver visionati i benchmark di Comsol Multiphysics) e 784416 gradi di libertà. Il CPU Time è di circa una settimana (su un server a 64 bit, 16 GB di ram - il modello richiede 12-13 GB per girare, e processore quod core da 2,13 GHz) per ottenere 20 secondi di analisi della turbina. Ciò, ovviamente, comporta un dilatamento dei tempi dedicati all'analisi numerica.

Di seguito (Figura 32 e 33) il campo di velocità e le sue linee di flusso, a destra lo zoom della zona circostante alle pale, nella Figura 34 le linee di flusso del campo di velocità.

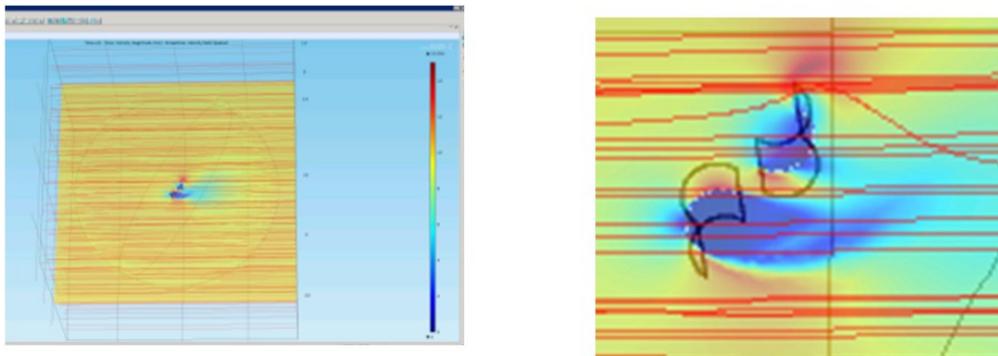


Figura 32 e 33: Linee di flusso del campo di velocità

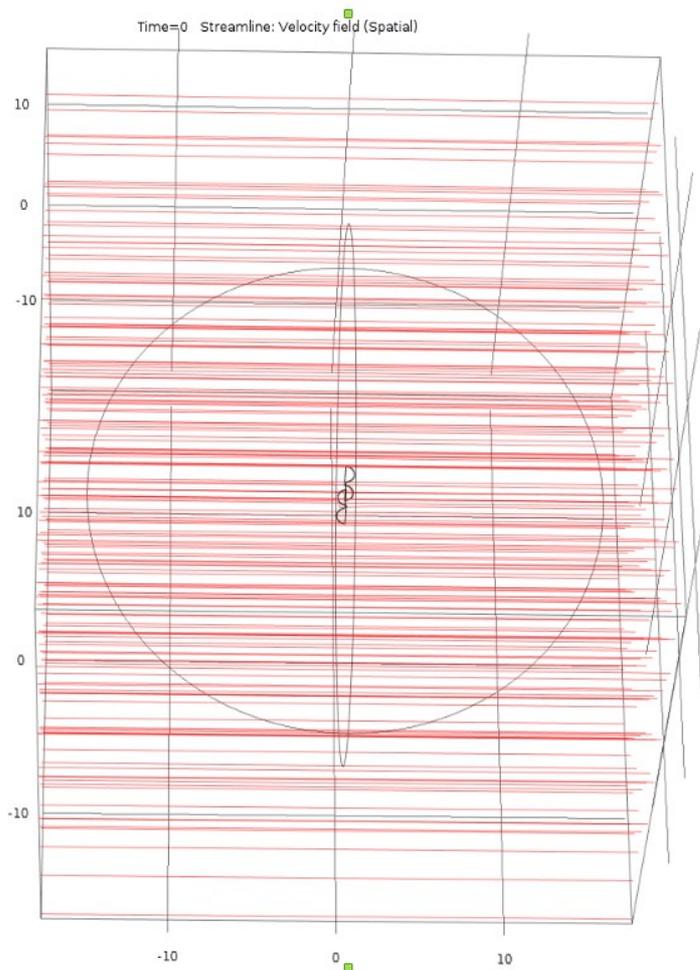


Figura 34: Linee di flusso del campo di velocità

4.7.3 Equazioni nel Modello

In aggiunta sono state implementate tutte le equazioni necessarie alla risoluzione del problema.

Tra le problematiche principali la gestione dei momenti risultanti: infatti i momenti sono funzione delle forze e dei bracci, e il loro segno è determinato unicamente da questi ultimi. Inoltre il braccio è funzione della velocità, maggiore è la velocità di rotazione e minore è la dimensione del braccio (il baricentro della forza si sposta verso l'interno della pala nel verso del centro di rotazione).

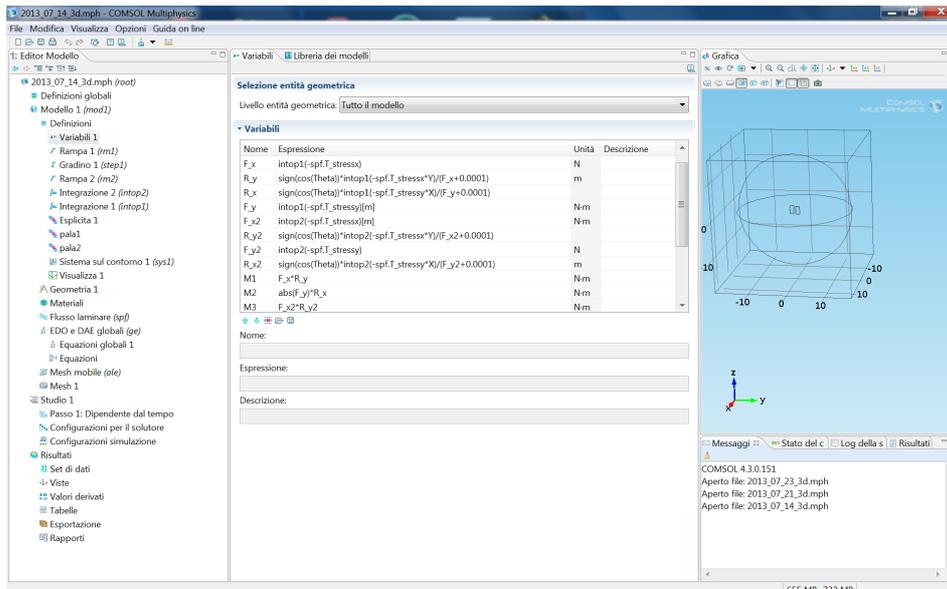


Figura 35: Implementazione delle equazione nel modello in Comsol Multiphysics

4.7.4 Impostazioni per l'ODE

Come già accennato in precedenza nel paragrafo 4.3, l'equazione della legge di moto da risolvere è rappresentata dalla seguente ODE (equazione 21)

$$\ddot{\theta} = \frac{M}{J} \quad 21$$

dove, si ricorda, che :

$\ddot{\theta}$ è l'accelerazione angolare

M è il momento generato dall'interazione fluido-struttura sulle pale

J è il momento polare di inerzia riferito all'asse di rotazione

Integrando l'ODE si ottiene θ ovvero lo spostamento angolare – o ancora meglio - di quanto ruota istante per istante la turbina a causa della continua interazione fluido-struttura.

Nella Figura 36 è riportato l'inserimento dell'ODE (equazione 21) in Comsol Multiphysics

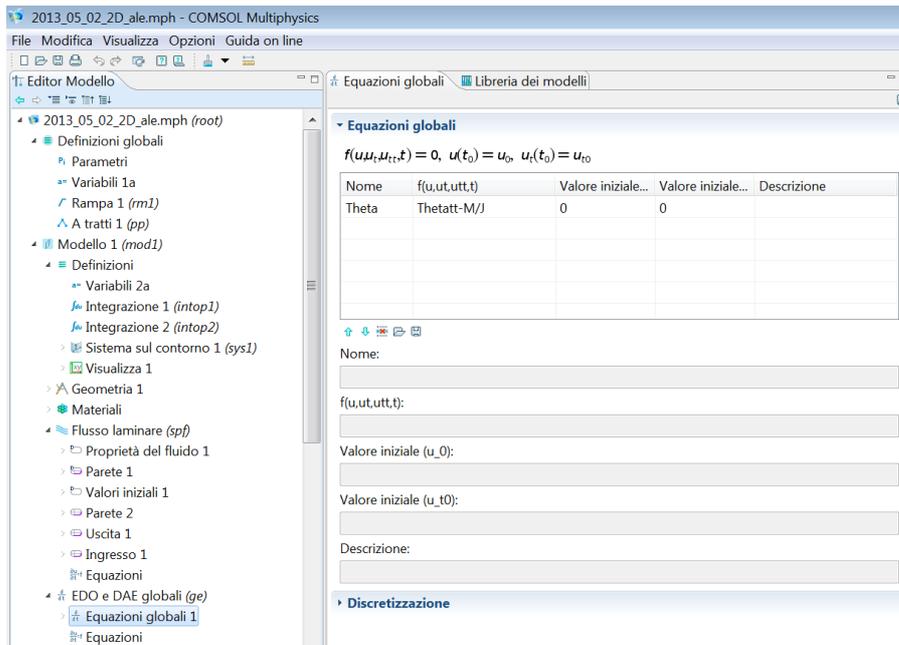


Figura 36: Impostazione per l'ODE in Comsol Multiphysics

4.7.5 Impostazioni per il Moving Mesh

Per quanto riguarda il moving mesh (Figura 37), è stato impostato come fisso il dominio esterno (quindi la mesh del cubo esterno non si muove), mentre ai domini interni (quindi la sfera e le pale) è stata assegnata la possibilità di ruotare. La rotazione è stata ottenuto moltiplicando il moto traslatorio per la matrice di rotazione R , dove θ , invece, è il risultato dell'integrazione dell' ODE dell'equazione 21.

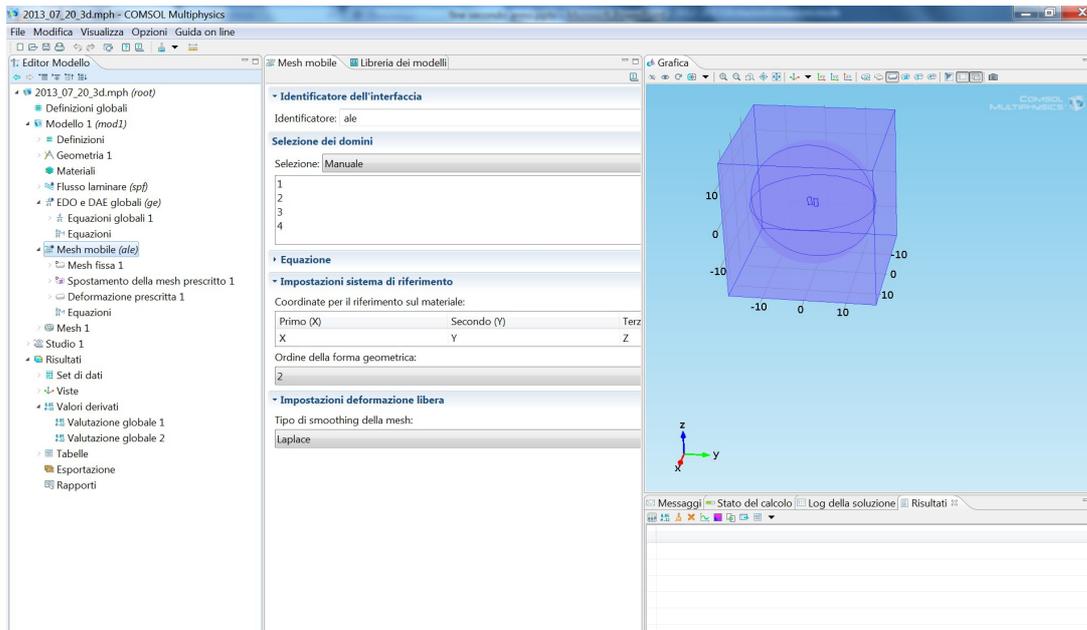


Figura 37: Impostaione moving mesh

$$Rz = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 2$$

4.8 Valori e andamento del Drag coefficient

Di seguito, in Figura 38, è riportato il valore del Drag coefficient per le diverse forme geometriche (per numeri di Reynolds compreso tra $1 \cdot 10^4$ e $1 \cdot 10^6$).

Nella Figura 39, invece, viene riportato l'andamento del C_D di un cilindro in funzione del numero di Reynolds.

Nel caso in esame il C_D è pari a 2.3 per il lato concavo della pala, ed è pari a 1.2 per quello convesso. Inoltre, fino ad una velocità relativa tra pala e vento di 6 [m/s] il C_D è quasi costante (a 6 [m/s] inizia ad avere una leggera variazione).

Reynolds numbers between 10,000 and 1 million are compared in the following diagram.

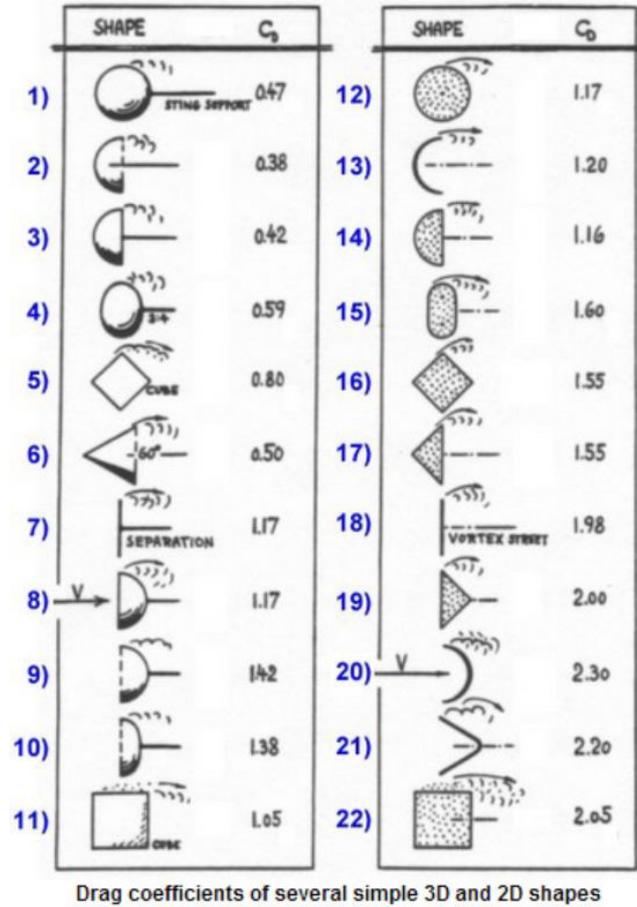


Figura 38: Valore del C_D per le diverse forme geometriche

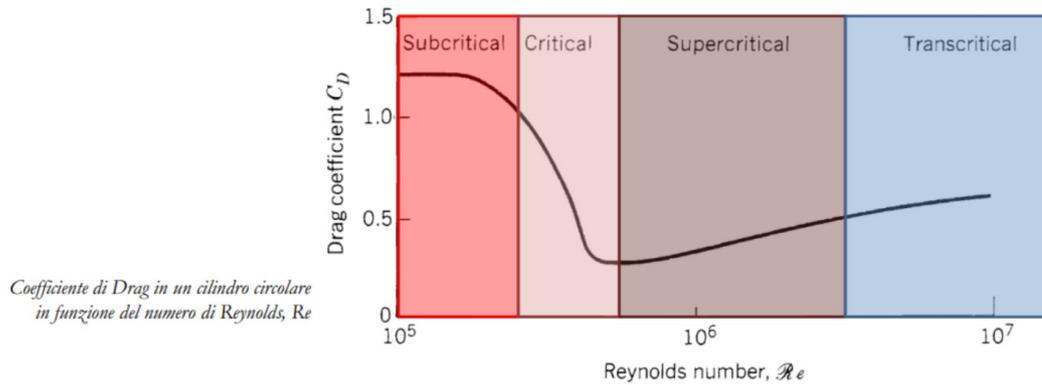


Figura 39: Andamento del C_D per un cilindro circolare

4.9 Calcolo del numero di Reynolds

Ricordando che è possibile esprimere il numero di Reynolds con l'equazione 27,

$$Re = \frac{\text{forze inerziali}}{\text{forze viscosse}} = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} = \frac{v \cdot L}{D_v} \quad 27$$

dove:

ρ è la densità,

v è la velocità macroscopica,

L è una lunghezza convenzionale (es. nel caso di un profilo alare si utilizzerà la corda)

μ è la viscosità dinamica,

D_v è la viscosità cinematica.

Di seguito è stato calcolato il numero di Reynolds la velocità relativa tra il vento e la pala di 1 [m/s] (Tabella 2) di 6 [m/s] (Tabella 3), considerando un TSR pari a $1/3$ è stata quindi considerata una velocità del vento rispettivamente pari a 1,5 [m/s] e 9 [m/s].

Temperatura	densità ρ	viscosità dinamica μ	velocità	corda	Re
[°C]	[kg m-3]	[Pa s]	[m/s]	[m]	[]
18-20	1,225	1,78E-005	1	1	6,88E+004

Tabella 2: Numero di Re con velocità relativa tra vento e pala pari 1 [m/s]

Temperatura	densità ρ	viscosità dinamica μ	velocità	corda	Re
[°C]	[kg m-3]	[Pa s]	[m/s]	[m]	[]
18-20	1,225	1,78E-005	6	1	4,13E+005

Tabella 3: Numero di Re con velocità relativa tra vento e pala pari 6 [m/s]

Quindi siamo in regime di moto laminare o al più all'inizio della zona di transizione.

4.10 Calcolo del numero di MACH

Inoltre è stato calcolato il numero di Mach Ma poiché se tale numero ha un valore al di sotto del valore 0,3 si commette un errore trascurabile nel considerare densità costante.

Quindi ricordando che il numero di Mach è pari a:

$$Ma = \frac{v_o}{v_s}$$

dove

v_o è la velocità dell'oggetto considerato

v_s è la velocità del suono nel fluido (o mezzo) considerato

Nel caso in esame, ipotizzando un valore di velocità del vento pari a 10 [m/s] si ha

$$Ma = \frac{10}{230} = 0,04$$

Considerando anche una velocità del vento di 50 m/s (oltre 150 km/h) il valore di Ma resterebbe comunque al di sotto di 0,3 .

4.11 Validazione del Modello

4.11.1 Validazione del Modello Statico

Per validare il modello 3D, dal punto di vista fluidodinamico, sono stati paragonati i valori delle forze sulle due pale ottenuti tramite il modello multifisico con quelli calcolati con la seguente formula teorica – equazione **26** (i valori si discostano tra il 3% e il 10%) a seconda del valore dell'angolo di rotazione dell'albero.

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho_{fluido} \cdot A_{frontale} \cdot v_{fluido}^2 \quad \mathbf{26}$$

dove si ricorda che:

- C_d è il Drag coefficient

- ρ_{fluido} è la densità del fluido
- v_{fluido} la velocità del fluido
- $A_{frontale}$ è l'area frontale

4.11.2 Validazione del Modello Dinamico

Come primo step per validare il modello dinamico è stato realizzato il seguente foglio di calcolo (riportato in quattro parti, vedi Figura 40, Figura 41, Figura 42 e Figura 43): ovviamente in esso sono state fatte alcune semplificazioni, come aver considerato costante il braccio della forza e il C_D .

vel vento	tau	coppia nominale	k	braccio	area pala	velocità relativa	forza pala
0	5	0	0,741125	0,75	2	0	0
1	5	0	0,741125	0,75	2	0	0
1,5	5	0	0,741125	0,75	2	0	0
2	5	0,5	0,741125	0,75	2	1,4996110888	3,3333333333
2,5	5	0,75	0,741125	0,75	2	1,8366409901	5
3	5	1	0,741125	0,75	2	2,1207703401	6,6666666667
3,5	5	1,25	0,741125	0,75	2	2,3710933225	8,3333333333
4	5	1,5	0,741125	0,75	2	2,5974025974	10
4,5	5	1,75	0,741125	0,75	2	2,8055154539	11,6666666667
5	5	2	0,741125	0,75	2	2,9992221776	13,3333333333
5,5	5	2,5	0,741125	0,75	2	3,3532323344	16,6666666667
6	5	3,25	0,741125	0,75	2	3,8232731023	21,6666666667
6,5	5	4	0,741125	0,75	2	4,2415406801	26,6666666667
7	5	5	0,741125	0,75	2	4,7421866451	33,3333333333
7,5	5	6	0,741125	0,75	2	5,1948051948	40
8	5	7	0,741125	0,75	2	5,6110309077	46,6666666667
8,5	5	8	0,741125	0,75	2	5,9984443552	53,3333333333
9	5	9	0,741125	0,75	2	6,3623110202	60
9,5	5	11	0,741125	0,75	2	7,0337994845	73,3333333333
10	5	13	0,741125	0,75	2	7,6465462046	86,6666666667
10,5	5	15	0,741125	0,75	2	8,2137082082	100
11	5	17	0,741125	0,75	2	8,7441601198	113,3333333333
11,5	5	19	0,741125	0,75	2	9,2442235948	126,6666666667
12	5	21	0,741125	0,75	2	9,718590615	140
12,5	5	22	0,741125	0,75	2	9,947294626	146,6666666667
13	5	23	0,741125	0,75	2	10,1708572506	153,3333333333
13,5	5	24	0,741125	0,75	2	10,3896103896	160
14	5	24	0,741125	0,75	2	10,3896103896	160
14,5	5	24	0,741125	0,75	2	10,3896103896	160
15	5	24	0,741125	0,75	2	10,3896103896	160
15,5	5	24	0,741125	0,75	2	10,3896103896	160
16	5	24	0,741125	0,75	2	10,3896103896	160
16,5	5	24	0,741125	0,75	2	10,3896103896	160
17	5	24	0,741125	0,75	2	10,3896103896	160
17,5	5	24	0,741125	0,75	2	10,3896103896	160
18	5	24	0,741125	0,75	2	10,3896103896	160
18,5	5	24	0,741125	0,75	2	10,3896103896	160
19	5	24	0,741125	0,75	2	10,3896103896	160
19,5	5	24	0,741125	0,75	2	10,3896103896	160
20	5	24	0,741125	0,75	2	10,3896103896	160

Figura 40 Studio della dinamica della turbina (1/4)

V periferica	omega macchina	rpm macchina	rpm generatore	potenza	Co	Cx	eta
0	0	0	0	0	0,225	1,7	0,58413
1	1,3333333333	12,7323954474	63,6619772368	0	0,225	1,7	0,58413
1,5	2	19,098593171	95,4929658551	0	0,225	1,7	0,58413
0,5003889112	0,6671852149	6,3711494948	31,8557474741	1,6679630373	0,225	1,7	0,58413
0,6633590099	0,8844786799	8,4461492377	42,2307461884	3,3167950495	0,225	1,7	0,58413
0,8792296599	1,1723062132	11,1946997192	55,9734985962	5,8615310662	0,225	1,7	0,58413
1,1289066775	1,5052089033	14,3736862407	71,8684312033	9,4075556456	0,225	1,7	0,58413
1,4025974026	1,8701298701	17,8584247833	89,2921239165	14,025974026	0,225	1,7	0,58413
1,6944845461	2,2593127282	21,5748473209	107,8742366046	19,7689863717	0,225	1,7	0,58413
2,0007778224	2,6677037632	25,474694437	127,3734721849	26,6770376319	0,225	1,7	0,58413
2,1467676656	2,8623568875	27,3334948523	136,6674742614	35,7794610937	0,225	1,7	0,58413
2,1767268977	2,9023025303	27,7149476423	138,5747382116	47,1624161167	0,225	1,7	0,58413
2,2584593199	3,0112790931	28,7555971622	143,7779858108	60,2255818628	0,225	1,7	0,58413
2,2578133549	3,0104178066	28,7473724813	143,7368624066	75,2604451645	0,225	1,7	0,58413
2,3051948052	3,0735930736	29,3506518429	146,7532592146	92,2077922078	0,225	1,7	0,58413
2,3889690923	3,1852921231	30,4172991945	152,0864959725	111,4852243068	0,225	1,7	0,58413
2,5015556448	3,3354075264	31,8507957029	159,2539785147	133,4163010551	0,225	1,7	0,58413
2,6376889798	3,5169186397	33,5840991577	167,9204957887	158,261338787	0,225	1,7	0,58413
2,4662005155	3,288267354	31,4006402154	157,0032010769	180,8547044676	0,225	1,7	0,58413
2,3534537954	3,1379383938	29,9651043899	149,8255219497	203,9659956002	0,225	1,7	0,58413
2,2862917918	3,0483890557	29,1099712009	145,5498560043	228,629179177	0,225	1,7	0,58413
2,2584593199	3,0077865069	28,722454207	143,6112271034	255,66185309	0,225	1,7	0,58413
2,2557764052	3,0077018736	28,7214372314	143,607186157	285,7316779879	0,225	1,7	0,58413
2,281409385	3,04187918	29,0478064672	145,2390323358	319,3973139004	0,225	1,7	0,58413
2,552705374	3,4036071653	32,5020542818	162,5102714092	374,3967881808	0,225	1,7	0,58413
2,8291427494	3,7721903325	36,0217642621	180,1088213103	433,8018882377	0,225	1,7	0,58413
3,1103896104	4,1471861472	39,6027105148	198,0135525741	497,6623376623	0,225	1,7	0,58413
3,6103896104	4,8138528139	45,9689082385	229,8445411925	577,6623376623	0,225	1,7	0,58413
4,1103896104	5,4805194805	52,3351059622	261,6755298108	657,6623376623	0,225	1,7	0,58413
4,6103896104	6,1471861472	58,7013036858	293,5065184292	737,6623376623	0,225	1,7	0,58413
5,1103896104	6,8138528139	65,0675014095	325,3375070476	817,6623376623	0,225	1,7	0,58413
5,6103896104	7,4805194805	71,4336991332	357,168495666	897,6623376623	0,225	1,7	0,58413
6,1103896104	8,1471861472	77,7998968569	388,9994842843	977,6623376623	0,225	1,7	0,58413
6,6103896104	8,8138528139	84,1660945805	420,8304729027	1057,662337662	0,225	1,7	0,58413
7,1103896104	9,4805194805	90,5322923042	452,6614615211	1137,662337662	0,225	1,7	0,58413
7,6103896104	10,1471861472	96,8984900279	484,4924501395	1217,662337662	0,225	1,7	0,58413
8,1103896104	10,8138528139	103,2646877516	516,3234387579	1297,662337662	0,225	1,7	0,58413
8,6103896104	11,4805194805	109,6308854752	548,1544273762	1377,662337662	0,225	1,7	0,58413
9,1103896104	12,1471861472	115,9970831989	579,9854159946	1457,662337662	0,225	1,7	0,58413
9,6103896104	12,8138528139	122,3632809226	611,816404613	1537,662337662	0,225	1,7	0,58413

