

# POLITECNICO DI MILANO

---

FACOLTÀ DI INGEGNERIA  
Corso di Laurea in INGEGNERIA ELETTRONICA



## MODELLISTICA E CONTROLLO DELLA CATENA CINEMATICA DEI RIFLETTORI DI UNA CENTRALE SOLARE A CONCENTRAZIONE

Relatore: Prof. Gianantonio Magnani

Tesi di Laurea di:  
Paolo Zandonini  
Matr.682334

Anno Accademico 2009/2010

---



---

*Ai miei genitori e a chi mi è stato vicino in questi anni*

---

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1 Cenni al solare a concentrazione</b>	<b>5</b>
1.1 Il fabbisogno energetico della civiltà moderna . . . . .	5
1.2 L'energia solare nella storia . . . . .	7
1.3 La radiazione solare . . . . .	9
1.4 L'energia solare sul nostro pianeta . . . . .	11
1.5 Le motivazioni dell'apertura alle fonti energetiche alternative .	12
1.5.1 Fattori politico-economici legati ai combustibili fossili .	13
1.5.2 Il riscaldamento globale e l'energia verde . . . . .	14
1.6 Tecnologie Solari . . . . .	14
1.6.1 Collettore a disco parabolico . . . . .	17
1.6.2 Sistema a torre centrale . . . . .	20
1.6.3 Collettore parabolico lineare . . . . .	21
1.6.4 Sistema Fresnel . . . . .	23
1.7 Conclusioni . . . . .	24
<b>2 Impianti a collettori lineari di Fresnel</b>	<b>25</b>
2.1 Note storiche . . . . .	25
2.2 Principi di funzionamento . . . . .	27
2.3 Descrizione generale di un concentratore lineare di Fresnel . .	28
2.3.1 Sistema di inseguimento solare . . . . .	28
2.3.2 Struttura portante . . . . .	30
2.3.3 Sistema di riflessione primario . . . . .	31
2.3.4 Il tubo ricevitore . . . . .	33
2.3.5 Sistema di assorbimento . . . . .	34
2.3.6 Vantaggi e svantaggi della tecnologia Fresnel . . . . .	36
2.4 Tracking solare . . . . .	39
2.4.1 Coordinate terrestri . . . . .	39
2.4.2 Metodi di tracking . . . . .	42
2.4.3 Scelta del metodo di inseguimento . . . . .	45

---

2.5	Il progetto FREeSUN . . . . .	50
2.6	Conclusioni . . . . .	51
<b>3</b>	<b>L'attuatore del modulo sperimentale</b>	<b>53</b>
3.1	Scelta del moto . . . . .	54
3.2	I motori passo-passo . . . . .	55
3.2.1	Tipologie di motori stepper . . . . .	56
3.2.2	Modalità di pilotaggio . . . . .	59
3.2.3	Parametri caratteristici dei motori passo-passo . . . . .	60
3.2.4	Il modello analitico . . . . .	61
3.3	Modello Dymola del motore stepper . . . . .	62
3.4	Il blocco "SunPosition" . . . . .	63
3.5	Il blocco "RIF SUN" . . . . .	64
3.6	Il blocco "PWM" . . . . .	69
3.7	Il blocco "ponte H" . . . . .	70
3.8	Il blocco "Stepper" . . . . .	72
3.9	I risultati ottenuti . . . . .	73
3.10	Il modello del riduttore . . . . .	74
3.11	Conclusioni . . . . .	77
<b>4</b>	<b>Modello Dymola del modulo sperimentale</b>	<b>79</b>
4.1	Il blocco "ModuloSperimentale" . . . . .	80
4.1.1	L'offset angolare dovuto alla distanza dello specchio dal CPC . . . . .	82
4.2	Il blocco "Specchio" . . . . .	85
4.3	Cinematismo per la movimentazione dei riflettori primari . . . . .	88
4.3.1	Il blocco "Leva Iniziale" . . . . .	89
4.3.2	Il blocco "Leva Centrale" . . . . .	93
4.3.3	Il blocco "Leva Finale" . . . . .	95
4.3.4	Il blocco "3d- >1d" . . . . .	96
4.4	Conclusioni . . . . .	97
<b>5</b>	<b>Simulazioni del modulo sperimentale</b>	<b>99</b>
5.1	Lo smorzamento torsionale del riduttore . . . . .	99
5.2	Le due tipologie di riflettori primari . . . . .	100
5.2.1	Lo smorzamento torsionale dei riflettori primari . . . . .	102
5.3	Le coppie lato carico . . . . .	103
5.3.1	La coppia gravitazionale dei riflettori . . . . .	103
5.3.2	La coppia generata dal vento . . . . .	107
5.3.3	La coppia generata dall'attrito dei cuscinetti . . . . .	108
5.3.4	La coppia d'inerzia dei riflettori . . . . .	109
5.3.5	La coppia della trasmissione . . . . .	111