Figura 41 Studio della dinamica della turbina (2/4)

area singola PALA	potenza	savonius classica	savonius raddoppiata	potenza savonius calcolata con la formula del Cx=1,7	potenza limite di betz
0,4455	0	0	0	0	0
0,4455	0,1605714957	0,1227909375	0,245581875	0,1237005	0,27489
0,4455	0,541928798	0,4144194141	0,8288388281	0,4174891875	0,92775375
0,4455	1,2845719656	0,9823275	1,964655	0,989604	2,19912
0,4455	2,5089296203	1,9186083984	3,8372167969	1,9328203125	4,29515625
0,4455	4,3354038339	3,315353125	6,630710625	3,3399135	7,42203
0,4455	6,8845028781	5,2646614453	10,5293228906	5,3036589375	11,78590875
0,4455	10,2765757248	7,85862	15,71724	7,916832	17,59296
0,4455	14,6320775457	11,1893241797	22,3786483594	11,2722080625	25,04935125
0,4455	20,0714369625	15,3488671875	30,697734375	15,4625625	34,36125
0,4455	26,7150825971	20,4293422266	40,8586844531	20,5806706875	45,73482375
0,4455	34,6834430712	26,5228425	53,045685	26,719308	59,37624
0,4455	44,0969470066	33,7214612109	67,4429224219	33,9712498125	75,49166625
0,4455	55,0760230251	42,1172915625	84,234583125	42,4292715	94,28727
0,4455	67,7410997484	51,8024267578	103,6048535156	52,1861484375	115,96921875
0,4455	82,2126057984	62,86896	125,73792	63,334656	140,74368
0,4455	98,6109697968	75,4089844922	150,8179689844	75,967569625	168,81682125
0,4455	117,056620265	89,5145934375	179,029186875	90,1776645	200,39481
2,618,047075761	472,62796875	945,2559375	476,1289166667	1058,06425926	
0,4455	160,5714957	122,7909375	245,581875	123,7005	274,89
0,4455	185,88157771	142,1458590234	284,2917180469	143,1987913125	318,21953625
0,4455	213,720660777	163,4347378125	326,869475625	164,643655	365,87859
2,1096,33747934	838,38234375	1676,7646875	844,5925833333	1876,87240741	
2	1245,6455424	952,56	1905,12	959,616	2132,48
2,1407,92907986	1076,66015625	2153,3203125	1084,6354166667	2410,30092593	
0,4455	352,775576053	269,7716896875	539,543379375	271,7699985	603,93333
0,4455	395,066093733	302,1117528516	604,2235057031	304,3496176875	676,33248375
0,4455	440,608184201	336,9383325	673,876665	339,434172	754,29816
0,4455	489,522276078	374,3435218359	748,6870436719	377,1164368125	838,03652625
0,4455	541,928797988	414,4194140625	828,838828125	417,4891875	927,75375
0,4455	597,94817855	457,2581023828	914,5162047656	460,6451994375	1023,65599875
0,4455	657,700846387	502,95168	1005,90336	506,677248	1125,94944
0,4455	721,307230121	551,5922401172	1103,1844802344	555,6781085625	1234,84024125
0,4455	788,887758374	603,2718759375	1206,543751875	607,7405565	1350,53457
0,4455	860,562859767	658,0826806641	1316,1653613281	662,9573671875	1473,23859375
0,4455	936,452962922	716,1167475	1432,233495	721,421316	1603,15848
0,4455	1016,67849646	777,4661696484	1554,9323392969	783,2251783125	1740,50039625
0,4455	1101,39988901	842,2230403125	1684,446080625	848,4617295	1885,47051
0,4455	1190,61756918	910,4794526953	1820,9589053906	917,2237449375	2038,27498875
0,4455	1284,5719656	982,3275	1964,655	989,604	2199,12

Figura 42 Studio della dinamica della turbina (3/4)

potenza teorica savonius	eta savonius	
0	#DIV/0!	
0,21021	0,5841346154	coppia nominale=potenza/Omega p
0,70945875	0,5841346154	
1,68168	0,5841346154	Omega p=Rpm p*2*Pi.greco()/60
3,28453125	0,5841346154	Fp*b=Cm*tau
5,67567	0,5841346154	k*b*Ap*(Vv-Vm)^2=tau*Cm
9,01275375	0,5841346154	Vm=Vv-radq((tau*Cm)/(Ap*braccio*k)
13,45344	0,5841346154	
19,15538625	0,5841346154	Omega m=Vm/b
26,27625	0,5841346154	
34,97368875	0,5841346154	Rpm m=(Omega m*60)/(2*pi.greco)
45,40536	0,5841346154	
57,72892125	0,5841346154	
72,10203	0,5841346154	
88,68234375	0,5841346154	
107,62752	0,5841346154	
129,09521625	0,5841346154	
153,24309	0,5841346154	
809,107962963	0,5841346154	
210,21	0,5841346154	
243,34435125	0,5841346154	
279,78951	0,5841346154	
1435,2553703704	0,5841346154	
1630,72	0,5841346154	
1843,1712962963	0,5841346154	
461,83137	0,5841346154	
517,19542875	0,5841346154	
576,81624	0,5841346154	
640,85146125	0,5841346154	
709,45875	0,5841346154	
782,79576375	0,5841346154	
861,02016	0,5841346154	
944,28959625	0,5841346154	
1032,76173	0,5841346154	
1126,59421875	0,5841346154	
1225,94472	0,5841346154	
1330,97089125	0,5841346154	
1441,83039	0,5841346154	
1558,68087375	0,5841346154	
1681,68	0,5841346154	

Figura 43 Studio della dinamica della turbina (4/4)

Come secondo step per validare il modello dal punto di vista dinamico è stato utilizzato il Cp presente in letteratura per la turbina Savonius. Il valore massimo di Cp per una turbina Savonius in letteratura è pari a 0,18 ad una velocità di circa 60 rotazioni al minuto e con le pale di diametro pari a 1 metro (o raggio a seconda se si considera rispettivamente la singola pala semicilindrica o l'insieme delle due). Restano non specificate tre variabili di cui due variabili linearmente dipendenti, ovvero la velocità del vento, la distanza tra le pale e la coppia resistente all'albero.

A ogni modo con una velocità del vento di 10 [m/s], con le pale distanti tra loro 0,5 [m] e con un momento resistente pari a 3 [Nm], si ottiene una velocità di rotazione pari a circa 58 [rpm] e un coefficiente prestazionale (Cp) pari a 0,16 (quindi differisce di circa il 11% da letteratura). Considerando le variabili non specificate, la differenza del 11% può essere considerata accettabile.

4.12 *Analisi dei risultati*

In questo paragrafo è stato analizzato l'andamento delle pressioni sulla pala a seguito dell'interazione fluido-struttura. Inoltre verrà analizzato il valore della coppia in funzione del tempo, e le variazioni dell'angolo, della velocità angolare e dell'accelerazione angolare sempre in funzione del tempo.

4.12.1 **Andamento delle pressioni sulla pala in funzione dell'angolazione**

Nelle immagini seguenti è mostrato come varia lo sforzo sulla pala lungo il suo arco in funzione dell'angolazione, inoltre la pala ruota intorno alle coordinate $x=0$ e $y=0$, lo zero dell'arco è visibile in Figura 44, in aggiunta il posizionamento della pala in tale figura (Figura 44) rappresenta l'angolazione a 90° ovvero la posizione perfettamente ortogonale alla direzione del vento.

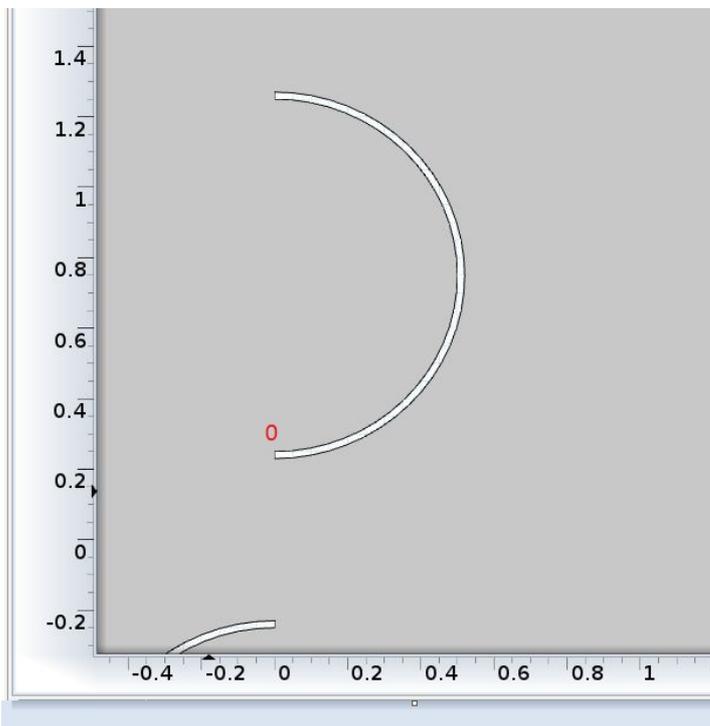


Figura 44:: Individuazione dello zero sull'arco della pala e del centro di rotazione

Nell'immagine sottostante, invece, il grafico (Figura 45) della posizione della pala in

funzione del tempo.

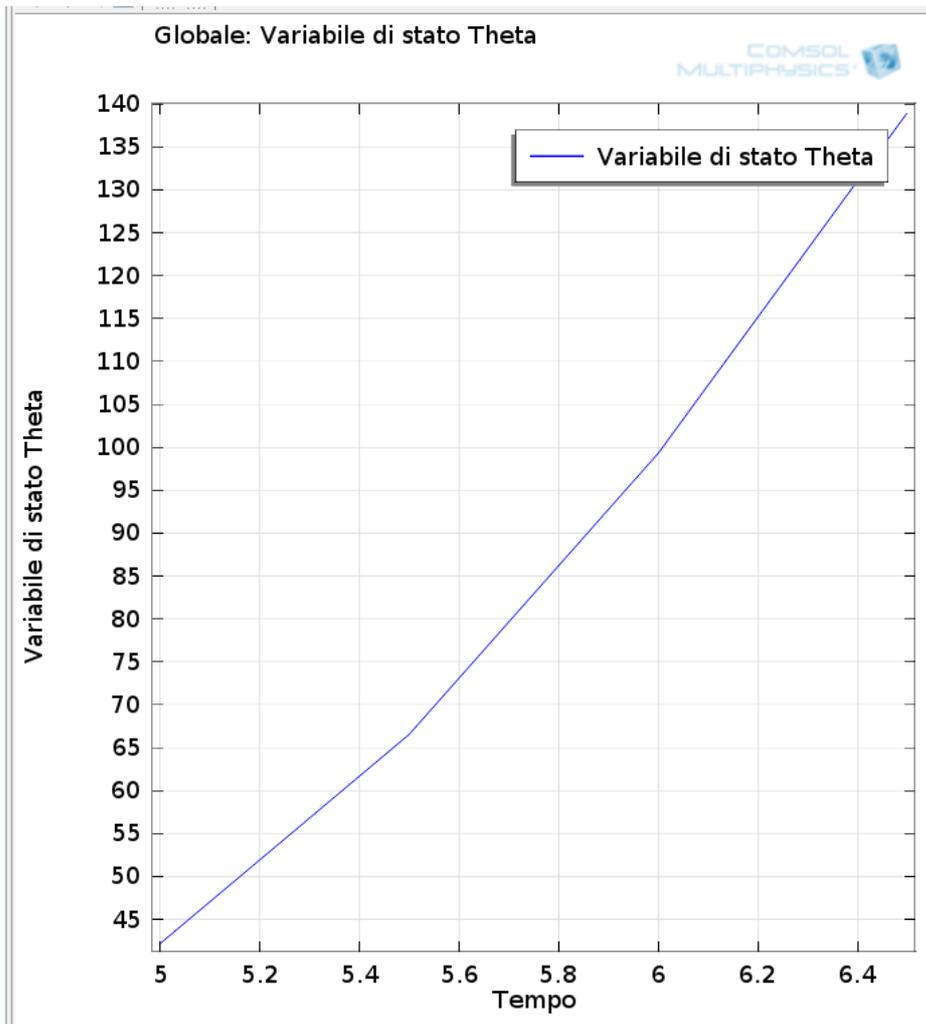


Figura 45: Angolo di rotazione Θ [°] in funzione de tempo [s]

Di seguito sono riportati i risultati per le quattro diverse angolazioni della pala:

- Pala a 45°, campo delle velocità e linee di flusso (Figura 46), andamento dello sforzo sulla pala lungo il suo arco (Figura 47)
- Pala a 70°, campo delle velocità e linee di flusso (Figura 48), andamento dello sforzo sulla pala lungo il suo arco (Figura 49)
- Pala a 100°, campo delle velocità e linee di flusso (Figura 50), andamento dello sforzo sulla pala lungo il suo arco (Figura 51)
- Pala a 140°, campo delle velocità e linee di flusso (Figura 52), andamento dello sforzo sulla pala lungo il suo arco (Figura 53)

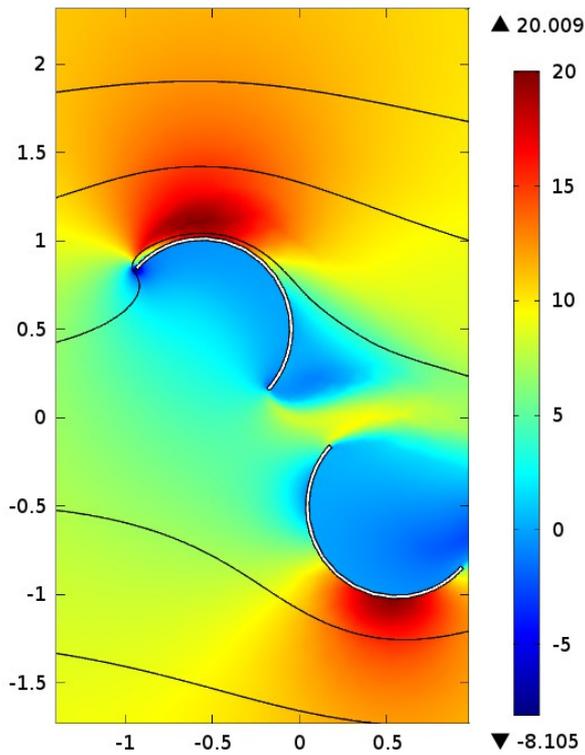


Figura 46: Pala a 45° - campo delle velocità e linee di flusso

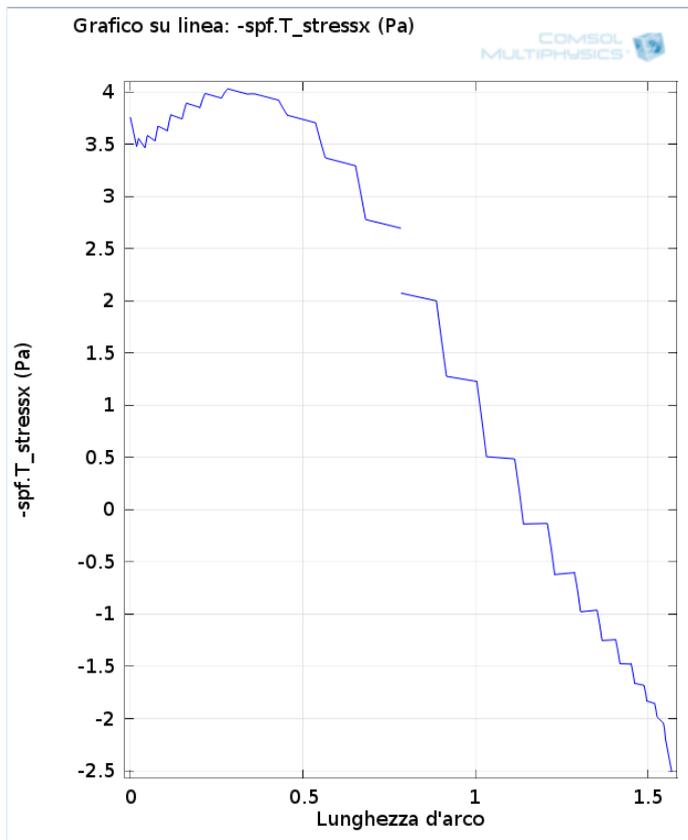


Figura 47 Pala a 45° - andamento dello sforzo sulla lunghezza d'arco

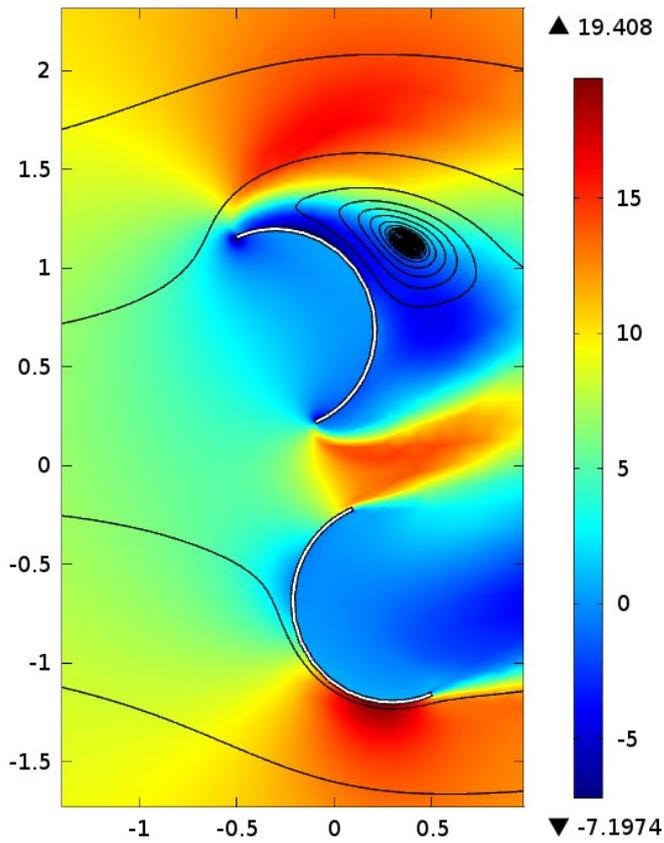


Figura 48: Pala a 70° - campo delle velocità e linee di flusso

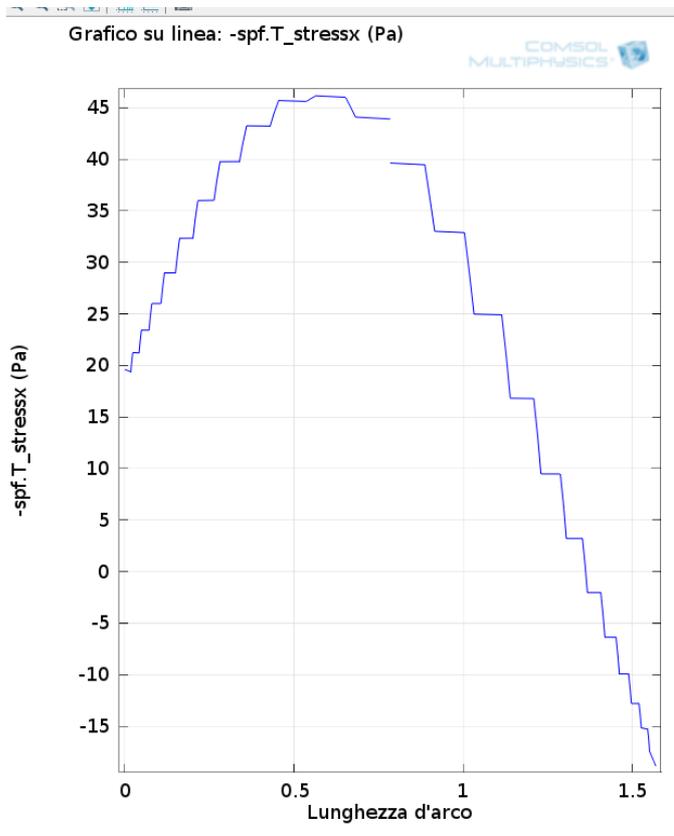


Figura 49: Pala a 70° - andamento dello sforzo sulla lunghezza d'arco

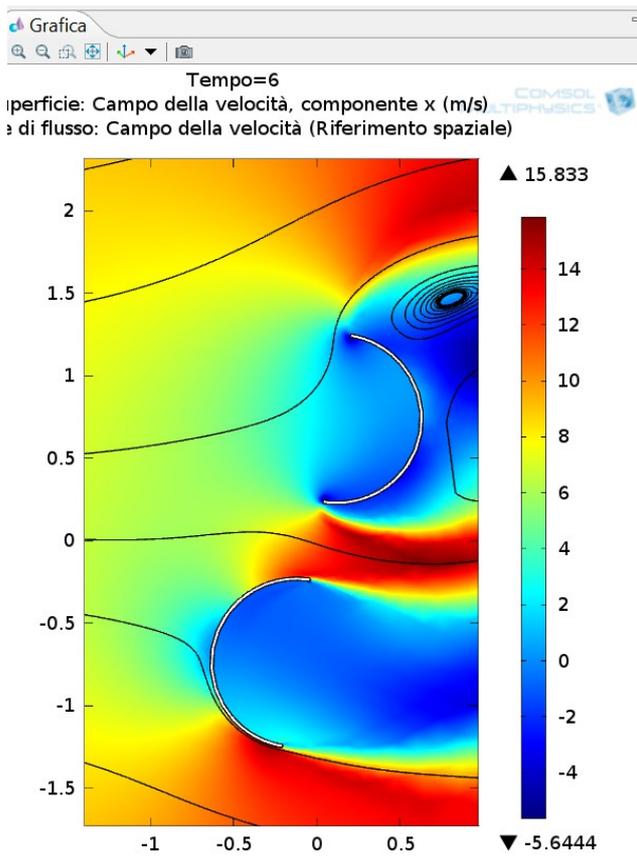


Figura 50 Pala a 100° - campo delle velocità e linee di flusso

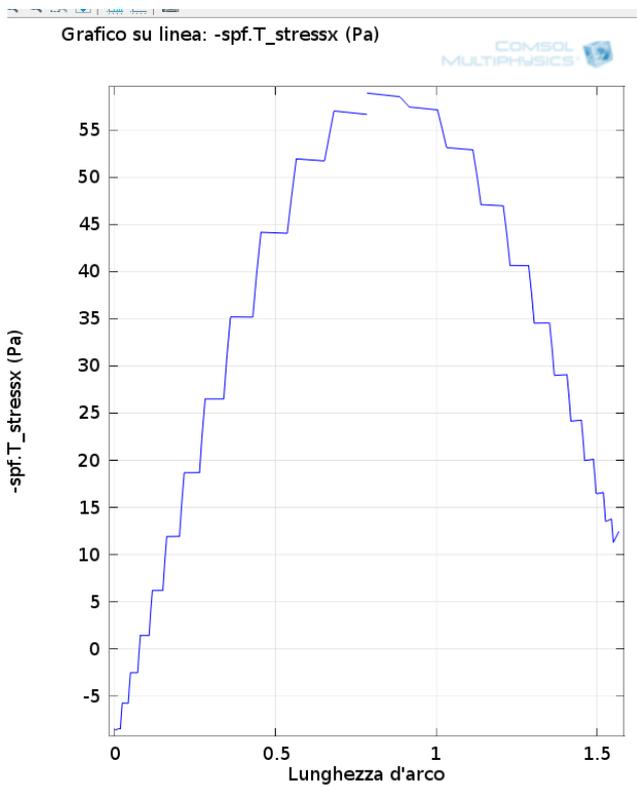


Figura 51 Pala a 100° - andamento dello sforzo sulla lunghezza d'arco

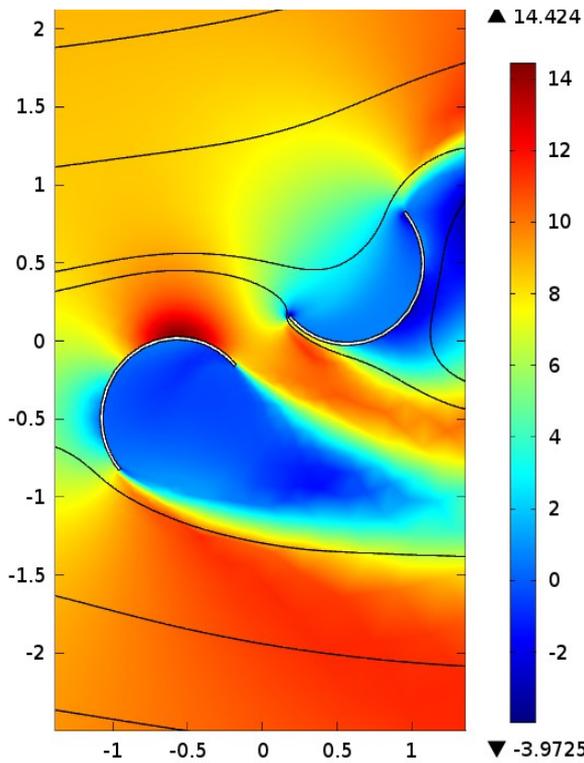


Figura 52: Pala a 140° - campo delle velocità e linee di flusso

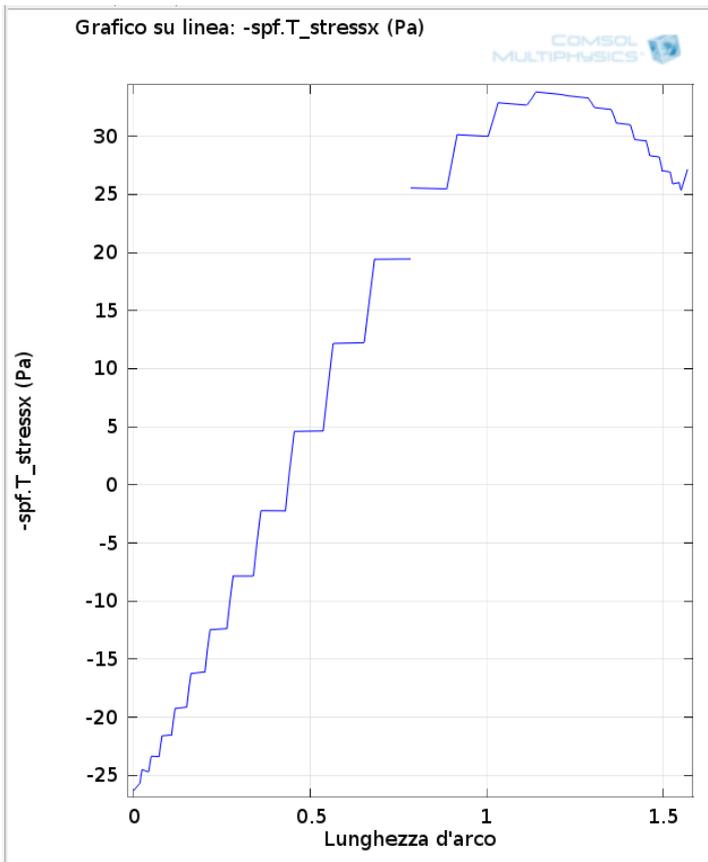


Figura 53: Pala a 140° - andamento dello sforzo sulla lunghezza d'arco

Come era logico aspettarsi, maggiore è l'angolazione della pala oltre i 90° e più il centro degli sforzi tende a spostarsi verso l'esterno della pala, minore è l'angolazione della pala al di sotto dei 90° e più il centro degli sforzi tende a spostarsi verso l'interno della pala.

4.12.2 Andamento delle pressioni sulla pala in funzione della velocità

Di seguito un estratto dell'andamento dell'incremento della velocità angolare con l'aumentare del tempo (Figura 54): per la precisione sono stati presi in considerazione tre rotazioni complete (alla fine della terza il moto è completamente sviluppato): i tempi di riferimento sono l'istante 5.7, 9.5 e 11.9 – in tutti e tre i casi si ha la pala perfettamente ortogonale alla direzione del vento.

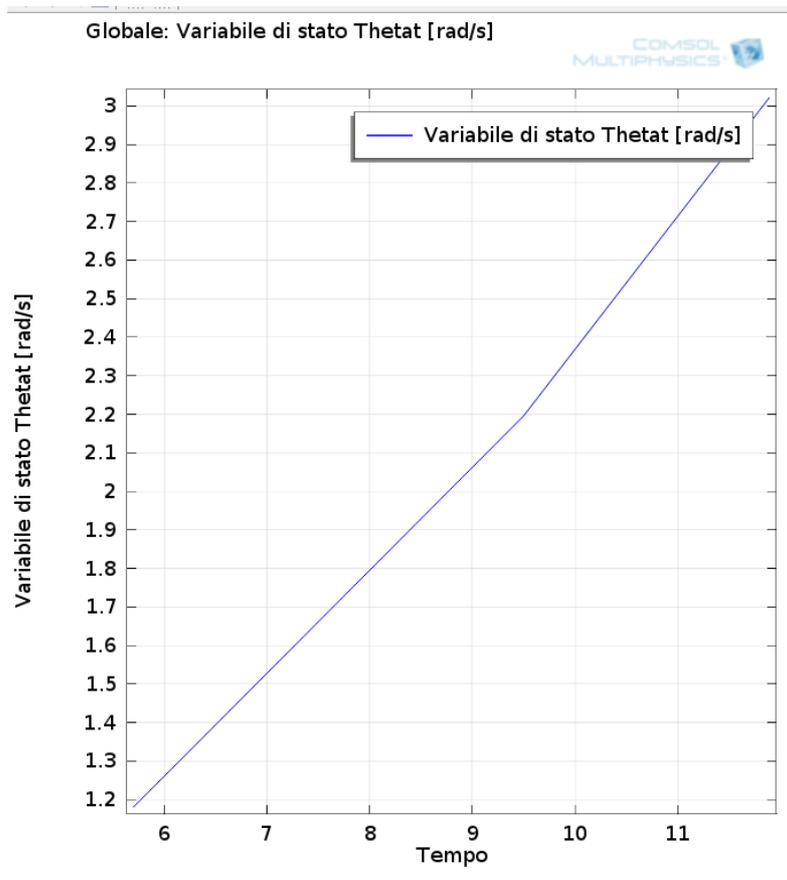


Figura 54: Variazione della velocità angolare in funzione del tempo

La pressione sulla lunghezza dell'arco in funzione della velocità angolare varia come segue (vedi Figura 55): in blu le pressioni alla velocità di 1.2 [rad/s], in rosso alla velocità di 2.2 [rad/s] e infine in verde alla velocità di 3 [rad/s].

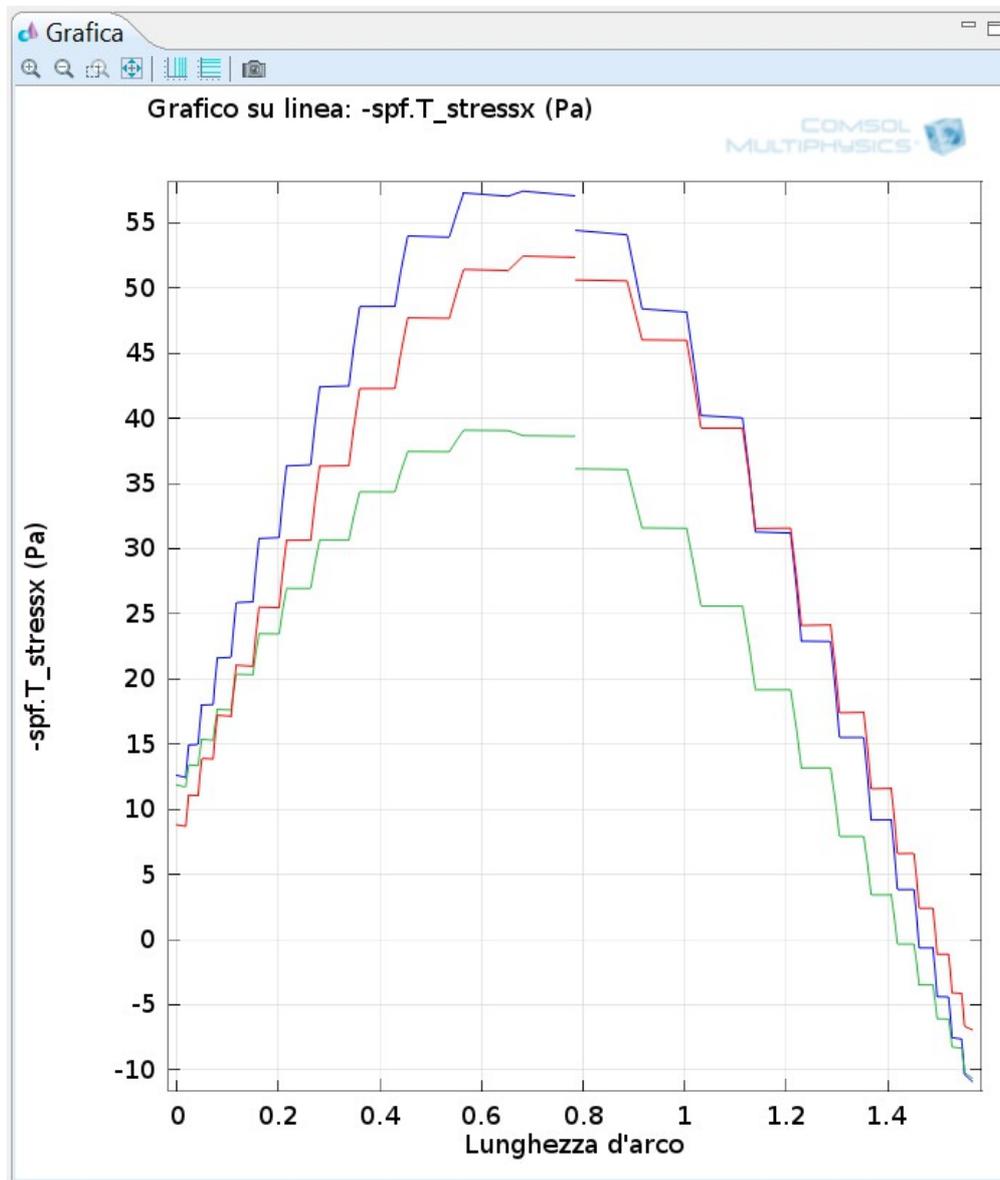


Figura 55: Andamento delle pressioni in funzione della velocità angolare

La pressione, oltre a diminuire per via della minore velocità relativa tra il vento e la pala, tende anche a spostare il baricentro verso l'interno della pala.

4.12.3 Andamento dei momenti e della potenza in funzione del tempo

Di seguito, in Figura 56, l'andamento del momento totale risultante (in rosso M_{tot}), del momento dovuto alla componente lungo x (dove x è la direzione del fluido) della forza generata FSI sulla pala a favore di vento (in blu $M1_Fx$) e del momento dovuto alla componente lungo x della forza generata FSI sulla pala controvento (in verde $M2_Fx$) (ovviamente a favore di vento e controvento sono riferiti alla posizione iniziale, dopo 180° i ruoli saranno invertiti.)

Il valore di M_{tot} è dato dalla differenza tra $M1_Fx$ e $M2_Fx$, all'aumentare della velocità di rotazione della turbina (vedi Figura 56) il valore del momento dovuto alla pala a favore di vento diventa sempre più basso mentre il valore del momento della pala contro vento diventa sempre più alto fino ad eguagliarsi (ciò avviene solo se si lascia girare libera la turbina senza alcun momento resistivo)

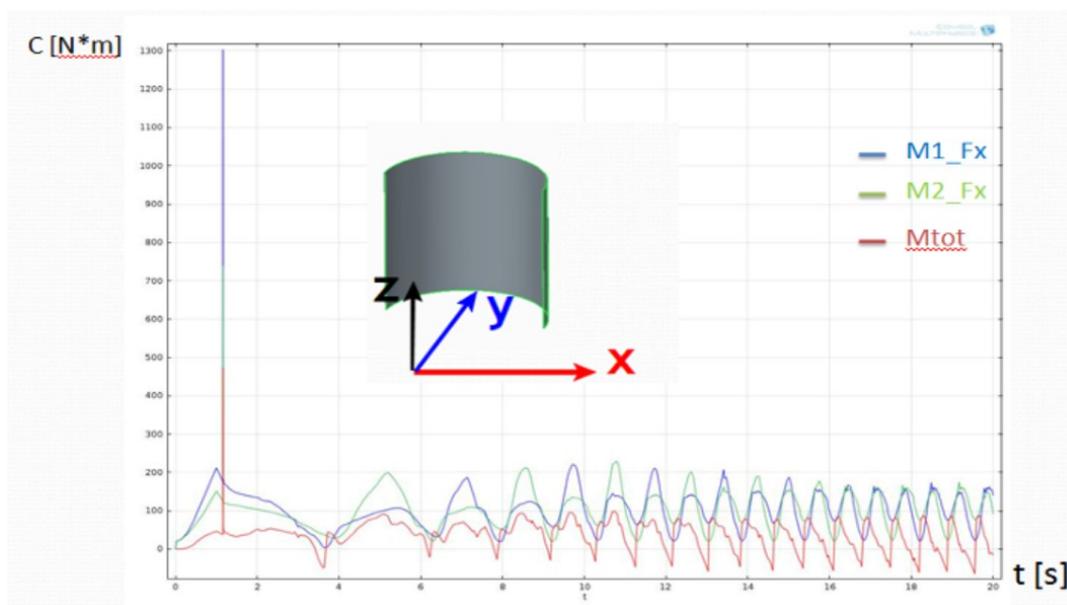


Figura 56: Figura 76: Andamento della coppia in funzione del tempo

La potenza, invece, è data dal momento risultante moltiplicato per la velocità angolare (vedi Figura 57).

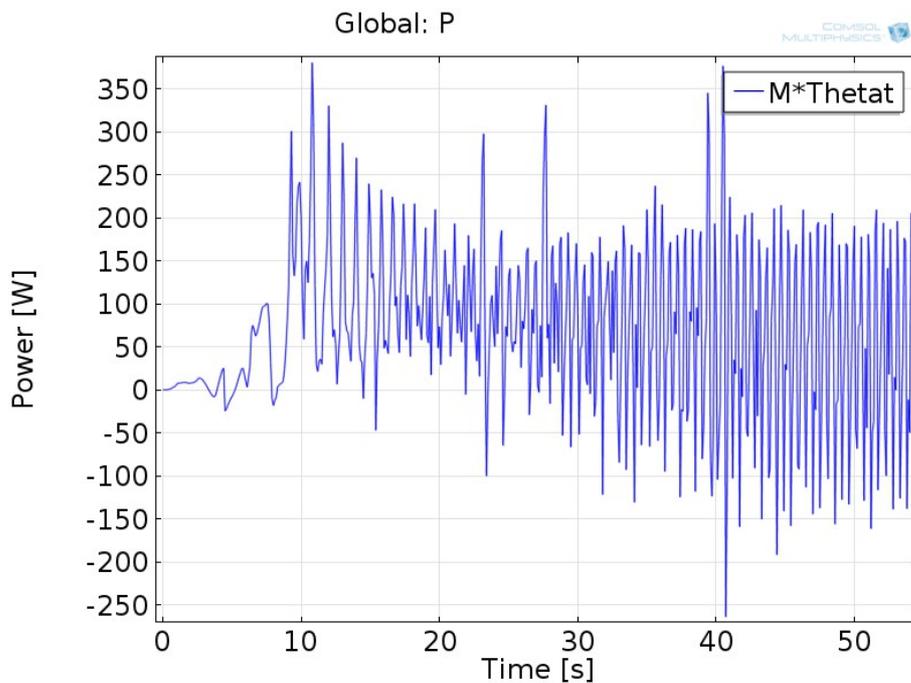


Figura 57: Andamento della potenza in funzione del tempo

4.12.4 **Andamento della rotazione, della velocità e dell'accelerazione angolare in funzione del tempo**

In Figura 58, è riportato l'andamento dell'angolo di rotazione (θ , in blu), della velocità angolare ($\dot{\theta}$, in verde) e della accelerazione angolare ($\ddot{\theta}$, in rosso). Come si può osservare, la velocità angolare tende ad aumentare fino a quando il moto non è completamente sviluppato, solo allora tende ad un valore costante. Quando il moto è completamente sviluppato, anche l'angolo di rotazione cresce con un coefficiente angolare costante e l'andamento dell'accelerazione angolare si ripete in modo costante.

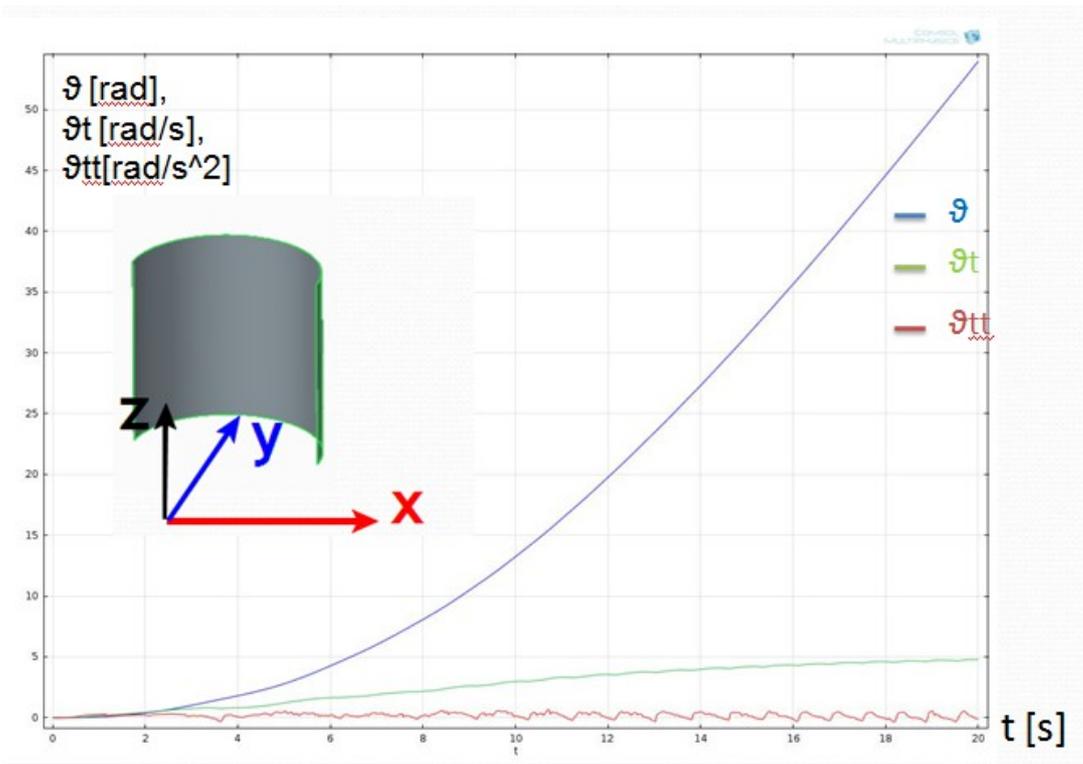


Figura 58: Andamento di: Angolo, Velocità e Accelerazione in funzione del tempo

5 Turbina Sperimentale

5.1 In quale mercato si inserisce la turbina?

Il mercato in cui si vuole far entrare questa turbina è ovviamente il mercato che riguarda le turbine microeoliche delle quali si ha un'ampia offerta. L'obiettivo che si pone il suo ideatore non è quello di scalzare solamente la concorrenza presente nel mercato microeolico, bensì attaccare anche un altro segmento che presenta un tipo di tecnologia diverso ovvero il fotovoltaico. Difatti l'idea è quella di proporre un prodotto con una tecnologia in grado di far diventare la turbina conveniente rispetto alle altre presenti sul mercato e in grado di garantire un ritorno economico capace di indurre il cliente finale a preferirla ad un pannello fotovoltaico.

L'analisi della concorrenza che segue andrà perciò a valutare la concorrenza presente sia sul mercato microeolico che su quello fotovoltaico.

Una macchina italiana da 3kWp può essere fornita nelle varie configurazioni a seconda delle esigenze di installazione con modalità "chiavi in mano", ad un prezzo compreso tra 8500€ e i 12500€ , che equivale ad un prezzo medio ai 4000-4150 €/kWp. Valori inferiori si hanno per macchine più piccole.

5.2 Descrizione della turbina sperimentale

L'idea proposta ha come oggetto la definizione di una turbina ad asse verticale con geometria di pala analoga alle turbine di tipo **Savonius** che però, a differenza di questa, si propone di raggiungere migliore efficienza, avviarsi con minore velocità del vento e raggiungere migliori prestazioni ad alta velocità.

Tali obiettivi sono perseguiti mediante l'ideazione di una macchina che risolve la criticità della presenza di una superficie pala che agisce contro la corrente fluida generando forza frenante per il sistema, e che in virtù della sua condizione di moto trova velocità relativa rispetto alla corrente fluida maggiore rispetto alla superficie pala in condizioni di generazione. La risoluzione della criticità avviene mediante la realizzazione di una macchina a pale oscillanti in cui la forza di frenata viene ridotta permettendo alla pala di posizionarsi in bandiera e contemporaneamente di sfruttare

l'impiego di tale forza nel posizionare la pala attiva in posizione utile alla generazione. Quindi il sistema si compone di una macchina ad asse verticale che dispone di almeno 2 assi di rotazione: il primo classico di generazione ed il secondo ad esso ortogonale che consente la messa in bandiera delle pale.

L'elemento più caratterizzante del progetto è la geometria e la cinetodinamica del generatore eolico con pale oscillanti. La turbina potrà essere a due o quattro pale; in questo progetto si è scelta la configurazione a due pale per semplicità di calcolo fluidodinamico e cinetodinamico, collegate a coppia alle estremità opposte di un braccio, aventi forma di un semi-cilindro con asse su un piano verticale, la cui faccia concava è destinata la migliore conversione dell'energia insita nella corrente fluida.

Gli assi delle due pale sono perpendicolari all'asse del braccio di collegamento e sfasati tra loro di 90°. Il braccio, a sua volta, è collegato, centralmente alla sua lunghezza, all'estremità superiore di un asse verticale, alla base del quale vi è l'ingranaggio per la trasmissione del moto al generatore elettrico.

Il collegamento del braccio orizzontale all'asse verticale è costituito da un cinematismo che trasmette rigidamente all'asse verticale i movimenti di rotazione sul piano orizzontale del complesso braccio e pale, ma consente altresì a detto complesso braccio e pale la possibilità di ruotare intorno all'asse del braccio nei limiti di un angolo definito.

Quindi le pale della turbina, sotto l'azione del vento, hanno la possibilità di due movimenti di rotazione perpendicolari tra di loro, una intorno all'asse verticale di trasmissione del moto, una intorno all'asse orizzontale del braccio che le collega. La figura seguente rappresenta l'aerogeneratore con la turbina descritta:

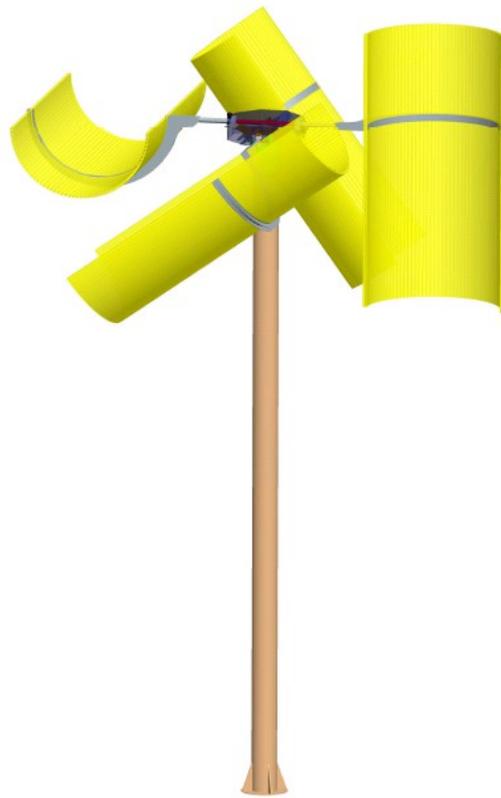


Figura 59: Configurazione 4 pale

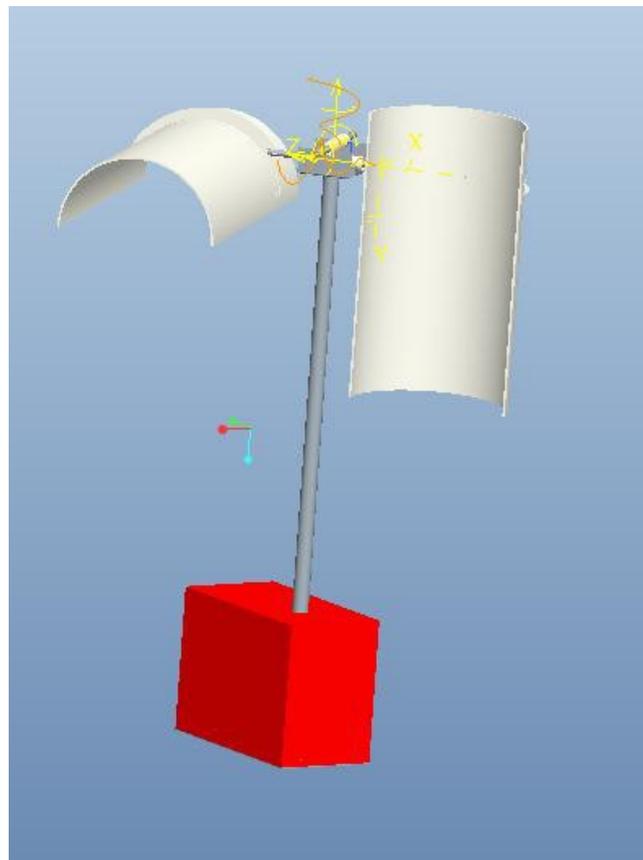


Figura 60: Configurazione a 2 pale

5.3 Il movimento delle pale della turbina

Come illustrato le pale possono ruotare intorno all'asse verticale della turbina nonché intorno all'asse orizzontale del braccio; ne consegue che sotto l'azione del vento i due movimenti si combineranno dando luogo ad una interazione fluidodinamica complessa. L'idea di utilizzare una pala "mobile" a due movimenti, piuttosto che una tradizionale pala "fissa" nasce dall'osservazione del movimento e del lavoro compiuto dalla pala sotto l'azione del vento.

Ponendosi frontalmente alla turbina, si può osservare che mentre da un lato la pala che espone la sua superficie concava al vento trasforma l'energia posseduta dalla corrente fluida nel lavoro di rotazione, la pala sull'altro lato, sempre sotto l'azione del vento, con la sua superficie esposta si oppone alla rotazione prodotta, sia pure in misura minore. Ad ogni giro le due pale scambiano il loro ruolo passando per posizioni intermedie (Figura 59).

Ne consegue che, più la pala espone superficie al vento nella fase attiva, più energia viene trasformata, così meno superficie espone al vento nella fase passiva, minore sarà l'energia frenante.

Nelle pale tradizionali "fisse" ciò si realizza conferendo particolari profili aerodinamici alle stesse pale, così che la maggiore o minore resistenza al vento sia dovuta alla posizione di queste rispetto al flusso d'aria che le investe. Nell'idea alla base di questo progetto, la possibilità di un ulteriore movimento della pala, ovvero della rotazione intorno all'asse del braccio, consente questa ottimizzazione, poiché nella fase passiva, la superficie della pala si pone parallela alle linee di flusso della corrente fluida.

Affinché le pale ruotino nell'ambito delle oscillazione prevista, ovvero ruotino solo di 90° per portare le superfici resistenti da normali a parallele, esiste un vincolo che ne impedisce il movimento raggiunta la rotazione massima attesa.