---

5.3.6	Incidenza dei contributi di coppia analizzati . . . . .	112
5.3.7	Determinazione del contributo di coppia durante la movi- mentazione degli specchi . . . . .	115
5.4	Prestazioni dei pannelli Vegaflex . . . . .	116
5.5	L'azione di sventamento . . . . .	120
5.6	Il rapporto delle inerzie . . . . .	124
5.7	Conclusioni . . . . .	126
<b>6</b>	<b>Strumentazione e prove sperimentali</b>	<b>129</b>
6.1	Descrizione dell'apparato sperimentale . . . . .	129
6.2	I sensori impiegati sul modulo sperimentale . . . . .	131
6.2.1	L'encoder assoluto . . . . .	132
6.2.2	L'inclinometro Seika NG3i . . . . .	133
6.3	Prove sperimentali . . . . .	134
6.3.1	Errore introdotto dal gioco del riduttore . . . . .	135
6.3.2	Errore introdotto dai cedimenti del riduttore . . . . .	136
6.3.3	Errore introdotto dalla catena cinematica . . . . .	138
6.4	Validazione del modello Dymola del cinematismo . . . . .	142
6.5	Conclusioni . . . . .	145
<b>7</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>147</b>
<b>A</b>		<b>151</b>
<b>B</b>		<b>153</b>
<b>C</b>		<b>155</b>
	<b>Ringraziamenti</b>	<b>161</b>

---

# Elenco delle figure

1.1	<i>Evoluzione dei consumi delle diverse fonti energetiche . . . . .</i>	6
1.2	<i>Densità di radiazione solare . . . . .</i>	9
1.3	<i>Spettro della radiazione solare . . . . .</i>	9
1.4	<i>Irraggiamento del globo terrestre . . . . .</i>	11
1.5	<i>L'irraggiamento nei dintorni del mar Mediterraneo . . . . .</i>	12
1.6	<i>Il costo negli anni del petrolio al barile . . . . .</i>	13
1.7	<i>Impianto termoelettrico: tradizionale e a fonte solare . . . . .</i>	16
1.8	<i>Principio di funzionamento di un disco parabolico . . . . .</i>	18
1.9	<i>Principio di funzionamento del sistema a torre centrale . . . . .</i>	20
1.10	<i>Collettore parabolico lineare . . . . .</i>	22
1.11	<i>Schema di funzionamento impianto ENEA . . . . .</i>	22
1.12	<i>Il sistema Fresnel . . . . .</i>	23
1.13	<i>Principali parametri degli impianti solari a concentrazione . . . . .</i>	24
2.1	<i>I primi prototipi . . . . .</i>	26
2.2	<i>Lente equivalente Fresneliana . . . . .</i>	27
2.3	<i>Strutture di sostegno del pannello: (a) cassa di supporto con lamiere piegate, (b) struttura a traliccio . . . . .</i>	30
2.4	<i>Due diverse tipologie di struttura portante: (a) con lucchetto, (b) con appoggio dal basso . . . . .</i>	31
2.5	<i>Rifocalizzazione dei raggi solari sul tubo ricevitore . . . . .</i>	35
2.6	<i>Struttura del CPC . . . . .</i>	36
2.7	<i>Perdite dovute alla geometria dei concentratori lineari di Fresnel . . . . .</i>	38
2.8	<i>L'azimut <math>\gamma</math> . . . . .</i>	40
2.9	<i>L'altezza <math>\alpha</math> . . . . .</i>	40
2.10	<i>L'angolo <math>\varepsilon</math> . . . . .</i>	41
2.11	<i>Schema di funzionamento di un sistema d'inseguimento ad anello chiuso . . . . .</i>	42
2.12	<i>Confronto fra SPA, CSP e dati USNO di zenit e azimut . . . . .</i>	46
2.13	<i>Errore di SPA e CSP nel calcolo di azimut e zenit rispetto ai dati USNO . . . . .</i>	46