5.4 Turbina sperimentale in Comsol MultiPhysics

Gli strumenti descritti fino ad ora, in teoria, sarebbero sufficienti per realizzare il modello di questa turbina sperimentale, infatti basterebbe aggiungere un altro asse di rotazione per la mesh. Il problema sta nel dover vincolare la rotazione

assiale della pale tra 0 e 90° in quanto essa è la loro escursione massima.

Per fare ciò è necessario aggiungere un vincolo all'ODE

5.5 ODE con Vincoli in Comsol

Se è necessario introdurre dei vincoli ad una equazione differenziale è possibile utilizzare la strategia riportata di seguito.

ODE di partenza

$$\ddot{\theta} - \frac{M}{J} = 0$$

dove

la M è il momento risultante, J è il momento polare e $\ddot{\theta}$ è l'accelerazione angolare.

Nel caso in cui si voglia aggiungere il seguente vincolo

$$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

risulta necessario correggere l'equazione di partenza aggiungendo la derivata prima temporale e il termine non derivato ($\dot{\theta}$ e θ)

$$\theta + \dot{\theta} + \ddot{\theta} - \frac{M}{J} = 0$$

in aggiunta occorre che i due termini aggiunti siano nulli per $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ e che $\ddot{\theta}$ deve essere nullo per valori esterni al vincolo (per fare ciò occorre porre uguale a zero il termine M/J). Quindi occorre moltiplicare i termini per una funzione correttiva.

Le due seguenti funzioni (function1 e function2) sono speculari, prendono in ingresso θ e M e restituiscono 0 o 1.

5.6 Interfaccia Matlab-Comsol

Al fine di poter utilizzare le funzione di matlab in comsol è necessario che queste

ultime (le funzioni) siano nella stessa cartella nel quale è presente il file di comsol o che venga specificato il path nelle opzioni di Comsol.

In aggiunta è necessario settare in Comsol il direttorio dove è contenuta l'installazione di MatLab (vedi Figura 61 e Figura 62).

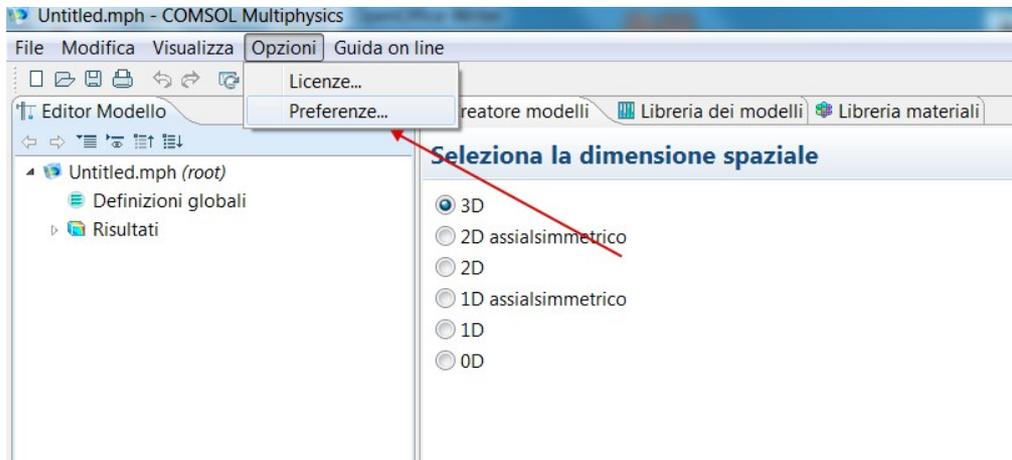


Figura 61: Integrazione MatLab in Comsol (1/2)

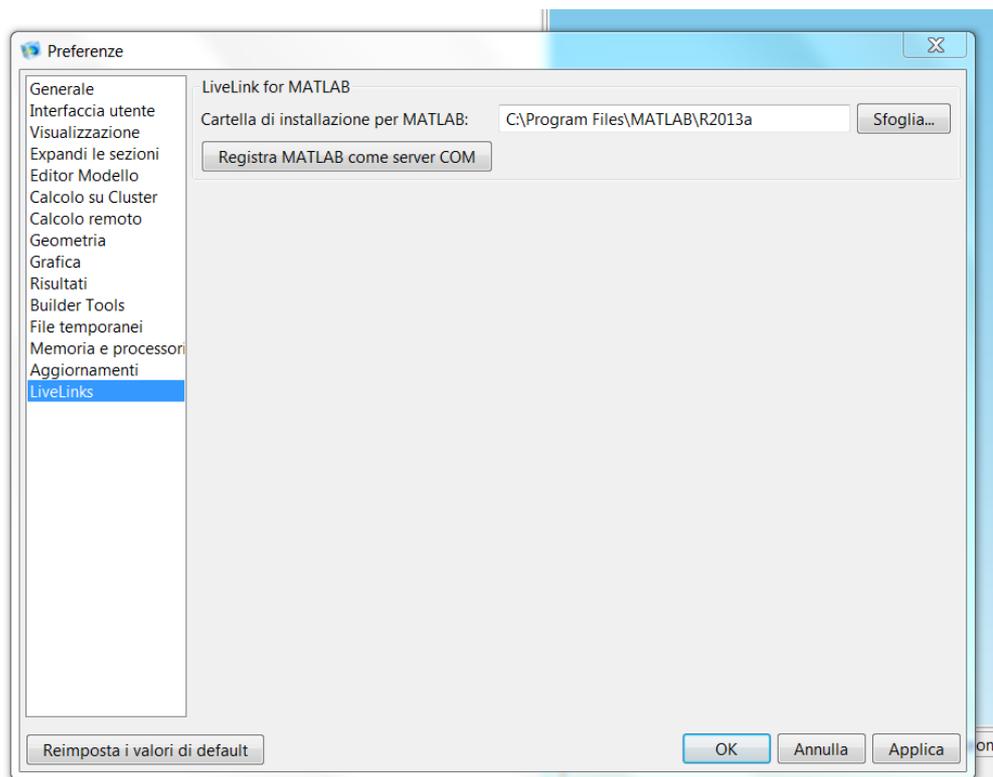


Figura 62: Integrazione MatLab in Comsol (2/2)

[15]

5.7 ODE per l'asse orizzontale

Di seguito l'equazione differenziale corretta con le funzioni function1 e function2

$$a * \text{function2}(\theta, M) * \theta + b * \text{function2}(\theta, M) * \dot{\theta} + \dot{\theta} - \text{function1}(\theta, M) * M = 0$$

dove :

- **a** e **b** sono entrambi valori trovati per tentativi, stabilizzano e migliorano la qualità della soluzione,
- function1 vale 1 per $0 < \theta < 90$, mentre vale 0 al di fuori di questi valori,
- function2 è il complementare a 1 di function1

5.8 Risposta in frequenza ODE asse orizzontale e calcolo dei parametri di stabilizzazione dell'ODE

La risposta in frequenza dell'equazione differenziale dopo l'inserimento dei controllori (utilizzata per il controllo della rotazione intorno ad un asse orizzontale) si comporta come quella di un sistema del secondo ordine.

La risposta in frequenza di un sistema del secondo ordine ha i seguenti parametri che lo identificano (vedi Figura 63):

- massima sovraelongazione S : differenza tra il valore massimo raggiunto dall'uscita ed il valore finale di regime
- tempo di ritardo T_r tempo necessario affinché l'uscita raggiunga il 50% del valore finale
- Tempo di salita T_s tempo necessario affinché l'uscita passi dal 10% al 90% del valore finale
- tempo di assestamento T_a tempo necessario affinché si rimanga entro il $\pm 5\%$ del valore finale
- istante di massima sovraelongazione T_m istante al quale si presenta la massima sovraelongazione

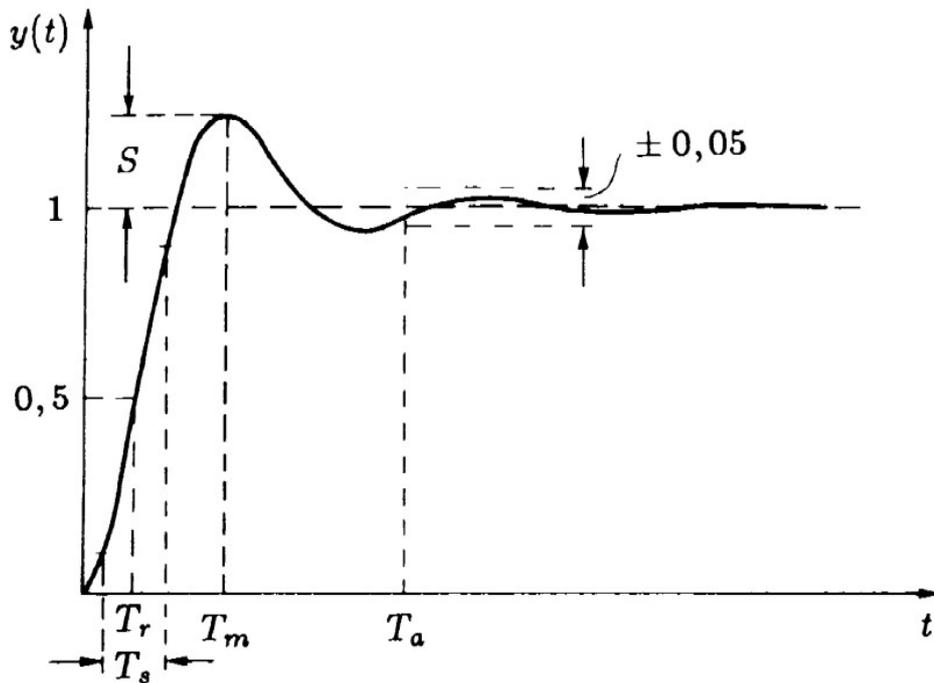


Figura 63: Parametri identificativi di un sistema del secondo ordine

Per la risoluzione del problema, e quindi per il settaggio dei parametri “a” e “b”, è stato utilizzato il metodo “trail and error”: i valori cercati fanno sì che si ha una sovralongazione e un tempo di salita entrambi con valori “bassi” (ovviamente riferiti al contesto).

5.9 Verifica del funzionamento dei vincoli per l'ODE

Per validare il metodo appena descritto, è stata effettuata la seguente prova: è stato disabilitato il modulo di fluidodinamica (in modo che la prova potesse essere fatta con un tempo di attesa minimo, vedi Figura 64) ed al posto del momento risultante dalla FSI è stata implementata una funzione onda quadra.

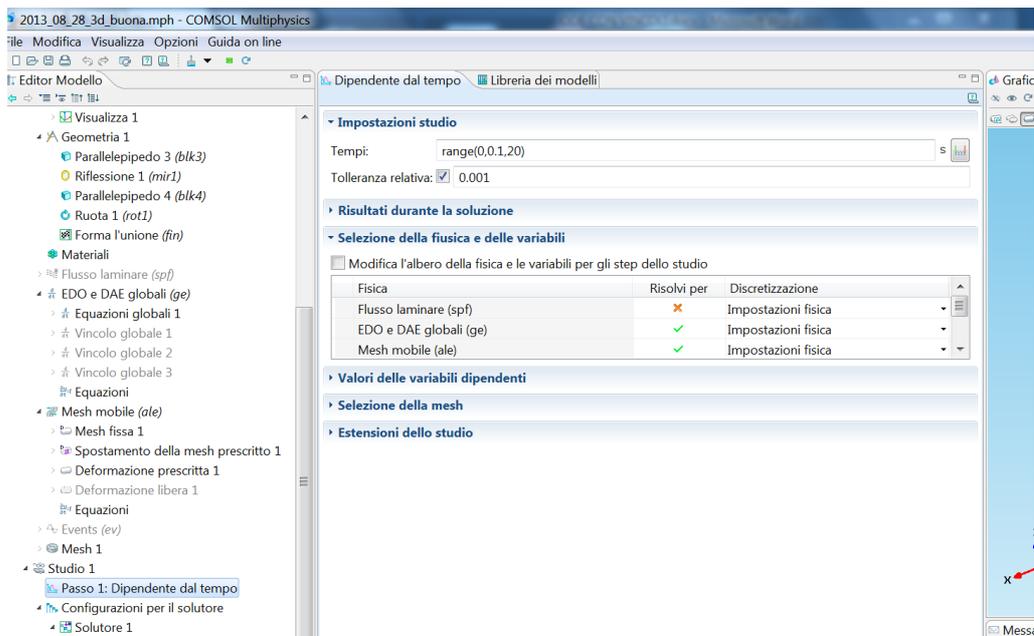


Figura 64: Disabilitazione modulo CFD

Come è possibile da osservare nella Figura 65, la funzione ODE riesce ad inseguire decisamente bene l'onda quadra e il valore dell'angolo θ varia tra 0 e $\pi/2$ (1.57). In aggiunta in Figura 66, è possibile osservare come variano la velocità e l'accelerazione angolare (rispettivamente in verde e in rosso) in funzione dell'angolo di rotazione (in blu), il picco di accelerazione (decelerazione) che si ha in corrispondenza di $\theta=0$ e di $\theta=\pi/2$ fisicamente rappresenta il vincolo che impedisce alla pala di andare oltre gli angoli stabiliti (è stato simulato un urto, in realtà potrebbe esserci qualche componente che attutisce l'urto).

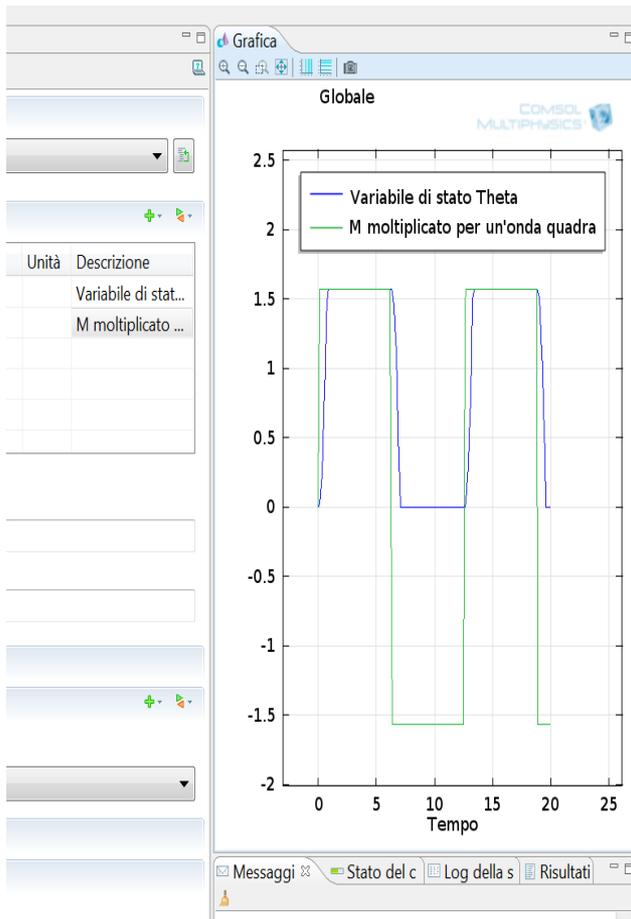


Figura 65: Test con l'onda quadra



Figura 66: Andamento della velocità e della accelerazione angolare

5.10 Implementazione e soluzione del modello Multifisico

Rispetto al modello multifisico esposto precedentemente, questo deve essere necessariamente in 3D e le pale nella posizione di partenza sono a 90° tra di loro (Figura 67 e Figura 68).

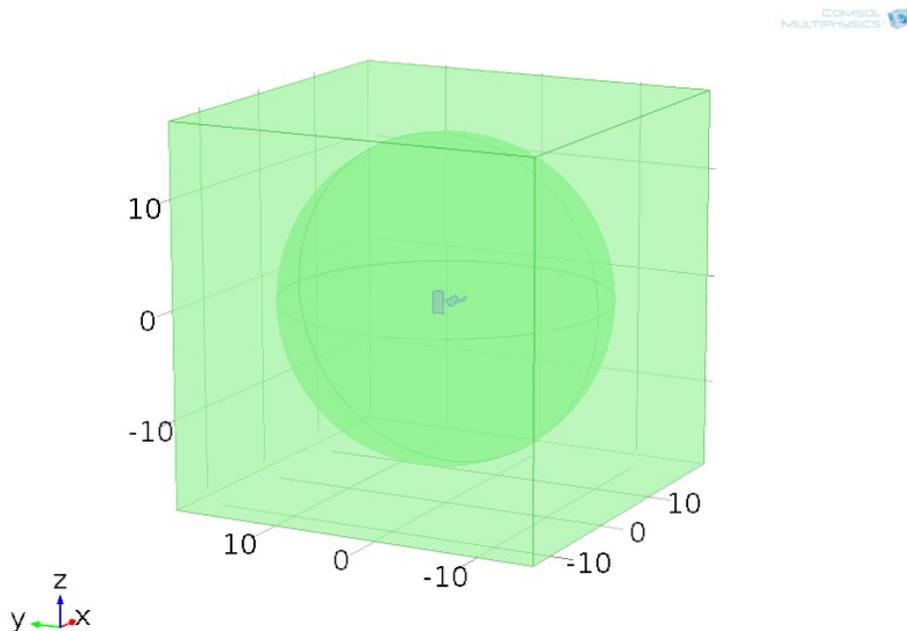


Figura 67: Modello multifisico turbina sperimentale (1/2)

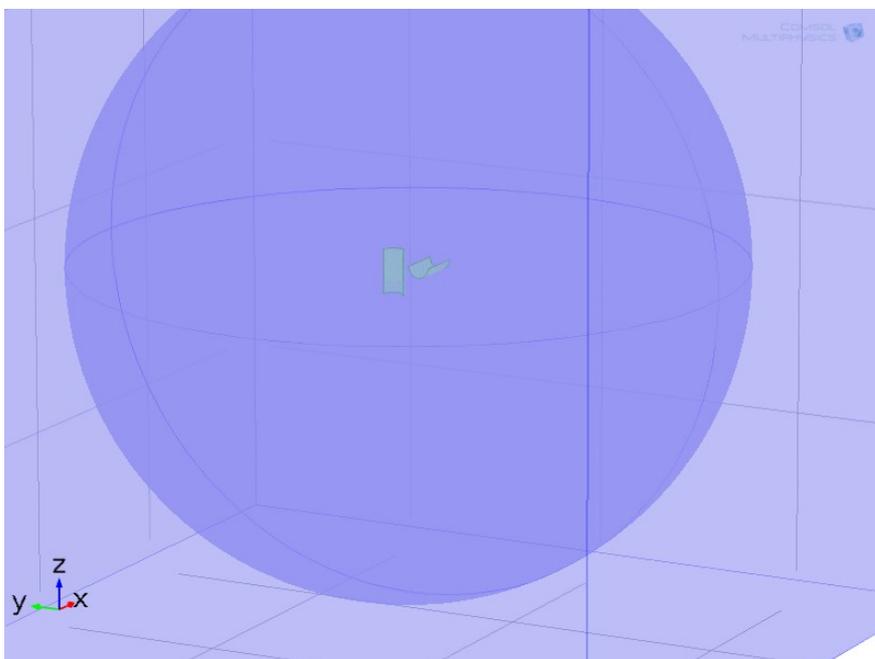


Figura 68: Modello multifisico turbina sperimentale (2/2)

Di seguito (Figura 69), invece, le linee di pressione sulle pale.

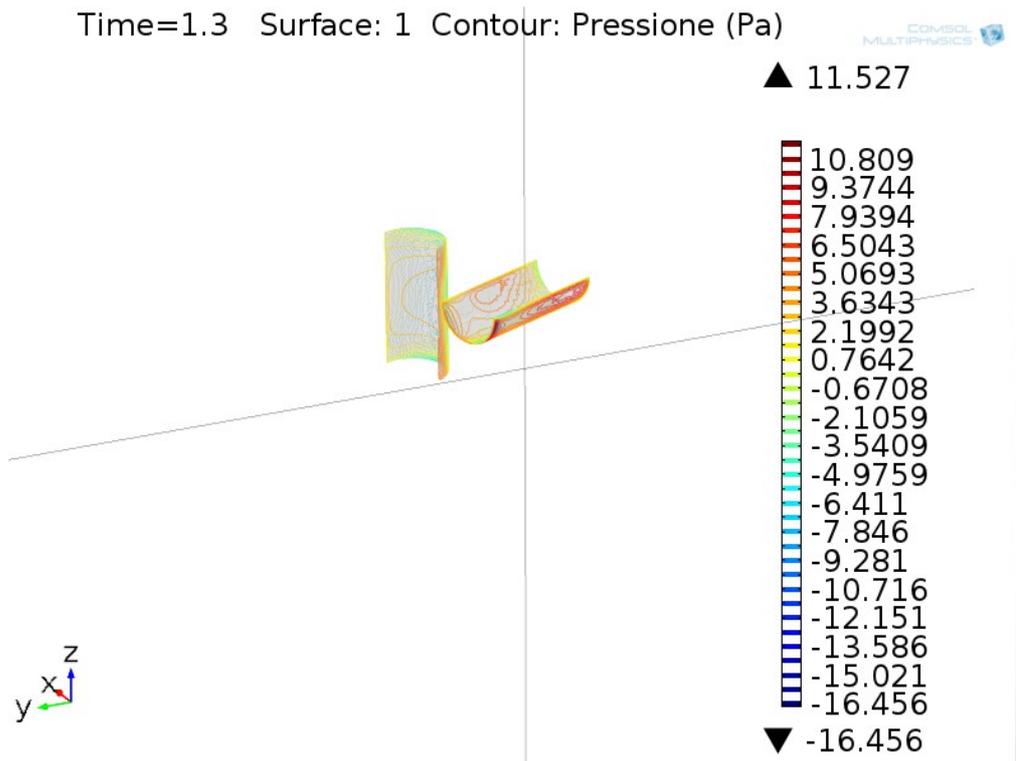


Figura 69: Linee di pressione sulle pale

Nelle figure sottostanti, rispettivamente, l'andamento del campo di velocità durante la fase di inversione delle pale (Figura 70), e nella fase di pale ortogonali alla direzione del vento in vista dall'alto (Figura 71), in vista inclinata (Figura 72) e in vista inclinata con il piano di sezione al di sotto della pala in opposizione di vento (Figura 73)

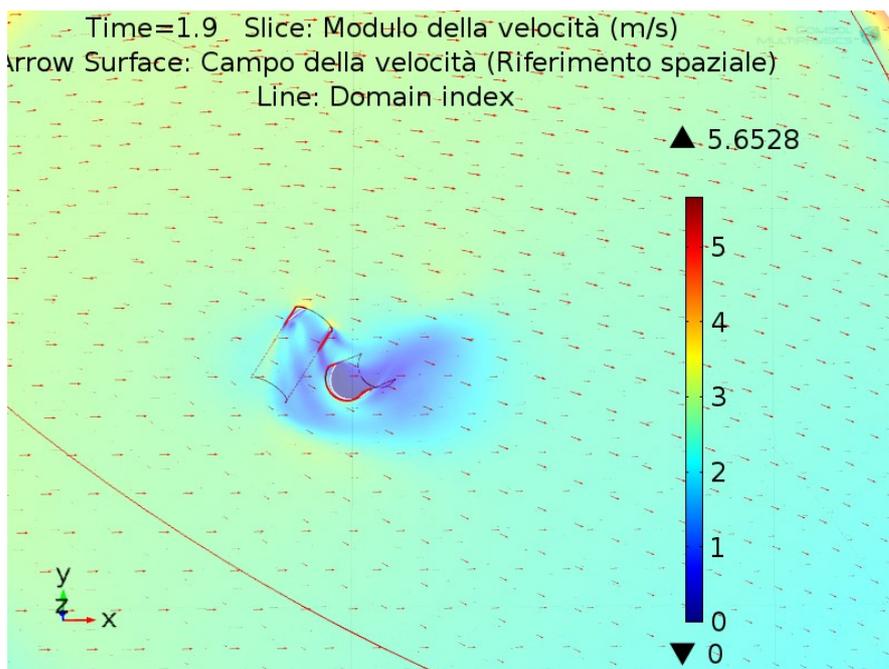


Figura 70: Campo di velocità - inversione delle pale

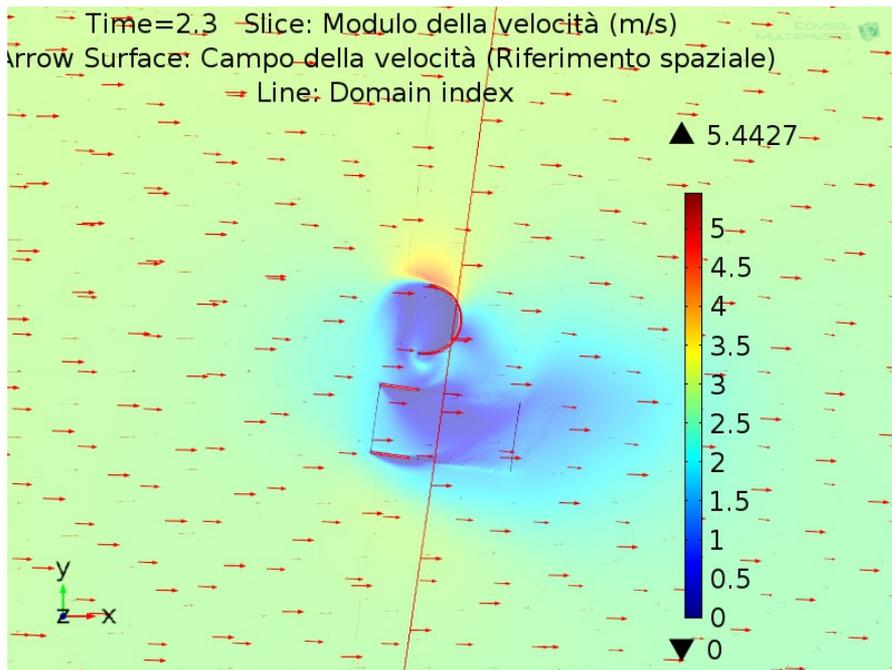


Figura 71: Campo di velocità - ortogonale al vento - vista dall'alto

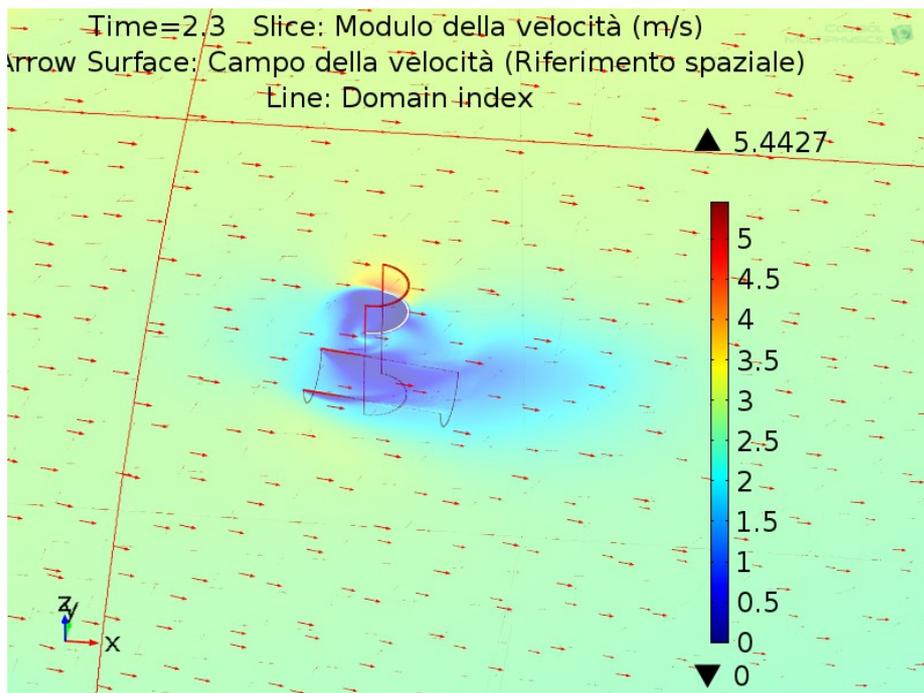


Figura 72: Campo di velocità - ortogonale al vento - vista inclinata

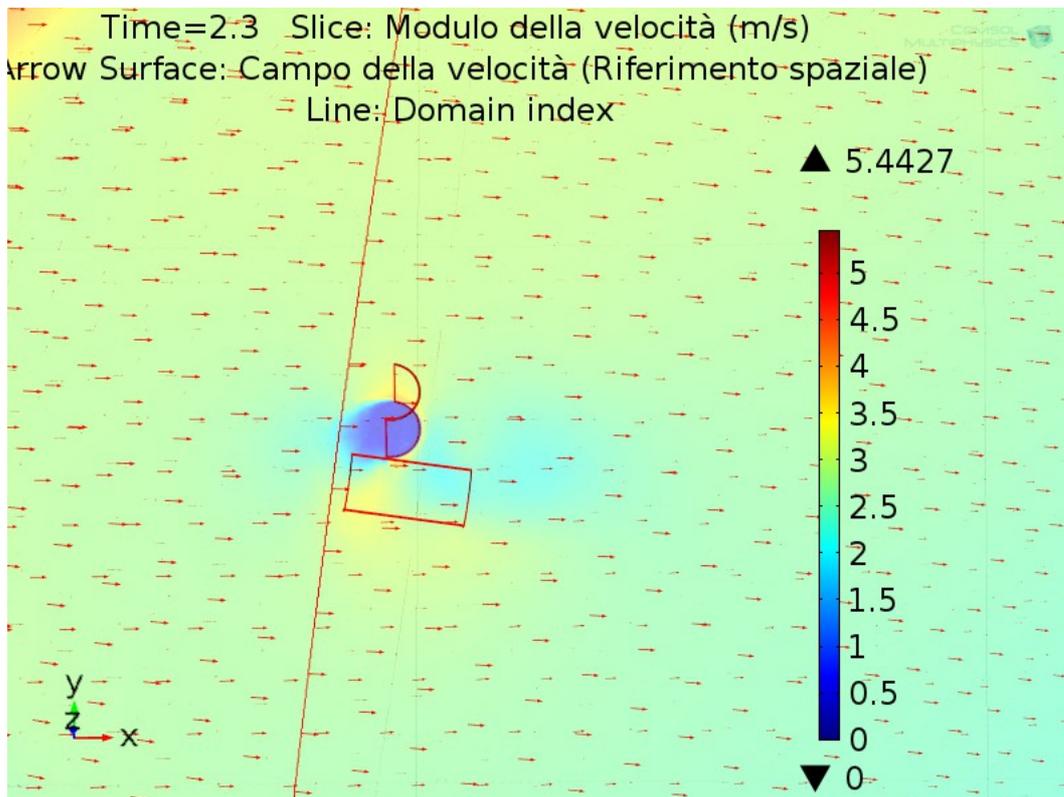


Figura 73: Campo di velocità - ortogonale al vento - vista inclinata – piano di sezione al di sotto della pala in opposizione di vento

Osservando i risultati è possibile dedurre che:

- durante la fase di inversione delle pale entrambe sono soggette alle sollecitazione del vento,
- durante la fase di pale ortogonali alla direzione del vento la pala in opposizione di vento risulta poco sollecitata – al di sopra e al di sotto di essa l'aerodinamica della pala a favore di vento non risente della sua presenza.

5.11 Realizzazione del prototipo fisico

Dopo aver ultimato il prototipo virtuale si è proceduto con la realizzazione del prototipo fisico. Di seguito i principali componenti commerciali utilizzati.

5.11.1 Generatore a Magneti Permanenti

Il generatore a magneti permanenti scelto è dalla Soga Energies, modello PMG112.

Di seguito vengono riportate:

- Disegno Tecnico (vedi Figura 74)

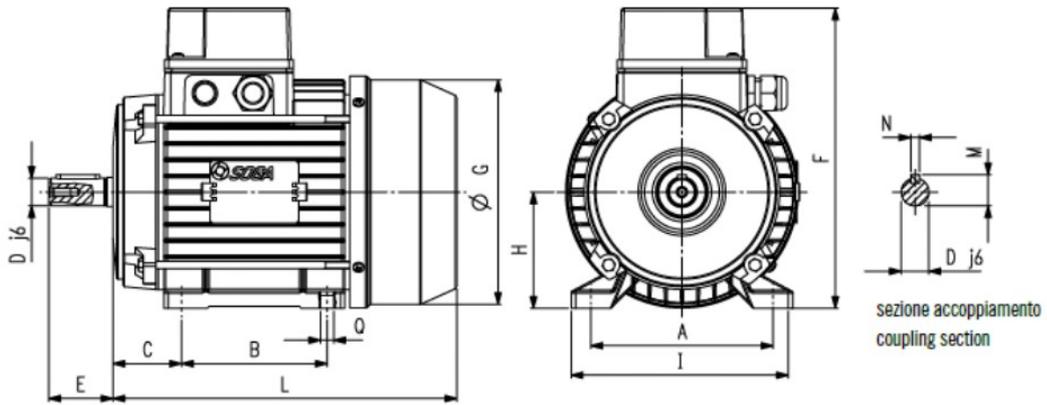


Figura 74: Disegno tecnico motore a magneti permanenti

Le caratteristiche tecniche (vedi Figura 75):

modelli / models	characteristics		dimensioni forma B3 (mm) - dimensions B3 form (mm)													
	poles	rpm max	A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	M	N	Q	
PMG 112	12	4000	190	140	70	28	60	262	215	112	220	328,5	31	8	11	

Figura 75: Caratteristiche tecniche Motore a Magneti Permanenti

- Le tensioni possono avere variazioni sensibili (anche del -20%) da vuoto a carico nominale.
 - La tensione a vuoto e la frequenza sono proporzionali alla velocità;
 - Non esistono sotto o sovra tensioni in transitorio;
 - p.f. = 1.
- Le curve (vedi Figura 76)



Figura 76 Curve Motore a Magneti permanenti

5.11.2 Inverter

L'inverter scelto è dell'Aurora, modello UNO-2.0-10UTD-W.

Di seguito sono riportati:

- La curva di efficienza (Figura 77):

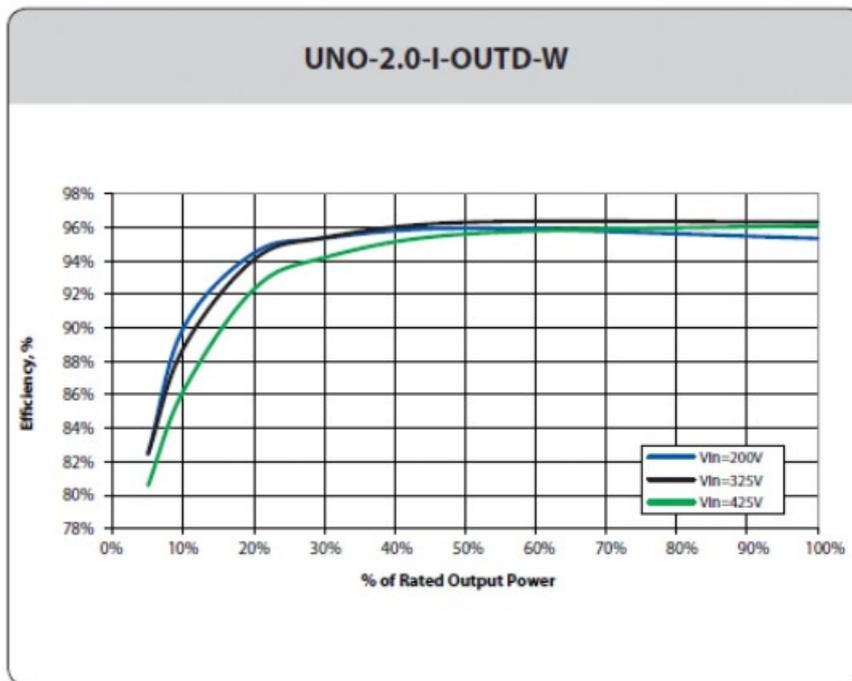


Figura 77: Curva di efficienza inverter

- La Scheda tecnica (vedi Figura 78)

PARAMETRI	UNO-2.0-I-OUTD-W
Ingresso	
Massima Tensione Assoluta DC in Ingresso ($V_{max,abs}$)	500 V
Intervallo Operativo di Tensione DC in Ingresso ($V_{dcmin}...V_{dcmax}$)	90...500 V
Intervallo di Tensione di Ingresso a Piena Potenza ($V_{sp,min}...V_{sp,max}$)	200...470 V
Limitazione di Potenza DC	Limitazione di Potenza a 12.5 Amax per 90 V ≤ Vdc ≤ 200 V Derating da MAX a Zero [450V ≤ Vdc ≤ 500V]
Massima Corrente DC in Ingresso ($I_{dc,max}$)	12.5 A
Massima Corrente di Cortocircuito di Ingresso	15.0 A
Tipo di Connessione DC	Morsettiera a vite Pressacavo
Protezioni di Ingresso	
Protezione da Inversione di Polarità	No
Protezione da Sovratensione di Ingresso - Varistore	2
Controllo di Isolamento	In accordo alla normativa locale
Uscita	
Tipo di Connessione AC alla Rete	Monofase
Potenza Nominale AC di Uscita (P_{ac})	2000 W
Potenza Massima AC di Uscita ($P_{ac,max}$)	2200 W ⁽¹⁾
Tensione Nominale AC di Uscita (V_{ac})	230 V
Intervallo di Tensione AC di Uscita	180...264 V ⁽¹⁾
Massima Corrente AC di Uscita ($I_{ac,max}$)	10.0 A
Frequenza Nominale di Uscita (f_i)	50 Hz
Intervallo di Frequenza di Uscita ($f_{min}...f_{max}$)	47...53 Hz ⁽²⁾
Fattore di Potenza Nominale ($\cos\phi_{i,ac}$)	> 0.990
Distorsione Armonica Totale di Corrente	< 2%
Tipo di Connessioni AC	Morsettiera a vite
Protezioni di Uscita	
Protezione Anti-Islanding	In accordo alla normativa locale
Massima Protezione da Sovracorrente AC	15.0 A
Protezione da Sovratensione di Uscita - Varistore	2 (L - N / L - PE)
Prestazioni Operative	
Efficienza Massima (η_{max})	96.3%
Consumo in Stand-by	< 8.0 W ⁽³⁾
Comunicazione	
Monitoraggio Locale Cablato	PVI-USB-RS485_232 (opz.), PVI-DESKTOP (opz.)
Monitoraggio Remoto	PVI-AEC-EVO (opz.), AURORA-UNIVERSAL (opz.)
Monitoraggio Locale Wireless	PVI-DESKTOP (opz.) con PVI-RADIOMODULE (opz.)
Interfaccia Utente	Display grafico
Ambientali	
Temperatura Ambiente	-25...+60°C (-13...+140°F) con derating sopra 50°C (122°F)
Emissioni Acustiche	< 50 db(A) @ 1 m
Massima Altitudine Operativa senza Derating	2000 m / 6560 ft
Fisici	
Grado di Protezione Ambientale	IP 65
Sistema di Raffreddamento	Naturale
Dimensioni (H x L x P)	518mm x 367mm x 161mm / 20.4" x 14.4" x 6.3"
Peso	< 17 kg / 37.4 lb
Sicurezza	
Livello di Isolamento	Trasformatore ad alta frequenza
Certificazioni	CE

Figura 78: Scheda tecnica inverter

5.11.3 Raddrizzatore

Il raddrizzatore è anch'esso dell'AURORA, modello 4000 WIND-INTERFACE.

- Di seguito la Scheda tecnica (Figura 79):

PARAMETRI	4000-WIND-INTERFACE
Ingresso	
Intervallo di Tensione AC in ingresso (senza danneggiamento) ($V_{ac,min} \dots V_{ac,max}$)	0...400 V
Intervallo Operativo della Tensione AC di Ingresso ($V_{acmin} \dots V_{acmax}$)	35...400 V
Intervallo Operativo di Frequenza ($f_{min} \dots f_{max}$)	0...600 Hz ⁽¹⁾
Massima Corrente AC di Ingresso ($I_{ac,max}$)	16.6 A
Massima Corrente della Resistenza di Frenatura ($I_{MR,max}$)	30 A
Intervallo di Tensione della Resistenza di Frenatura ($V_{MRmin} \dots V_{MRmax}$)	0...600 V
Tipo di Connessione di Ingresso	Morsettieria a molla Pressacavo
Protezione di Ingresso	
Protezione da Sovratensione di Ingresso-Varistori	3
Dimensione Fusibili in Ingresso	3 x 6 A
Uscita	
Massima Potenza di Uscita ($P_{dc,max}$)	4 kW
Intervallo di Tensione di Uscita ($V_{dc,min} \dots V_{dc,max}$)	0...600 V
Massima Corrente di Uscita ($I_{dc,max}$)	20 A
Tipo di Connessione di Uscita	Morsettieria a molla Pressacavo
Protezione di Uscita	
Sovratensione di Uscita	Si
Prestazioni Operative	
Efficienza di Picco (η_{peak})	99.4 %
Consumo in Stand-by	< 3 W
Comunicazione	
Sistema di Monitoraggio Locale	-
Controllo Remoto	-
Interfaccia Utente	-
Ambientali	
Temperatura Ambientale	-25...+55°C / -13...131°F
Umidità Relativa	< 100% con condensa
Emissioni Acustiche	< 40 dB(A)
Massima Altitudine Operativa senza Derating	2000 m / 6560 ft
Fisici	
Grado di Protezione Ambientale	IP 65
Sistema di Raffreddamento	Naturale
Dimensioni (H x L x P)	252 mm x 287 mm x 85.7 mm / 9.9" x 11.3" x 3.37"
Peso	1.8 kg / 4.0 lb
Sistema di Monitoraggio	Staffe da parete
Sicurezza	
Certificazioni	CE
Sicurezza e Standard EMC	EN 50178, EN 61000-6-2, EN 61000-6-4

Figura 79: Scheda tecnica raddrizzatore

5.11.4 Schema di Collegamento

Di seguito lo schema di collegamento (vedi Figura 80)

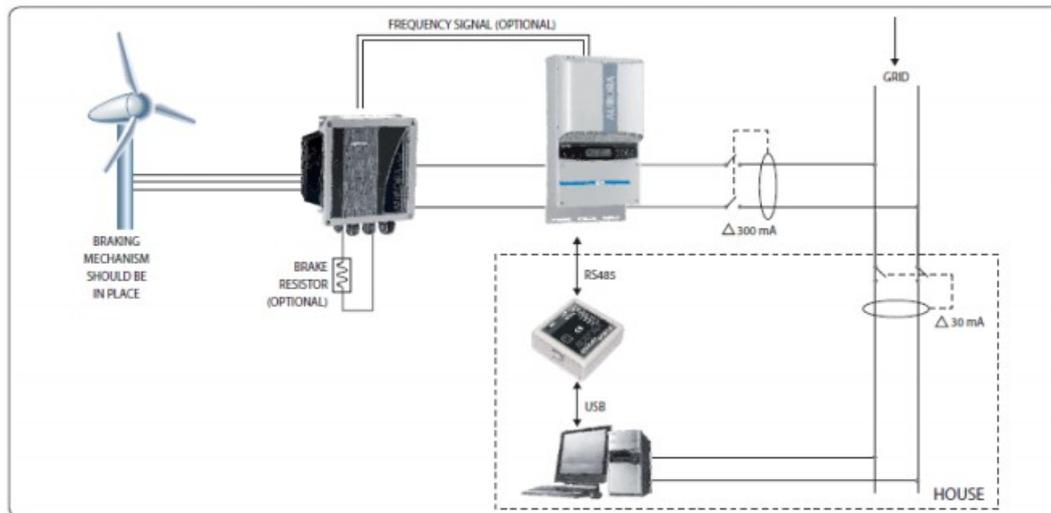


Figura 80: Schema di collegamento

5.12 Considerazioni sulla turbina sperimentale

Rispetto alla turbina Savonius ha un rendimento ideale maggiore del 50% (in quanto viene meno la pala in opposizione di vento).

Considerando, invece il tempo che le pale impiegano a ruotare lungo l'asse orizzontale, il rendimento reale (estratto dall'analisi multifisica) incrementa di circa il 20% rispetto alla turbina Savonius senza aver ottimizzato la geometria.

6 Conclusioni e sviluppi futuri

Il modello multifisico proposto (realizzato in Comsol Multiphysics) ha permesso di analizzare con precisione una macchina fluido, ma ci sono le seguenti complicazioni: sono richieste molte risorse computazionali (per ogni run di simulazione) e molto CPU time (per ogni run di simulazione).

D'altra parte, il modello matematico integrato con il modello CAD è adatto per il dimensionamento preliminare e offre risultati immediati (dopo la sua implementazione); tuttavia, questo metodo analizza una macchina a fluido con meno precisione e non permette di studiare la sua dinamica (della macchina a fluido).

Pertanto, se l'obiettivo è quello di progettare un nuovo tipo di macchina a fluido o ottimizzarne una esistente, è necessario un modello multifisico; al contrario, se l'obiettivo è quello di scegliere la tipologia di macchina fluido o un suo dimensionamento preliminare, è più adatto utilizzare il modello matematico integrato con il modello CAD.

Entrambi i modelli (sia quello multifisico sia quello matematico integrato con il modello CAD) possono essere ri-implementati (partendo dai modelli proposti) su qualsiasi tipologia di macchina a fluido con un tempo uomo di poche decine di minuti.

Con l'obiettivo di migliorare l'ambiente di progettazione appena descritto, i seguenti miglioramenti sono in fase di studio e realizzazione.

6.1 Integrazione CAD / CAE

L'integrazione automatica tra i modelli CAD e CAE sarà raffinato: una volta che l'integrazione del modello CAD con il modello CAE sarà completato, modificando la geometria CAD, CAE geometria verrà aggiornato di conseguenza, in modo che il recupero di vari modelli da cui i dati richiesti per la creazione di modello matematico vengono acquisiti, sarebbe più veloce.

6.2 Integrazione con un database di C_d , secondo le varie forme di pala.

Se si crea un database con C_d delle varie tipologie di forme di pale commerciali, sarà possibile estendere l'uso della procedura non solo alle turbine eoliche, ma anche per le altre tipologie di macchine a fluido.

6.3 Integrazione con un database avente le proprietà fluidodinamiche di vari fluidi.

Come conseguenza l'estensione ad altre tipologie di macchine a fluido, è necessario creare un database con le proprietà fluidodinamiche di differenti fluidi; ad esempio: aria, acqua, vapore, ecc

6.4 Diminuzione del CPU time per il modello con ODE con vincoli

Il limite maggiore del modello con l'ODE con vincoli è dato dall'elevatissimo CPU time, per diminuire il CPU time è in studio un nuovo modello che sostituisce gli script in Matlab con il modulo Comsol Multibody Dynamics.

7 Appendice : implementazioni dei modelli e impostazioni - integrazioni software

7.1 Scelta dei moduli in Comsol Multiphysics

7.1.1 Modulo di meccanica strutturale

Meccanica dei solidi (solid) (Figura 81):

- Identificativo del modulo “solid”
- variabili dipendenti: campo degli spostamenti $u v w$

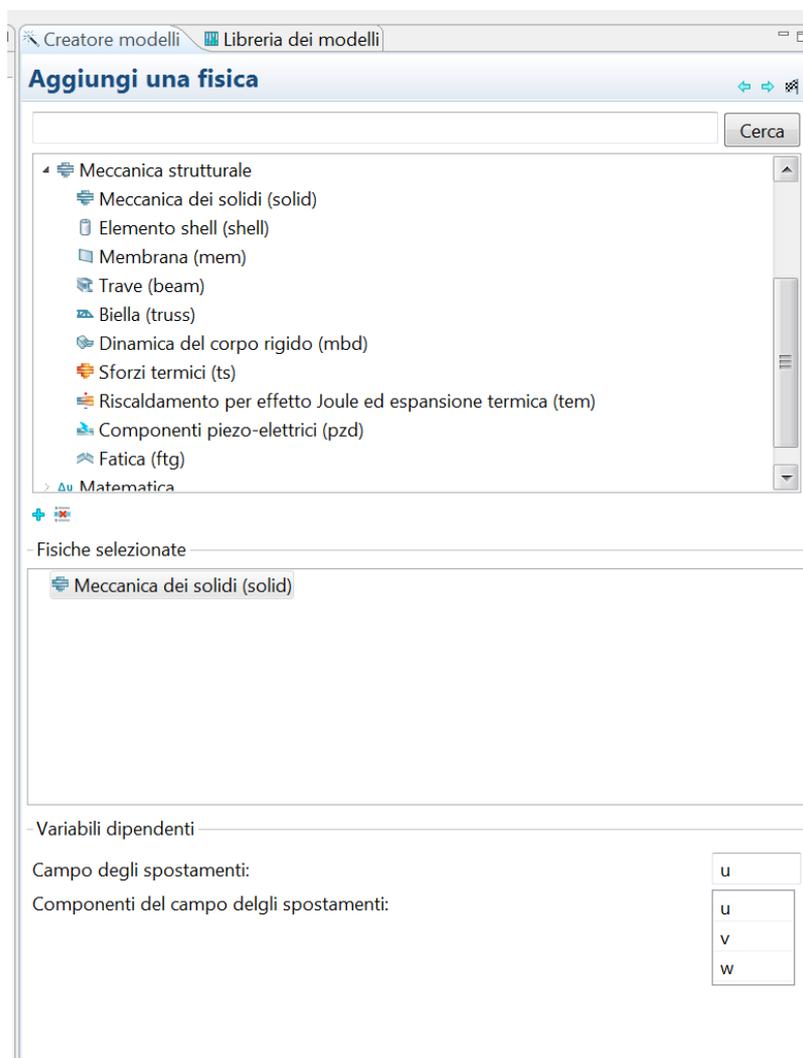


Figura 81: Modulo di meccanica strutturale

7.1.2 Modulo di Fluidodinamica

Flusso laminare (spf) (Figura 82)

- identificativo del modulo “spf”
- variabili dipendenti: campo delle velocità ($u_2 v_2 w_2$) e pressione (p) (e relativi valori corretti)

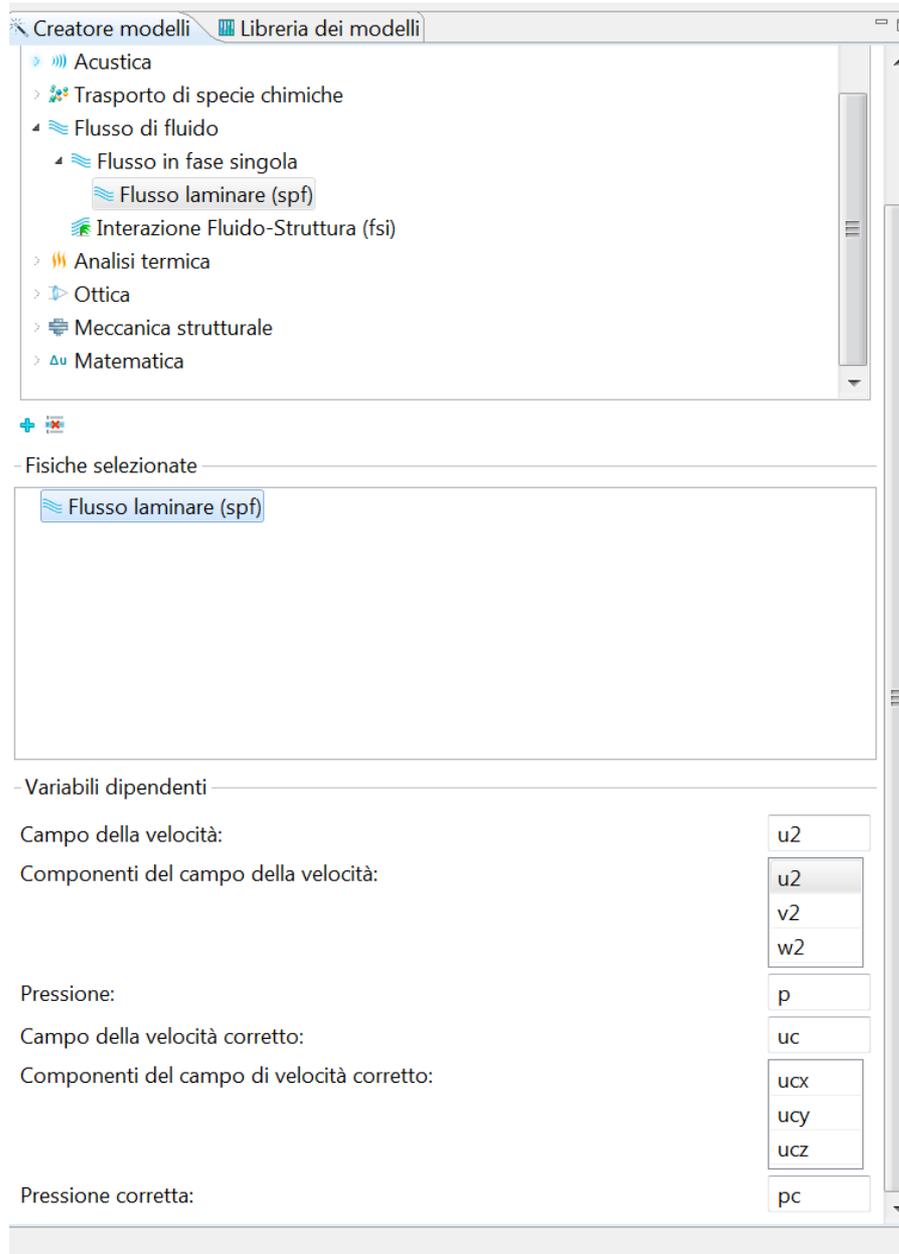


Figura 82: Modulo di CFD

7.1.3 Modulo di movimento della mesh

Modulo mesh mobile (ale) (Figura 83)