---

2.14	<i>Differenza tra l'inclinazione degli specchi calcolata dai due algoritmi . . . . .</i>	47
2.15	<i>Errore dell'angolo di zenit tra CSP e SPA nel periodo 2010-2030</i>	48
2.16	<i>Errore dell'angolo di azimut tra CSP e SPA nel periodo 2010-2030 . . . . .</i>	48
2.17	<i>Errore sulla posizione tra CSP e SPA nel periodo 2010-2030 .</i>	49
2.18	<i>Errore sulla posizione tra CSP e SPA nel periodo 2010-2030 in funzione delle ore del giorno . . . . .</i>	50
3.1	<i>Motori stepper . . . . .</i>	56
3.2	<i>Schema di un motore passo-passo a magneti permanenti unipolare . . . . .</i>	57
3.3	<i>Schema di un motore passo-passo a riluttanza variabile . . . . .</i>	57
3.4	<i>Schema di un motore passo-passo ibrido: (a) statore, (b) statore e rotore . . . . .</i>	58
3.5	<i>Caratteristica meccanica di un motore passo-passo ibrido . . . . .</i>	61
3.6	<i>Modello Dymola del driver e del motore stepper . . . . .</i>	62
3.7	<i>Uscita del blocco "SunPosition" . . . . .</i>	63
3.8	<i>Il blocco "RIF SUN" . . . . .</i>	64
3.9	<i>Il blocco "RIF Position" . . . . .</i>	65
3.10	<i>Il blocco "RIF" . . . . .</i>	66
3.11	<i>Principali segnali: (a) blocco greater, (b) blocco triggeredSampler, (c) blocco add1, (d) ingressi blocco hysteresis . . . . .</i>	66
3.12	<i>L'uscita <math>j_1</math> del blocco "RIF" . . . . .</i>	67
3.13	<i>L'uscita <math>j_1</math> e <math>j_2</math> del blocco "RIF" . . . . .</i>	68
3.14	<i>Uscite dei blocchi "RIF1", "RIF2" e "RIF3" . . . . .</i>	68
3.15	<i>Sequenza di energizzazione One Phase On . . . . .</i>	69
3.16	<i>Il blocco "PWM" . . . . .</i>	70
3.17	<i>Il blocco "ponte H" . . . . .</i>	71
3.18	<i>Il blocco "Stepper" . . . . .</i>	72
3.19	<i>Rotazione albero motore e corrente di alimentazione nelle fasi</i>	74
3.20	<i>Blocco "Riduttore" . . . . .</i>	75
3.21	<i>Grafico del rendimento in funzione della velocità e della coppia</i>	76
4.1	<i>(a) Campo solare composto da due moduli da 80 specchi (b) Vista dall'alto del modulo sperimentale di Fresnel . . . . .</i>	80
4.2	<i>Blocco "ModuloSperimentale" . . . . .</i>	81
4.3	<i>Posizionamento qualitativo degli specchi al tramonto . . . . .</i>	82
4.4	<i>Angoli caratteristici del riflettore primario al mattino . . . . .</i>	82
4.5	<i>Angoli caratteristici del riflettore primario al pomeriggio . . . . .</i>	84
4.6	<i>Angolo di rotazione dello specchio non baricentrico . . . . .</i>	84
4.7	<i>Vista frontale del modulo sperimentale di Fresnel: disegno tecnico</i>	85



---

4.8	<i>Schematizzazione del blocco “Specchio”</i>	86
4.9	<i>Blocco “Specchio”</i>	86
4.10	<i>Specchio non baricentrico</i>	87
4.11	<i>Esempio di “quadrilatero articolato”</i>	89
4.12	<i>Disegno tecnico della leva di azionamento</i>	90
4.13	<i>Blocco “Leva Iniziale”</i>	90
4.14	<i>Finestra di dialogo del componente bodyShape3</i>	91
4.15	<i>Finestra di dialogo del componente bodyShape2</i>	92
4.16	<i>Disegno tecnico della leva centrale</i>	93
4.17	<i>Blocco “Leva Centrale”</i>	94
4.18	<i>Finestra di dialogo del componente bodyShape3</i>	94
4.19	<i>Disegno tecnico della leva finale</i>	95
4.20	<i>Blocco “LevaFinale”</i>	96
5.1	<i>Rotazione lato carico</i>	100
5.2	<i>Coppia gravitazionale nell’arco di quattro giorni di funzionamento dell’impianto</i>	104
5.3	<i>Coppia gravitazionale nel corso delle ore di funzionamento dell’impianto</i>	105
5.4	<i>Posizionamento qualitativo degli specchi alle ore 20 : 00</i>	106
5.5	<i>Posizione, velocità e accelerazione di uno specchio per uno step lato motore</i>	110
5.6	<i>Coppia d’inerzia generata nel normale funzionamento</i>	111
5.7	<i>Andamento della coppia della trasmissione</i>	112
5.8	<i>Tabella riassuntiva delle varie tipologie di coppie</i>	113
5.9	<i>Incidenza percentuale delle varie coppie</i>	113
5.10	<i>Incidenza percentuale delle varie coppie a mezzogiorno</i>	114
5.11	<i>Rotazione assoluta del primo e decimo Pannello Vegaflex 0803WR10-43</i>	117
5.12	<i>Rotazione assoluta del primo e decimo Pannello Vegaflex 0803WR10-28</i>	118
5.13	<i>Schematizzazione del blocco “Specchio”</i>	119
5.14	<i>Posizione, velocità, accelerazione e coppia d’inerzia nel caso di sventamento</i>	121
5.15	<i>Coppia della trasmissione durante lo sventamento</i>	122
5.16	<i>Incidenza percentuale delle varie coppie durante lo sventamento</i>	123
5.17	<i>Rotazione lato motore e carico al variare dell’inerzia del carico</i>	125
5.18	<i>Risposta allo scalino del motore stepper</i>	126
6.1	<i>Apparato sperimentale del prototipo: (a) motore e riduttore, (b) foro per inserimento del riflettore, (c) cinematismo del prototipo</i>	130
6.2	<i>Disegno tecnico del sensore Seika NG3i</i>	134

---

6.3	<i>Connessioni del sensore Seika NG3i . . . . .</i>	134
6.4	<i>Posizionamento dell'inclinometro sul calettatore d'uscita del riduttore . . . . .</i>	135
6.5	<i>Rotazione negativa . . . . .</i>	136
6.6	<i>Errore sul posizionamento del blocco riduttore-manovella pri- maria . . . . .</i>	137
6.7	<i>Legame angolo di torsione coppia applicata . . . . .</i>	138
6.8	<i>Set-up della prova: posizionamento dell'inclinometro sulla dec- ima manovella . . . . .</i>	139
6.9	<i>Posizionamento della manovella primaria e dell'ultima . . . . .</i>	140
6.10	<i>Errore sul posizionamento dell'intero sistema . . . . .</i>	141
6.11	<i>Parte di modello da validare . . . . .</i>	143
6.12	<i>Confronto fra software Dymola e prove sperimentali . . . . .</i>	144

# Elenco delle tabelle

5.1	Tabella riassuntiva <i>PannelloVegaflex0803WR10</i> – 43 . . . . .	101
5.2	Tabella riassuntiva <i>PannelloVegaflex0803WR10</i> – 28 . . . . .	101
5.3	<i>Coppie gravitazionali sugli specchi alle ore 20 : 00</i> . . . . .	106
5.4	<i>Coppie generate dal vento</i> . . . . .	107
5.5	<i>Parametri dei cuscinetti</i> . . . . .	109
5.6	<i>Coppie d'attrito generate dai cuscinetti</i> . . . . .	109

---

---

## Sommario

Le centrali solari a collettori lineari di tipo Fresnel (CSP) rappresentano una tipologia di centrali a concentrazione solare per la produzione di energia elettrica pulita.

Questa tecnologia prevede l'uso di riflettori primari o specchi atti a riflettere la luce del Sole su un collettore posto ad una certa altezza dal terreno in cui scorre dell'acqua la quale viene riscaldata per produrre vapore acqueo e mettere in funzione una turbina per la produzione di energia elettrica.