- identificativo del modulo “ale”
- variabili dipendenti non presenti

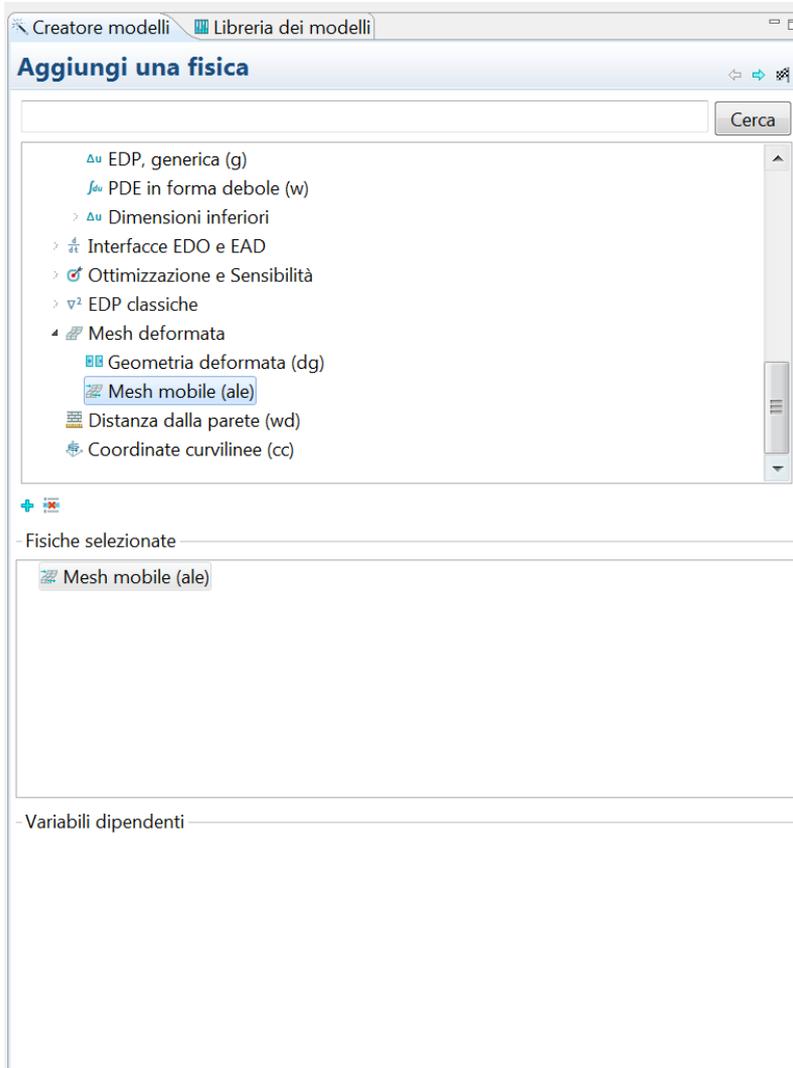


Figura 83: Modulo Moving Mesh

7.1.4 Modulo per ODE

Modulo per EDO e DAE globali (ge) (Figura 84)

- identificativo del modulo “ge”
- variabili dipendenti non presenti

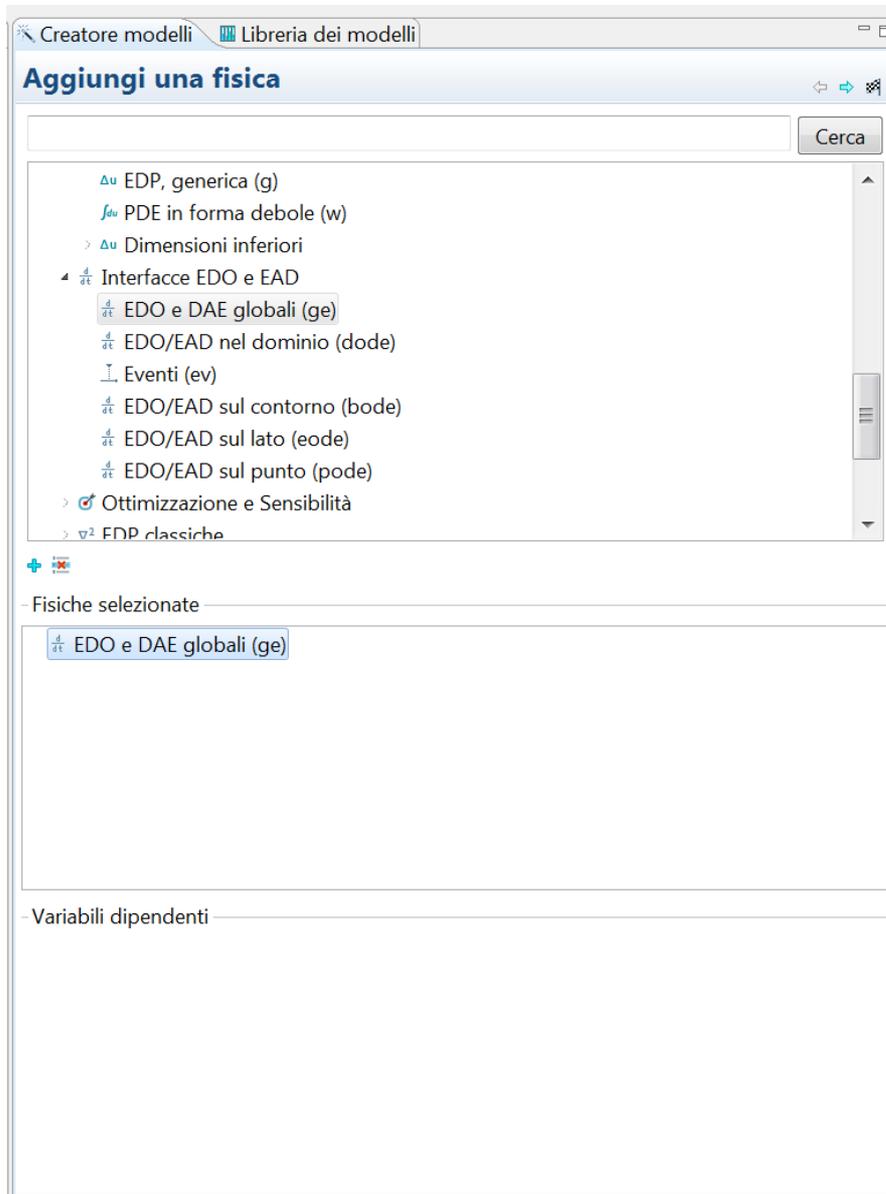


Figura 84: Modulo ODE

7.1.5 Identificativo dei moduli

L'identificativo del modulo è presente come prefisso delle variabili e degli output di ogni modulo, ad esempio lo sforzo dovuto alla FSI : l'espressione "spf.T_stressx" (vedi Figura 85) identifica la componente lungo "x" della tensione subita dal fluido a causa della collisione con la pala/ostacolo, quindi la componente lungo "x" della pressione sul pala è pari a "- spf.T_stressx".

Nome	Espressione	Unità	Descrizione	Selezione
spf.nu	spf.mu/spf.rho	m ² /s	Viscosità cinematica	Dominio 1
spf.betaT	d(spf.rho,p)/spf.rho	1/Pa	Coefficiente di comprimibilità isoterma	Dominio 1
spf.T_stressx	2*spf.mu*u2x*spf.nx...	N/m ²	Sforzo totale, componente x	Contorno 1-€
spf.T_stressy	spf.mu*(v2x+u2y)*s...	N/m ²	Sforzo totale, componente y	Contorno 1-€
spf.T_stressz	spf.mu*(w2x+u2z)*s...	N/m ²	Sforzo totale, componente z	Contorno 1-€
spf.K_stressx	spf.mu*(2*u2x*spf.n...	N/m ²	Sforzo viscoso, componente x	Contorno 1-€
spf.K_stressy	spf.mu*(u2y+u2z)*s...	N/m ²	Sforzo viscoso, componente y	Contorno 1-€

Nome	Funzione di for...	Unità	Descrizione	Shape frame	Selezione	Detta...
u2	Lagrange (Line...	m/s	Campo della velocità, componen...	Riferiment...	Dominio 1	
v2	Lagrange (Line...	m/s	Campo della velocità, componen...	Riferiment...	Dominio 1	
w2	Lagrange (Line...	m/s	Campo della velocità, componen...	Riferiment...	Dominio 1	
p	Lagrange (Line...	Pa	Pressione	Riferiment...	Dominio 1	

Espressione debole	Sistema di riferime...	Selezione
(p-spf.K_stress_tensorxx)*test(u2x)-spf.K_stress_tensorxy*test(u2y)-sp...	Riferimento spaziale	Dominio 1
spf.Fx*test(u2)+spf.Fy*test(v2)+spf.Fz*test(w2)-spf.rho*(u2x*u2+u2y*...	Riferimento spaziale	Dominio 1
test(p)*(-spf.rho*spf.divu-u2*d(spf.rho,x)-v2*d(spf.rho,y)-w2*d(spf.r...	Riferimento spaziale	Dominio 1
spf.crosswindns	Riferimento spaziale	Dominio 1

Figura 85 Identificativo del modulo strutturale

7.2 Impostazioni moduli

7.2.1 Identificativi dei domini

Prima di illustrare le impostazioni inserite per ciascun modulo e per ciascun dominio, verranno associati a ogni dominio un numero identificativo:

- Il dominio "1" identifica il cubo esterno, quindi il cubo al quale sono state

sottratte la sfera centrale e la pale contenute all'interno di quest'ultima (Figura 86).

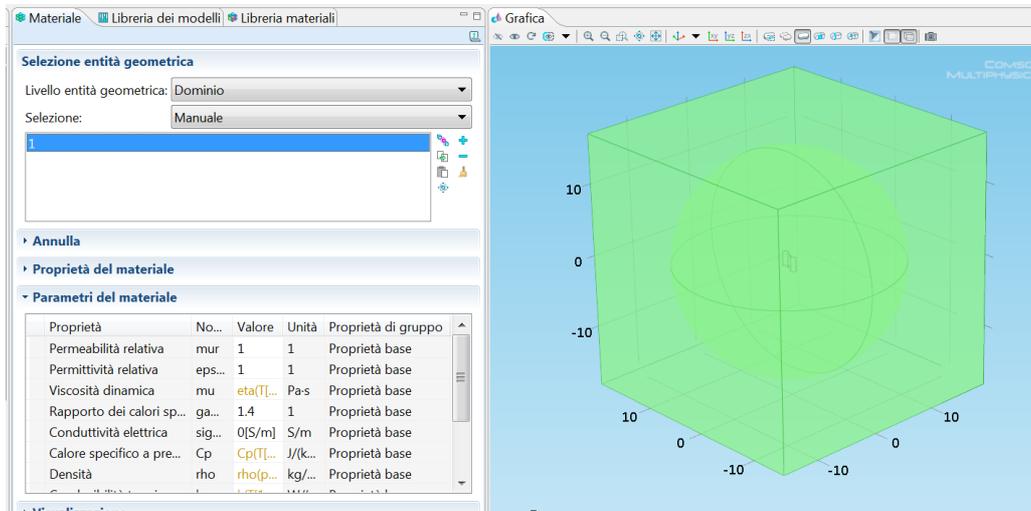


Figura 86: Dominio 1 - cubo esterno (senza ne sfera ne pale)

- Il dominio "2" identifica la sfera centrale alla quale sono state sottratte le pale al suo interno (Figura 101)

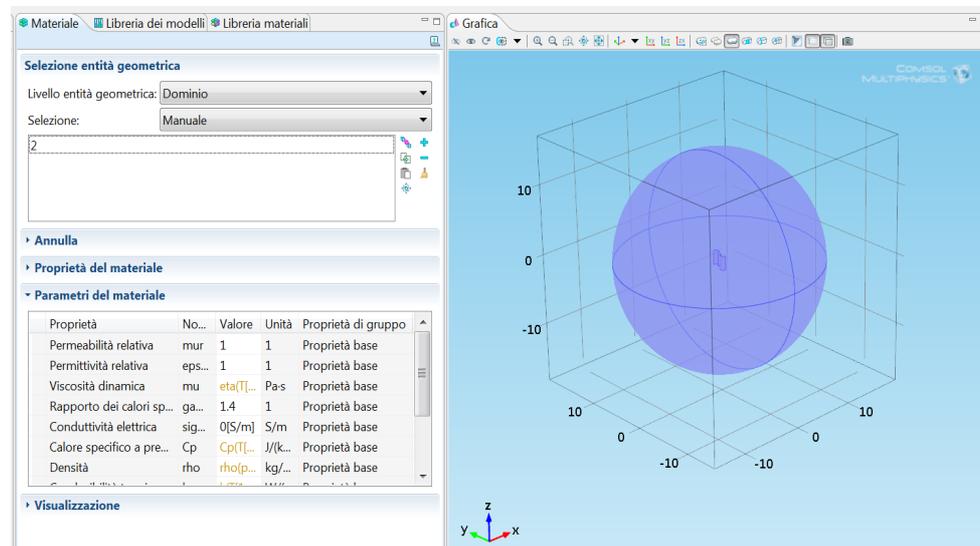


Figura 87: Dominio 2 - sfera interna senza le pale

- I domini 3 e 4, invece, identificano le pale all'interno della sfera (Figura 88)

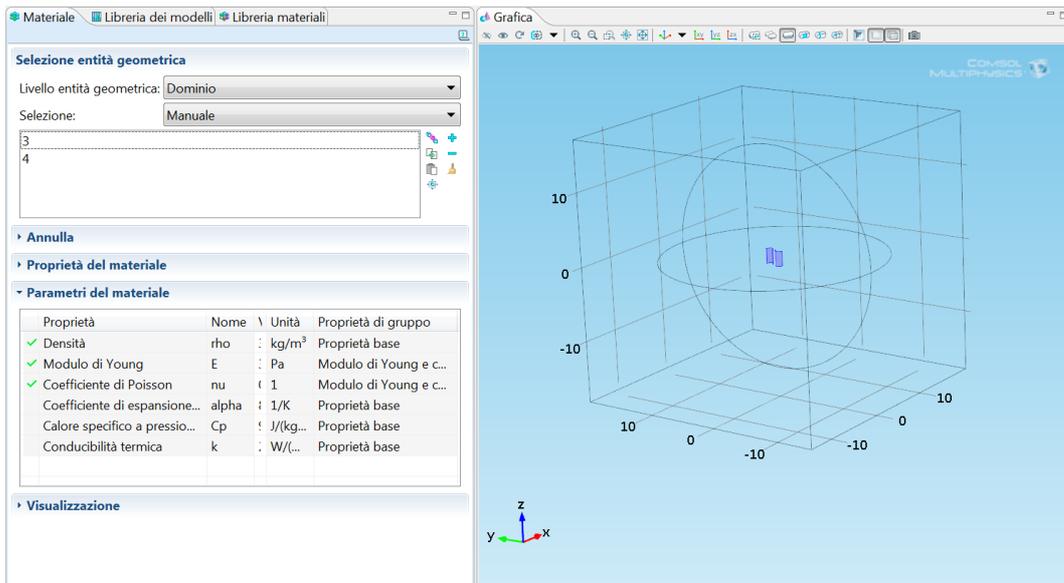


Figura 88: Domini 3 e 4 - Pale all'interno della sfera

7.2.2 Impostazioni modulo CFD

- Domini interessati 1 e 2:

Sono stati selezionati unicamente i domini interessati dal fluido (quindi sono state escluse le pale, Figura 89).

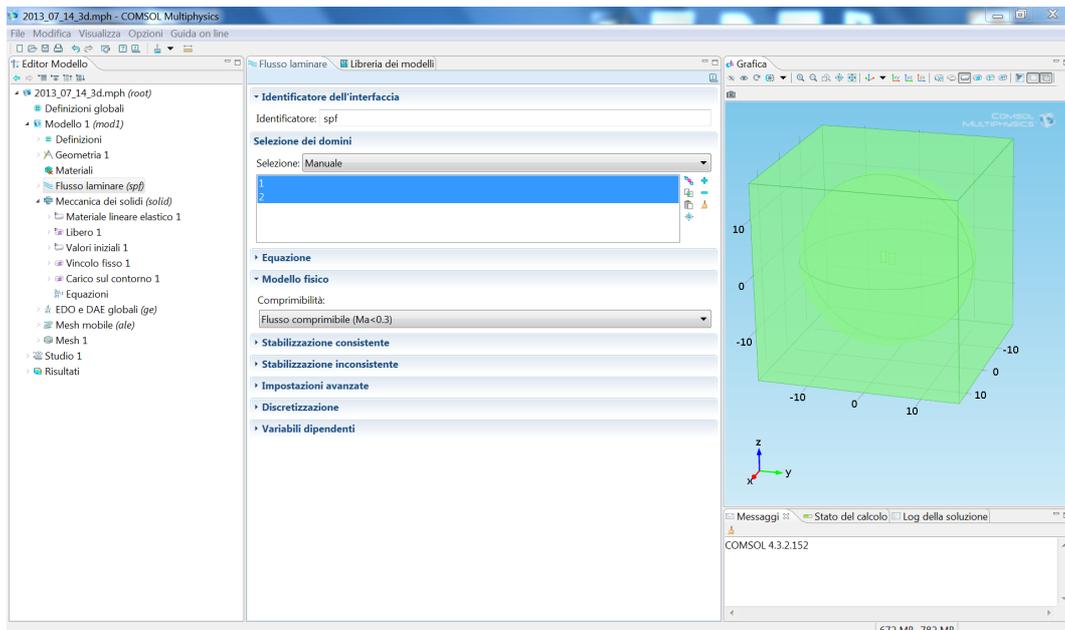


Figura 89: Selezione dei domini per l'analisi CFD

- Proprietà del fluido (aria, Figura 90):
 densità = 1,225 [kg/m³]
 viscosità dinamica = 1.78E-5 [Pa·s]

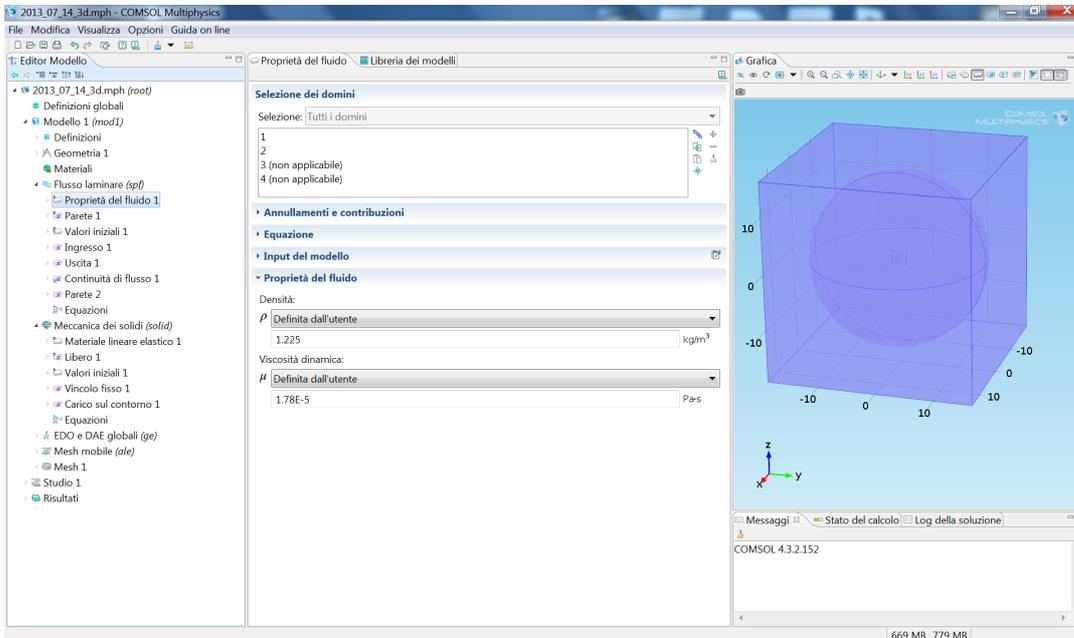


Figura 90: Proprietà del fluido

- Condizioni al contorno: ingresso e uscita (rispettivamente,)

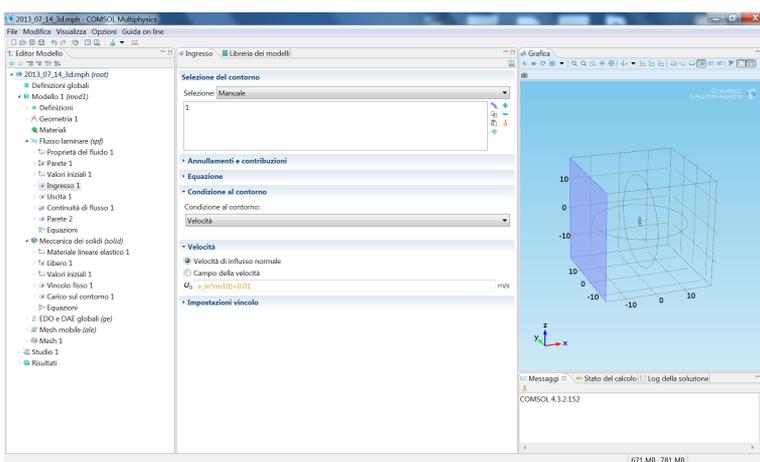


Figura 91: Condizione al contorno: ingresso

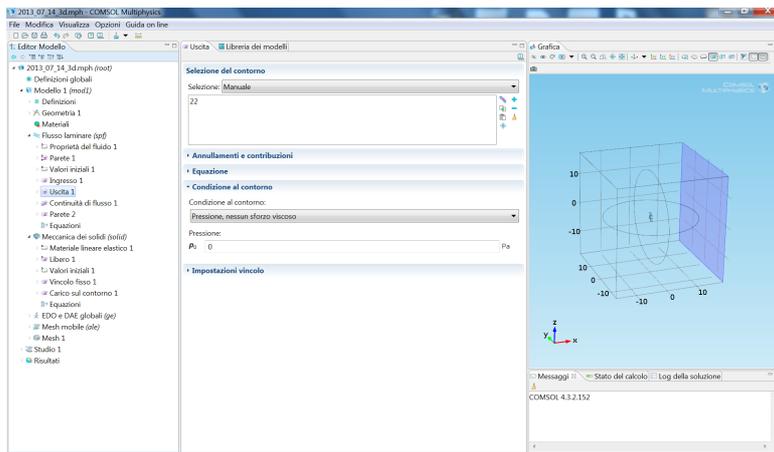


Figura 92: Condizione al contorno: uscita

7.2.3 Impostazioni Modulo Strutturale

- Domini interessati 3 e 4.

Con il modulo strutturale vengono esaminate unicamente le pale (vedi Figura 93)

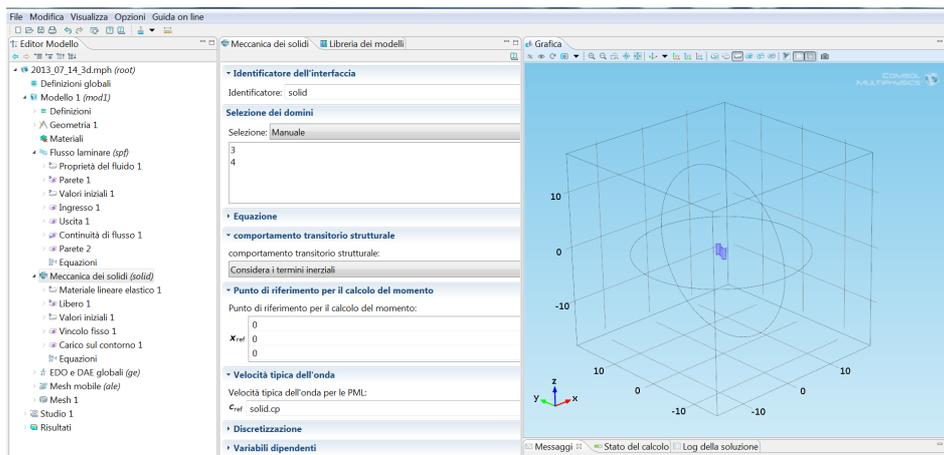


Figura 93: Selezione dei domini per l'analisi Strutturale

- Vincoli: sono state vincolate con un incastro le estremità interne delle pale (vedi Figura 94).

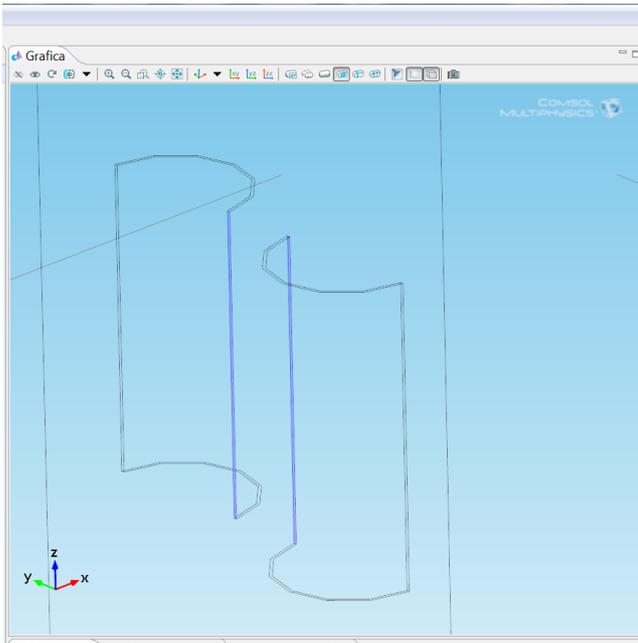


Figura 94: Pale vincolate con un incastro

- Carichi: su ciascuna pala è stato riportato lo stress dovuto a FSI nelle sue tre componenti cartesiane (vedi Figura 94)

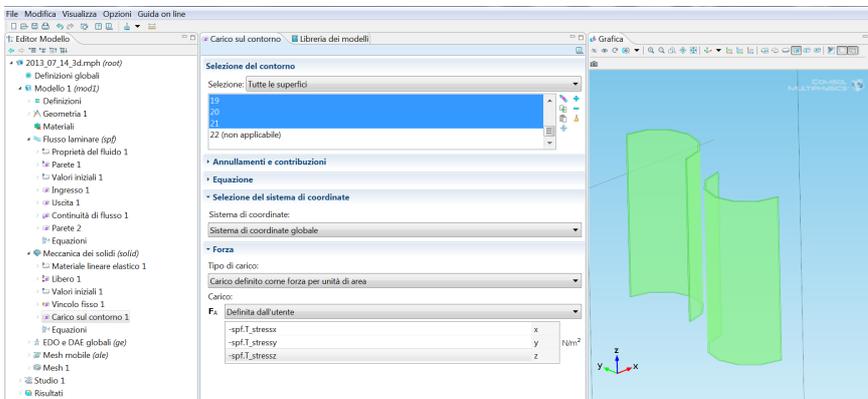


Figura 95: Carichi sulle pale

7.2.4 Impostazioni modulo EDO

- Domini interessati – (non è possibile selezionare alcun dominio)

E' stata inserita l'equazione differenziale che descrive al dinamica del moto della turbina (vedi Figura 96).

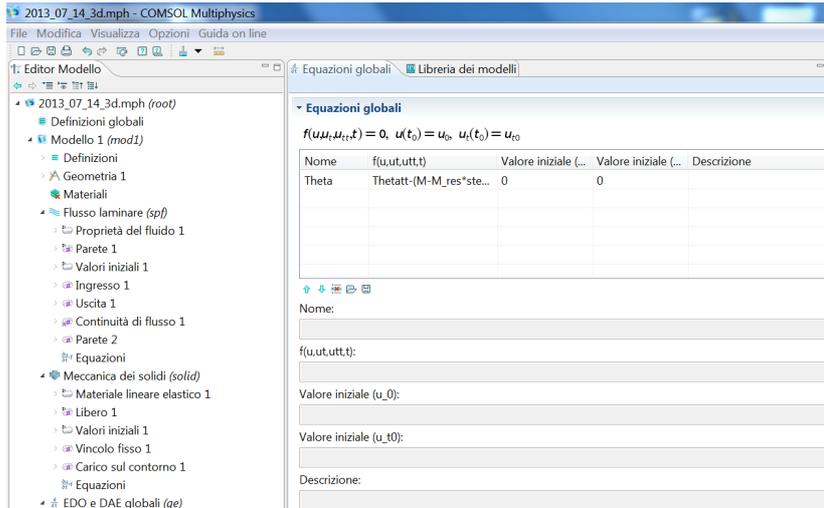


Figura 96 Inserimento ODE

L'ODE inserita è quella dell'equazione 21

7.2.5 Impostazioni modulo ALE

- Domini interessati: 1,2,3,4
- dominio mesh mobile: 2,3,4 (vedi Figura 97)

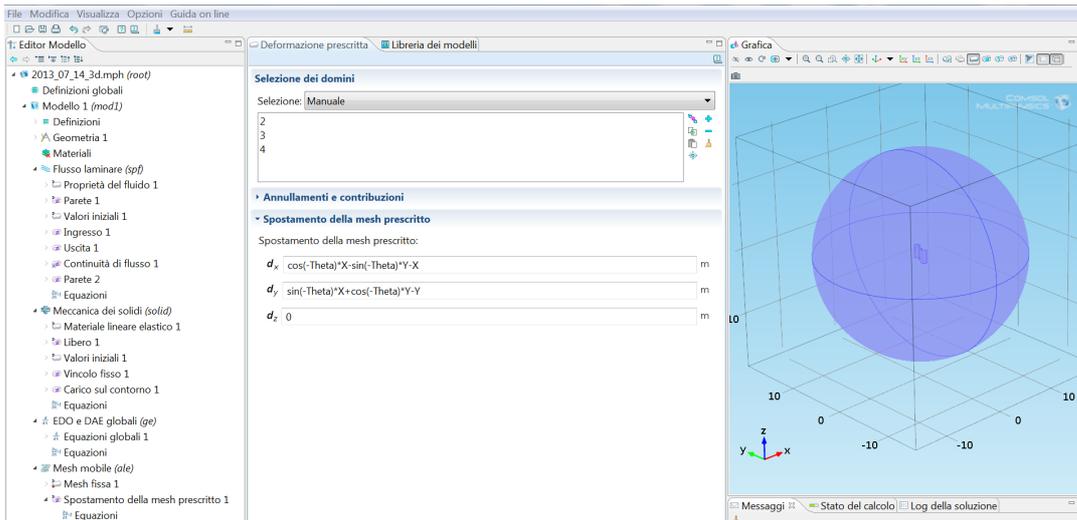


Figura 97: Domini con la mesh mobile

Dominio mesh fissa: 1 (vedi Figura 98)

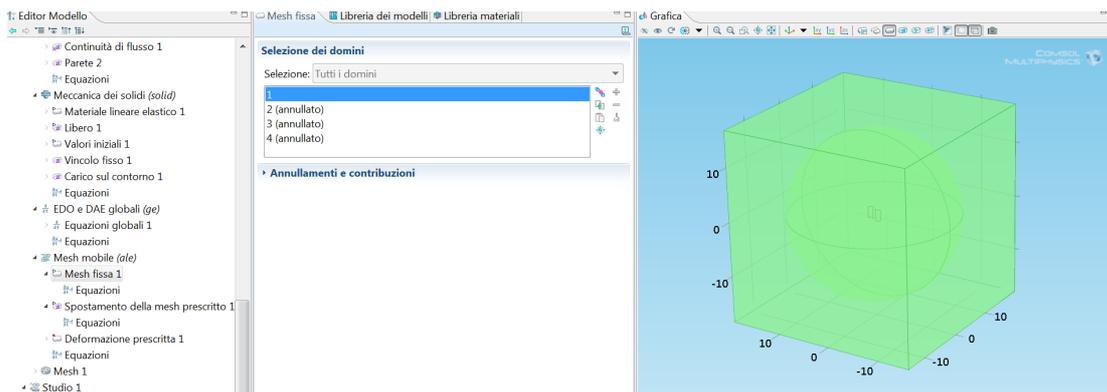


Figura 98: Dominio con mesh fissa

7.3 Inserimento delle sonde

L'inserimento delle sonde risulta molto utile soprattutto per le analisi numeriche che richiedono un elevato CPU Time. Infatti tramite le sonde è possibile verificare l'andamento dei parametri che si ritengono importanti durante lo svolgimento dell'analisi.

Nel caso specifico sono stati identificati i seguenti parametri da monitorare: l'angolo di rotazione (Theta), la velocità angolare (Thetat), l'accelerazione angolare (Thetatt), ecc (vedi Figura 99).

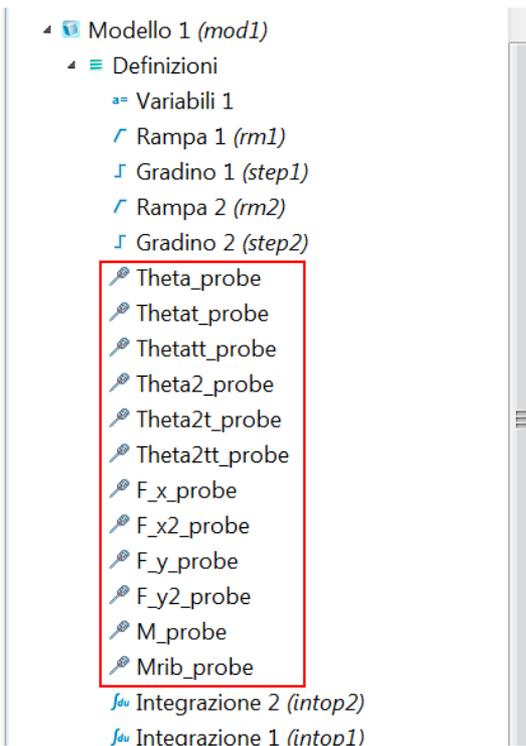


Figura 99: Elenco delle sonde utilizzate

Nel caso non si volessero utilizzare le sonde ma si volesse ugualmente verificare l'andamento dell'analisi numerica prima che essa sia terminata è possibile metterla in pausa e poi riprendere dal punto in cui è stata fermata. Per fare ciò bisogna prima interrompere i solutori (vedi Figura 100) e successivamente, quando e se si vuole riprendere l'analisi, premere su continua (vedi Figura 101)

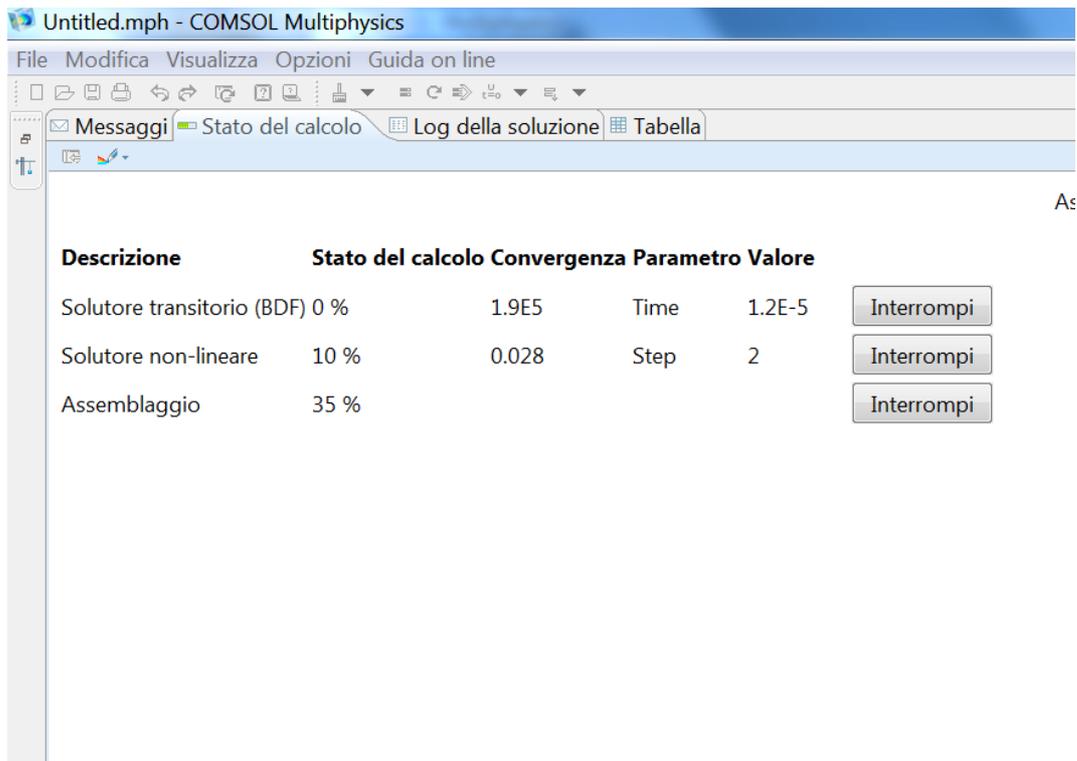


Figura 100: Interruzione dei solutori

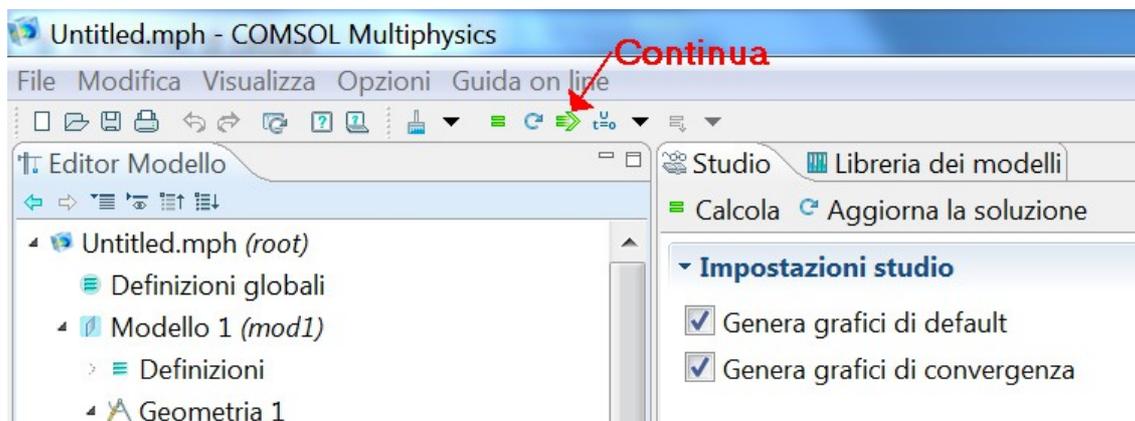
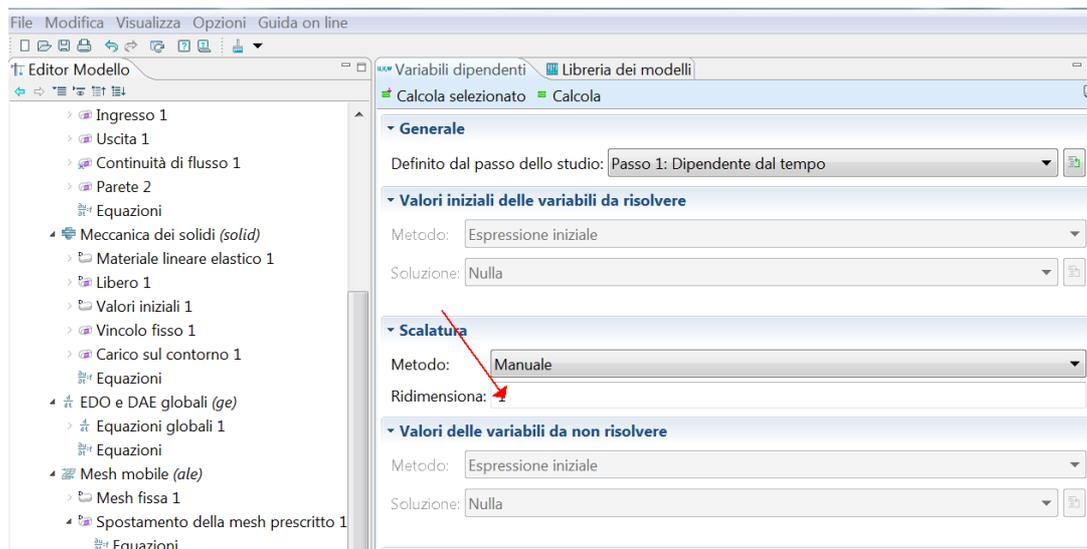


Figura 101: Continuazione di un'analisi interrotta

7.4 Utilizzo delle variabili dipendenti per la convergenza della soluzione

Quando si hanno problemi di convergenza iniziale dell'analisi, è possibile indicare al solutore l'ordine di grandezza da attribuire alle variabili dipendenti.

Per fare ciò è necessario scegliere il metodo di "scalatura" "Manuale" ed indicare le variabili dipendenti con il relativo ordine di grandezza.



7.5 Impostazioni per la soluzione del modello

7.5.1 Scelta della tipologia di Mesh

La scelta del tipo di mesh, o meglio del tipo di elemento da utilizzare è un punto cruciale delle analisi agli elementi finiti. Questa scelta dipende sia dal tipo di analisi, come è giusto che sia, che dal software utilizzato. Infatti i vari elementi presenti nelle librerie dei codici agli elementi finiti sono ottimizzati diversamente dai vari distributori di tali codici; ovvero non sempre la scelta teorica più corretta corrisponde ad un miglior risultato dell'analisi numeriche. Ad esempio se il codice utilizzato è MSC Nastran e si decide di utilizzare (nel 2D) gli elementi quod 8 a scapito dei quod 4 con lo scopo di ottenere un risultato più accurato si ottiene, stranamente, il risultato opposto: infatti la MSC ha ottimizzato gli elementi quod 4 mentre è possibile verificare che i quod 8 non superano i Patch.

Per quanto riguarda il 3D vi è un'insidia in più: il numero totale di elementi. Se tale numero cresce troppo si hanno seri problemi, poiché aumenta l'onere computazionale e con esso le risorse necessarie per svolgere l'analisi e ovviamente cresce anche il CPU Time. Di solito le mesh 3D, quando la geometria lo permette, vengono realizzate per estrusione di quelle 2D in modo da poter controllare meglio il numero di elementi. Ovviamente questo va a scapito della precisione dei risultati, ma bisogna sempre raggiungere un compromesso a meno che non si hanno a disposizione super calcolatori

con decine di CPU in parallelo.

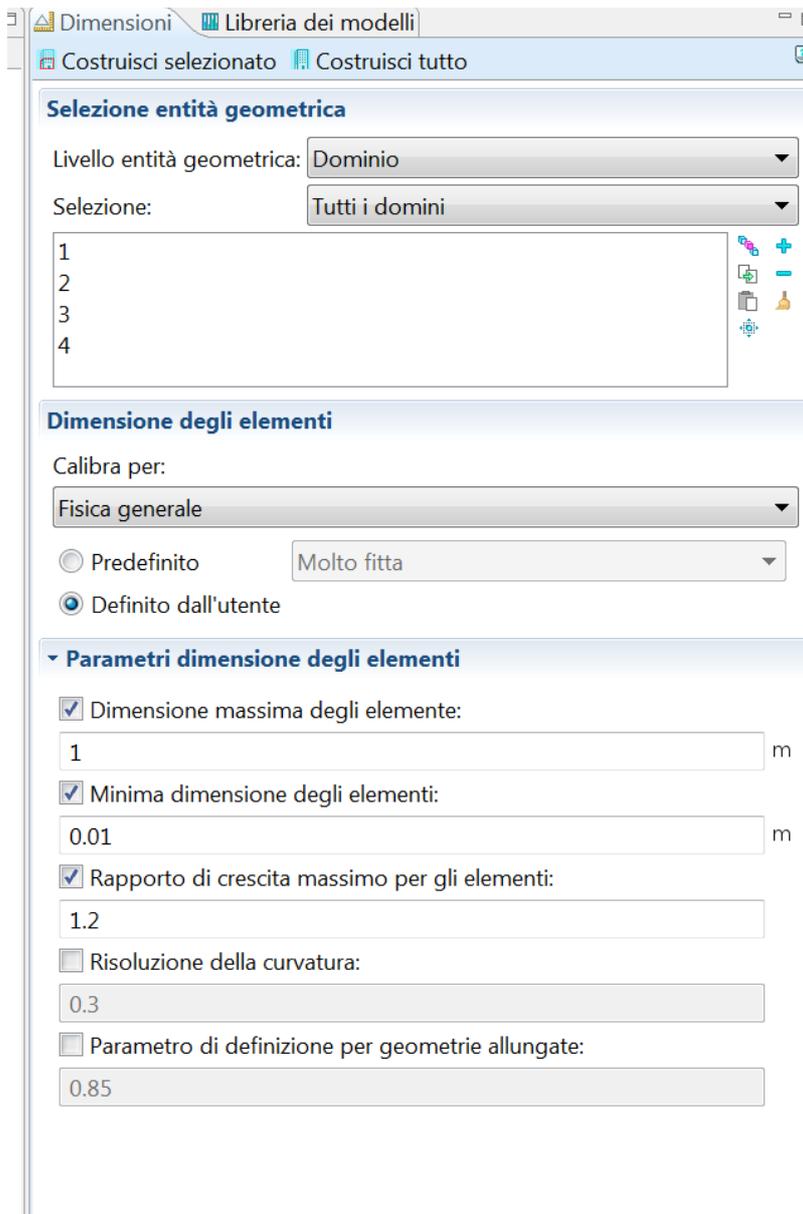
Per quanto riguarda il software Comsol Multiphysics la tipologia di mesh “triangolare non strutturata” mostrata in figura risulta molto affidabile.

7.5.2 Impostazione della mesh

Al fine che il modello converga senza dover andare ad aumentare le tolleranze dei solutori è necessario che la qualità della mesh non sia troppo bassa.

Per migliorare la qualità della mesh è necessario intervenire sui parametri:

- dimensione massima degli elementi - diminuendola
- dimensione minima degli elementi - diminuendola
- rapporto di crescita massimo degli elementi - diminuendolo , un rapporto pari a 1 significa che gli elementi non crescono di dimensione.



Di seguito le immagini dal modello 3D meshato, rispettivamente pale (Figura 102) sfera interna – dominio mesh mobile (Figura 103) e cubo esterno – dominio mesh fissa (Figura 104)

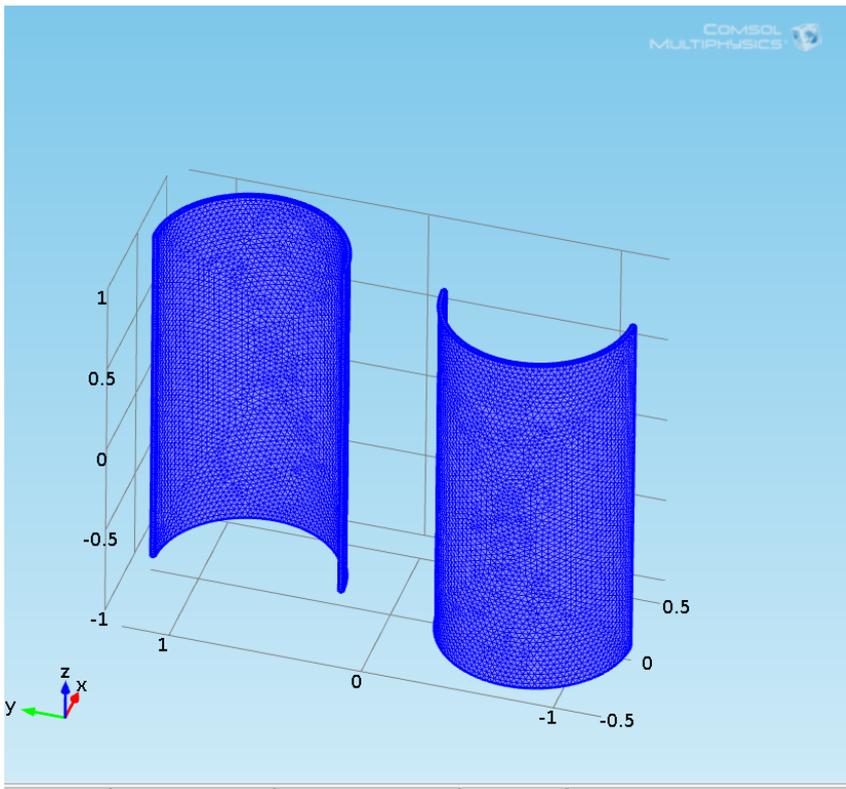


Figura 102: Mesh 3D delle pale

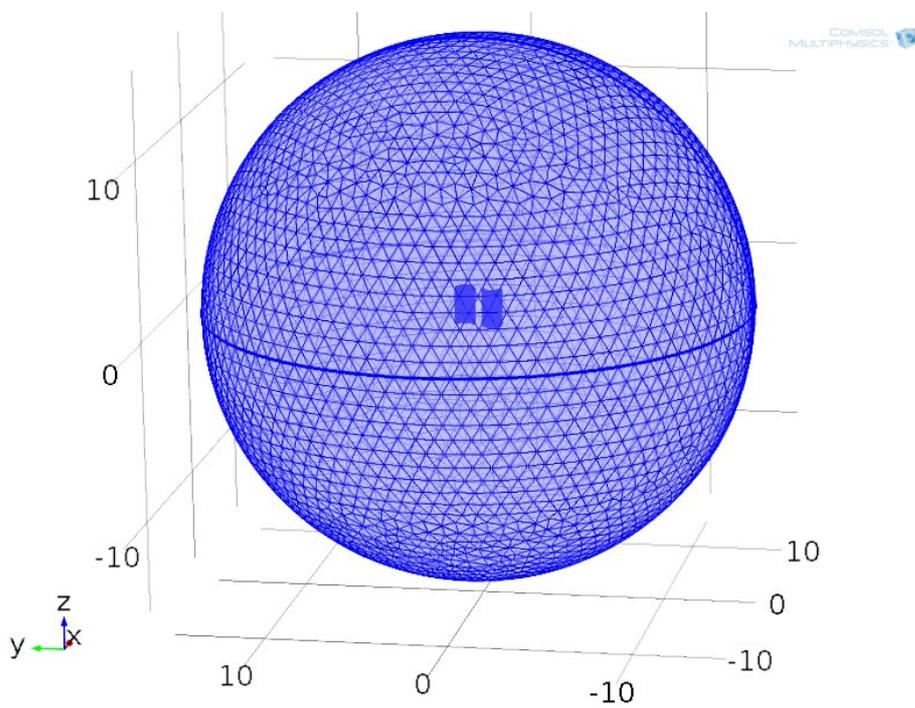


Figura 103: Dominio mesh mobile

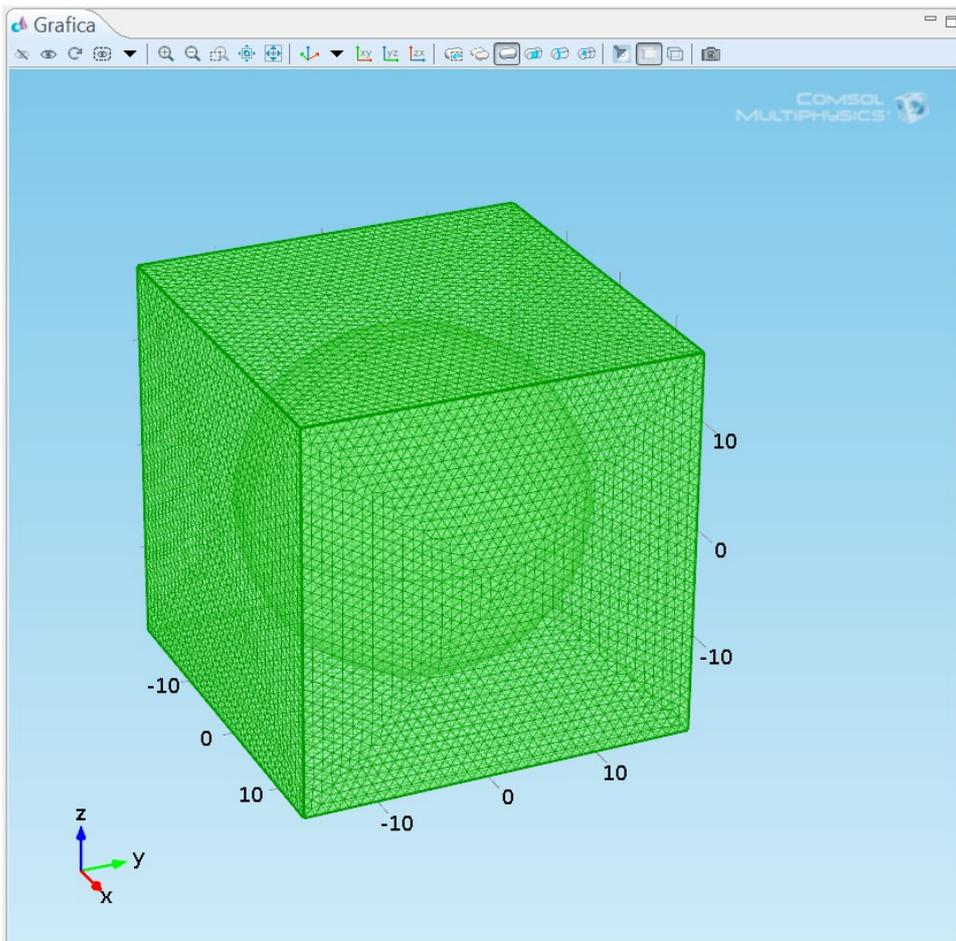


Figura 104: Mesh del cubo esterno – dominio mesh fissa

7.5.3 Impostazioni del solutore

Se la qualità della mesh è buona, è possibile lasciare i settaggi del solutore più ristretti, così la soluzione è molto più veloce (Figura 105)

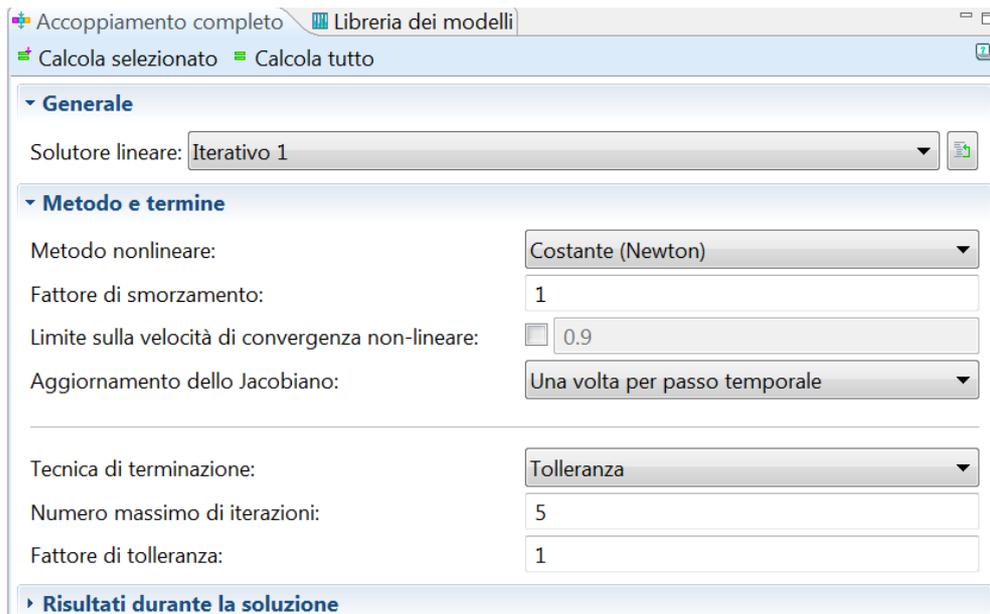


Figura 105: Settaggi solutore

- Metodo non lineare: Costante - serve per il fattore di smorzamento ovvero per il valore utilizzato per far convergere la soluzione .

N.B. Minore è il numero massimo di iterazione e più veloce è l'analisi, in quanto fa molti meno tentativi

7.5.4 L'operatore reacf

Reacf(u) permette di calcolare le reazioni della forza lungo "x" in modo più preciso senza dover infittire la mesh, esso è applicabile dalla visualizzazione dei risultati, se si attivano i vincoli deboli viene disabilitato e non è utilizzabile.

7.5.5 Impostazione flusso incomprimibile

Inoltre è stato calcolato il numero di Mach Ma , essendo al di sotto del valore 0,3 si commette un errore trascurabile nel considerare densità costante.

Questa considerazione è importante per poter scegliere in Comsol il corretto modulo fluidodinamico e la relativa impostazione, vedi Figura 106

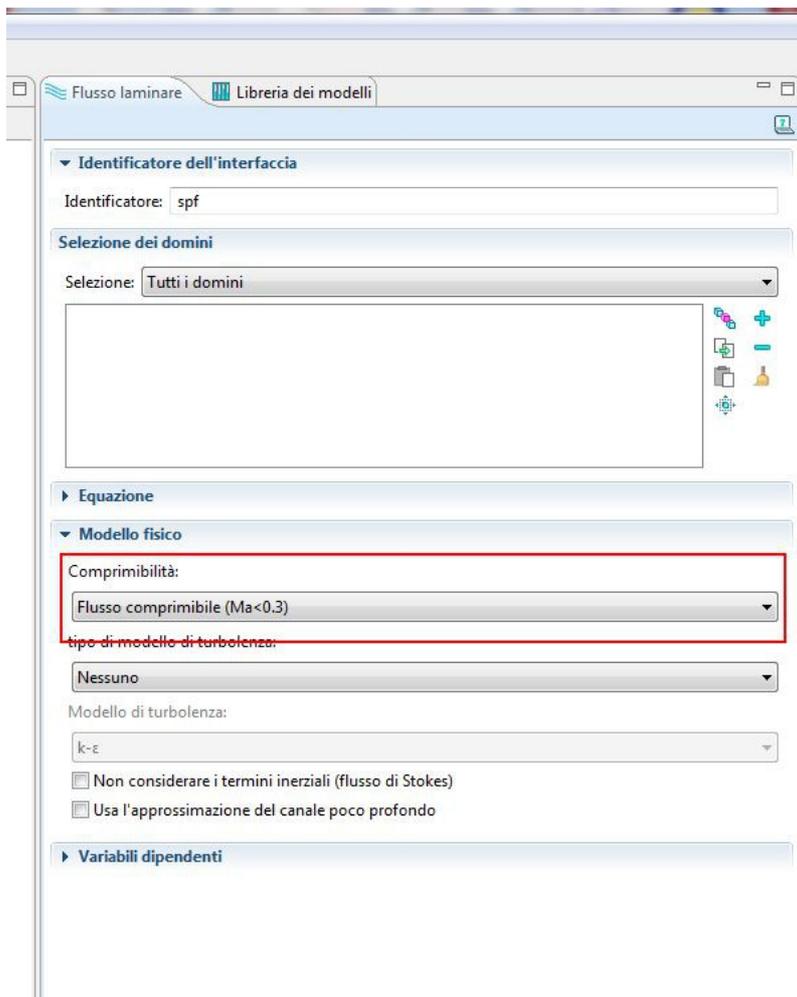


Figura 106: Impostazione relativa al numero di Ma

7.6 Integrazione di Creo Parametric con MathCad Prime

Dopo aver realizzato sia il modello CAD e sia il modello matematico, sarà possibile integrarli. L'operazione più importante è la mappatura dei parametri, che è la creazione di collegamenti tra parametri creati nel CAD e parametri creati nel software matematico. Se un parametro ha lo stesso nome, sia in Creo e sia in Mathcad (per esempio, il parametro "di diametro della pala" ha lo stesso nome sia nel software), Creo crea automaticamente il collegamento, e anche la mappatura diventa automatica (Figura 107 e Figura 108).

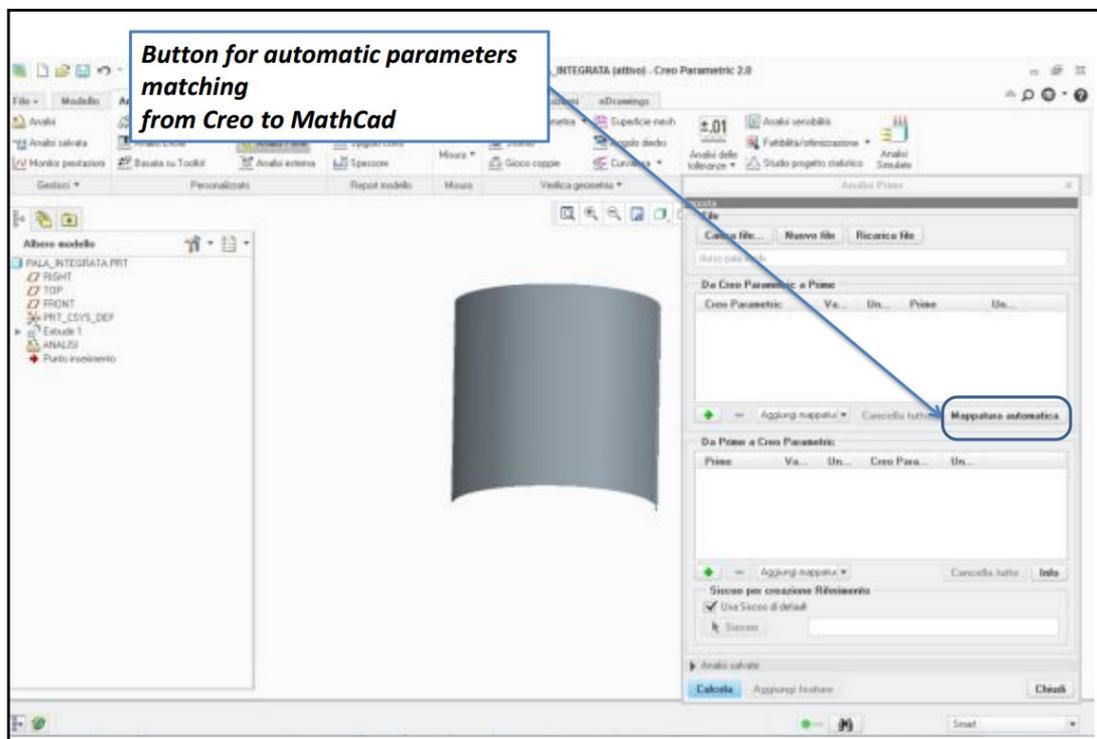


Figura 107: Matching automatico dei parametri

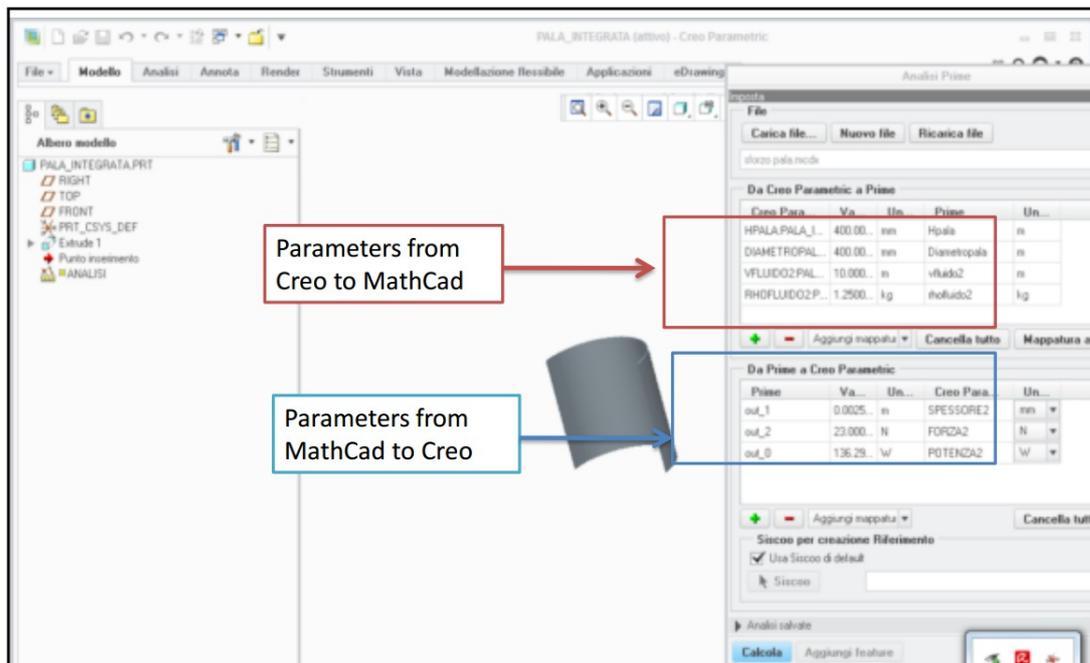


Figura 108 Matching tra i parametri Creo/MathCad

Diversamente, se parametri hanno nomi diversi nei due software (per esempio, se il parametro "diametro pala" ha il nome "diametro" in Creo e "Diametro_Pala" in MathCad), l'utente dovrà assegnare i collegamenti tra i parametri nei due software. Quindi, l'utente dovrà selezionare il parametro desiderato nella lista Creo (vedi Figura 109) e poi selezionare il parametro corrispondente nella lista MathCad (vedi Figura 110).

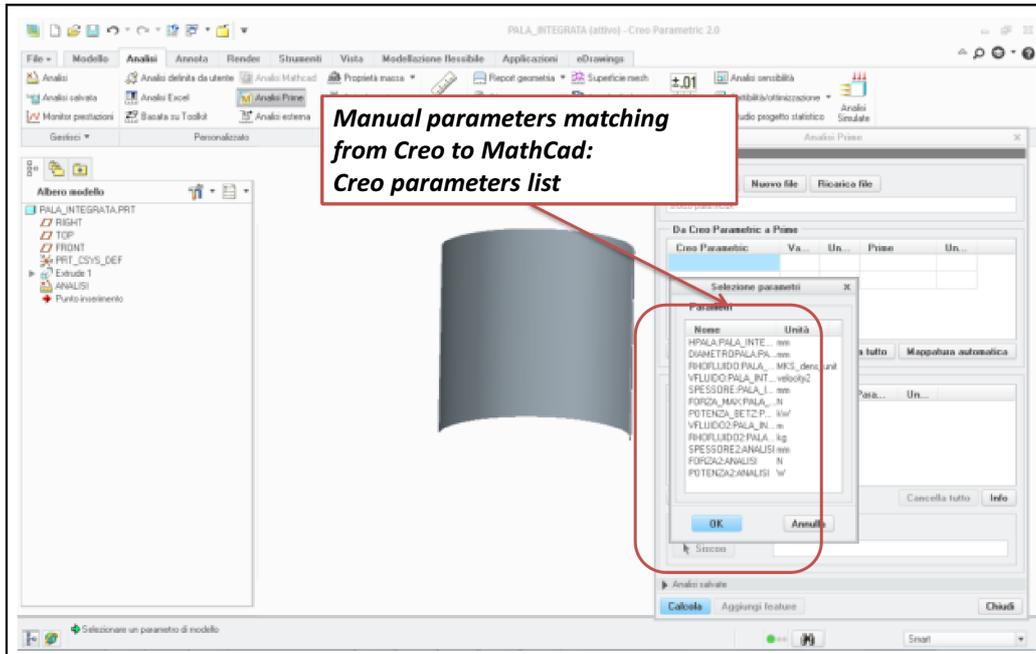


Figura 109 Matching manuale tra i parametri Creo/MathCad – lista dei parametri di Creo

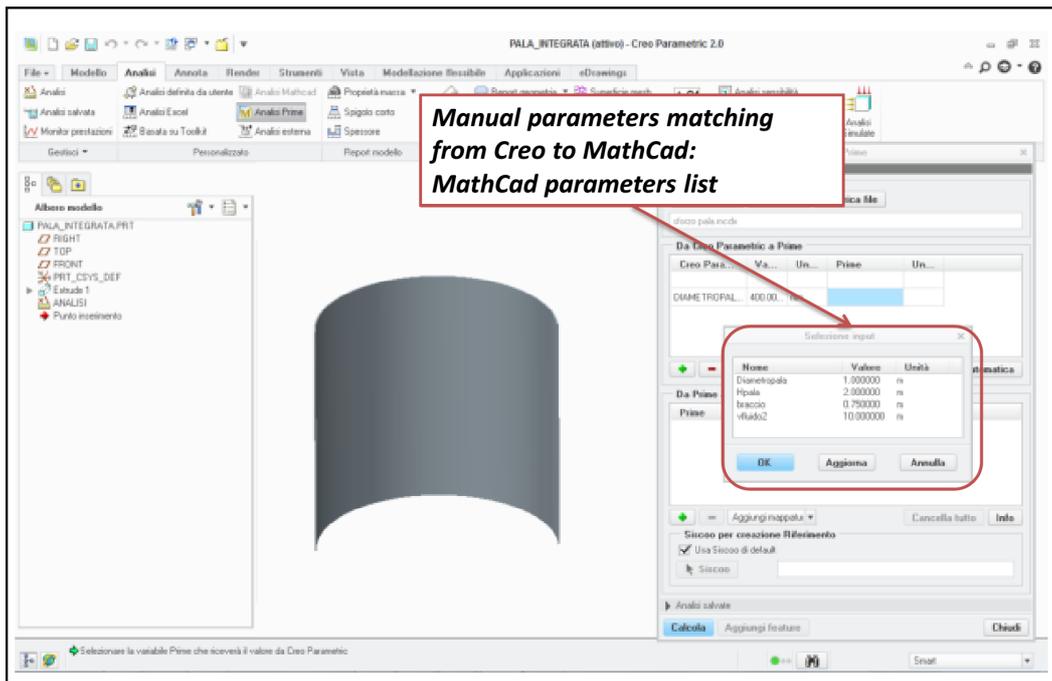


Figura 110: Matching manuale tra i parametri Creo/MathCad – lista dei parametri di MathCad

7.7 Implementazione forze e momento

7.7.1 Implementazione della Forza lungo "x"

$$F_x = \text{intop1}(-\text{spf.T_stressx}) \text{ [N]}$$

dove:

$-\text{spf.T_stressx}$ è lo sforzo esercita dal fluido sulla pala in direzione x , ovviamente integrandolo (intop1) sulla superficie della pala si ottiene la forza.

7.7.2 Implementazione del Braccio della forza F_x

$$R_y = \text{sign}(\cos(\text{Theta})) * \text{intop1}(-\text{spf.T_stressx} * Y) / (F_x + 0.0001) \text{ [m]}$$

la funzione segno e coseno in funziona di Theta servono a identificare il segno del momento risultante a seconda che la pala sia a favore o in opposizione di vento.

7.7.3 Implementazione della Forza lungo "y"

$$F_y = \text{intop1}(-\text{spf.T_stressy}) \text{ [N]}$$

7.7.4 Implementazione del Braccio della forza F_y

$$R_x = \text{sign}(\cos(\text{Theta})) * \text{intop1}(-\text{spf.T_stressy} * X) / (F_y + 0.0001) \text{ [m]}$$

7.7.5 Implementazione del momento dovuto alla forza F_x sulla prima pala

$$M1 = F_x * R_y \text{ [Nm]}$$

7.7.6 Implementazione del momento dovuto alla forza F_y sulla prima pala

$$M2 = \text{abs}(F_y) * R_x \text{ [Nm]}$$

7.7.7 Implementazioni sulla seconda pala

Stesso ragionamento sulla seconda pala:

$$F_{x2} = \int_{\text{top2}} (-\text{spf.T_stressx}) [N]$$

$$R_{y2} = \text{sign}(\cos(\text{Theta})) * \int_{\text{top2}} (-\text{spf.T_stressx} * Y) / (F_{x2} + 0.0001) [m]$$

$$F_{y2} = \int_{\text{top2}} (-\text{spf.T_stressy}) [N]$$

$$R_{x2} = \text{sign}(\cos(\text{Theta})) * \int_{\text{top2}} (-\text{spf.T_stressy} * X) / (F_{y2} + 0.0001) [m]$$

$$M3 = F_{x2} * R_{y2} [Nm]$$

$$M4 = \text{abs}(F_{y2}) * R_{x2} [Nm]$$

7.7.8 Implementazione del momento risultante

Il momento risultante è la somma algebrica dei 4 contributi precedentemente calcolati.

$$M = M1 + M2 + M3 + M4 [Nm]$$

7.7.9 Implementazione calcolo baricentro

$$Y_{gravity} = \frac{\int y * \rho * dV}{\int \rho * dV}$$

$$Y_{gravity} = \int_{\text{top4}} (y) / V$$

$$V = \int_{\text{top4}} (1)$$

7.7.10 Implementazione momento polare d'inerzia

$$Jz = m * R_{Jz}^2 [m^2 * kg]$$

dove:

$$R_{Jz} = \sqrt{Xg^2 + Yg^2} [m^2]$$

$$Xg = \int_{\text{top3}} (x) / V [m]$$

$$Yg = \int_{\text{top3}} (y) / V [m]$$

$$m = V * \rho_{pala} [kg]$$

$$\rho_{pala} = 500 [kg/m^3] \text{ (plastica)}$$

$$V = \int_{\text{top3}} (1)$$

sqrt = funzione radice quadrata

intop3 è la funzione integrale applicata al dominio della pala, la costante 1 è il valore

per il quale moltiplicare il volume. Quindi se ci sono più pale uguali o seleziono tutti i domini delle pale da *intop3* oppure seleziono un'unica pala e metto il numero di pale come input alla funzione *intop3*, ad esempio 4 (*intop3(4)*).

7.7.11 Implementazione momento ribaltante

$M_{rib} = \text{sign}(\cos(\Theta)) * (F_x * Z_{g_fluido} + P * X_{g_peso} + F_{x2} * Z_{g2_fluido} - P2 * X_{g2_peso})$

dove:

P = forza peso prima pala

$P2$ = forza peso seconda pala

F_x = forza del fluido sulla prima pala

F_{x2} = forza del fluido sulla seconda pala

g_{fluido} = baricentro forza fluido

g_{peso} = baricentro forza peso

sign = funzione segno –

7.8 Implementazione delle funzioni di vincolo

Di seguito i due script implementati in Matlab:

```
function [T] = function1( Theta, M)
%UNTITLED4 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
if Theta>=1.57 && M>0
    T=0;
end

if Theta>=1.57 && M<0
    T=1;
end

if Theta<1.57 && Theta>0 && M>0
    T=1;
end

if Theta<1.57 && Theta>0 && M<0
```

```

    T=1;
end

if Theta<=0 && M<0
    T=0;
end

if Theta<=0 && M>0
    T=1;
end

function [T] = function2
( Theta, M)
%UNTITLED4 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
if Theta>=1.57 && M>0
    T=1;
end

if Theta>=1.57 && M<0
    T=0;
end

if Theta<1.57 && Theta>0 && M>0
    T=0;
end

if Theta<1.57 && Theta>0 && M<0
    T=0;
end

if Theta<=0 && M<0
    T=1;
end

if Theta<=0 && M>0
    T=0;
end

```

Ringraziamenti

Si ringrazia l'Università della "Magna Graecia" di Germaneto (CZ) nella persona dell'ingegner Gionata Fragomeni per la gentile concessione della licenza d'uso di Comsol MultiPhysics.

Bibliografia

- [1] ABB - *Quaderni di applicazione tecnica N.13 - Impianti eolici*.
- [2] Funaro, D., "Polynomial Approximation of Differential Equations", *Lecture Notes in Physics*, 8, Berlin: Springer-Verlag, pp.182-190, 1992.
- [3] Cheng, A. and D. T. Cheng, "Heritage and early history of the boundary element method", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol. 29, pp.268-302, 2005.
- [4] http://www.ingegneriemeccanica.net/Tematiche/2FM/2FMteoricaB/2FMteoricaB_navierstokes/2FMteoricaB_navierstokes.htm.
- [5] *Encyclopedia of Computational Mechanics*, 1999-2014, John Wiley & Sons.
- [6] *Deformed Mesh Fundamentals*, COMSOL®, 2010.
- [7] Anderson, J. D, *Fundamentals of Aerodynamics*, 2001, McGraw-Hill.
- [8] Braescu, L., George, T. F., "Arbitrary Lagrangian-Eulerian method for coupled Navier-Stokes and convection-diffusion equations with moving boundaries", in *Proc. 12th WSEAS International Conference on Applied Mathematics – Math'07*, Cairo, 2007.
- [9] Bazilevs, Y., Hsu, M. C., Akkerman, I., Wright, S., Takizawa, K., Henicke, B., Spielman, T., Tezduyar, T. E., "3D simulation of wind turbine rotors at full scale. Part I: Geometry modeling and aerodynamics." *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol 65:pp 207–235, 2011.
- [10] Bazilevs, Y., Hsu, M. C., Kiendl, J., Wuchner, R., Bletzinger, K. U., "3D simulation of wind turbine rotors at full scale. Part II: Fluid-structure interaction modeling with composite blades", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 65, pp. 236-253, 2011.
- [11] Stein, K., Tezduyar, T., Benney, , "Mesh moving techniques for fluid–structure interactions with large displacements", *Journal of Applied Mechanics*, 70, pp. 58–63, 2003.
- [12] COMSOL® – *Manuale d'uso di Comsol MultiPhysics®*
- [13] PTC® – *Manuale d'uso di MathCad®*
- [14] PTC® – *Manuale d'uso di Creo®*
- [15] MathWorks® – *Manuale d'uso di MatLab®*