Gli studi eseguiti in questo scritto sono inerenti ad un modulo sperimentale da dieci specchi il quale rappresenta una piccola parte di un impianto a collettori lineari di tipo Fresnel.

La presenza di elevate coppie agenti sul carico, unita alla bassa velocità in gioco complicano la movimentazione ed il corretto posizionamento dei riflettori primari.

In questo lavoro di tesi viene proposta un'analisi delle coppie agenti sul modulo sperimentale e viene effettuata una valutazione sull'errore introdotto dalla catena cinematica.

Verranno quindi proposti i risultati ottenuti sia dal punto di vista numerico, attraverso l'impiego di un modello Dymola del modulo sperimentale, sia in campo sperimentale, attraverso delle test eseguiti sul prototipo stesso.

Al termine verrà effettuata una disamina fra i risultati ottenuti tramite il software di simulazione e quelli relativi ai test eseguiti.

**PAROLE CHIAVE:** collettori lineari di Fresnel, rigidità torsionale dei riflettori, Dymola, low velocity, stepper motor, open loop system, trasmissione, position control.

---

# Introduzione

## Motivazioni

L'entrata in vigore del protocollo di Kyoto, avvenuta il 16 febbraio 2005, ha portato ad un primo passo concreto verso la riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra. Gli stati industrializzati hanno attuato strumenti legislativi e politici di incentivazione per adempiere agli obblighi previsti dal protocollo ed alcuni punti di intervento previsti mirano ad un miglioramento dell'efficienza energetica, allo sviluppo ed al maggiore utilizzo di fonti energetiche rinnovabili.

Il mercato delle tecnologie per la produzione di energia da fonti rinnovabili è in forte sviluppo, spinto oltre che dal riscaldamento globale, anche da fattori politico-economici legati ai combustibili fossili. È stato stimato che il suddetto mercato nel 2008 ha superato un volume di investimenti pari a 160 miliardi di dollari a livello mondiale, ma tuttavia risulta ancora non essere competitivo con quello dell'energia prodotta da fonti tradizionali. Pertanto è necessario un intervento pubblico in termini di incentivazione alla produzione e parallelamente risulta necessaria un'incentivazione alla ricerca orientata alla realizzazione di impianti per la produzione di energia “pulita” a costi competitivi. Una politica orientata alle fonti rinnovabili risulta essere ancora più difficile in questo periodo di crisi economica, dove la domanda e il prezzo dell'energia sono diminuiti, il che comporta maggiori difficoltà nell'ottenere prezzi competitivi da fonti energia rinnovabili.

Proprio per le motivazioni sopra citate è nato il progetto FREeSUN, sviluppato nell'ambito del bando Industria 2015 Efficienza Energetica ed in parte finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico, il quale prevede la realizzazione di un impianto solare termodinamico a concentrazione di tipo “Fresnel” partendo dalla progettazione fino a giungere alla realizzazione dell'impianto produttivo.

Il seguente scritto si colloca all'interno del progetto FREeSUN, a cui il Politecnico di Milano partecipa attivamente, il cui scopo è la realizzazione di un impianto solare termico da 1[MWe]. L'impianto solare che si intende realiz-

zare è, come detto in precedenza, un impianto solare a concentratori lineari di Fresnel il quale è costituito da dei riflettori primari che concentrano la luce solare su un ricevitore centrale nel quale è presente un liquido termovettore. L'energia assorbita dal liquido viene successivamente utilizzata per produrre del vapore in grado di muovere una turbina la quale genererà energia elettrica.

## Obiettivi e risultati principali

L'obiettivo di questa tesi risulta essere la creazione di un modello software del campo solare e della catena cinematica atta alla movimentazione dei riflettori primari e la verifica del corretto posizionamento della catena cinematica.

Per quanto riguarda il primo obiettivo, un modello software dettagliato permette di affiancare la fase di progettazione e viene in aiuto a quest'ultima verificando la bontà delle scelte fatte. Il modello del campo solare è stato interamente realizzato con il software Dymola il quale permette la simulazione del comportamento dinamico e delle complesse interazioni fra sistemi derivanti da diversi campi dell'ingegneria, quali ad esempio quello meccanico e quello elettronico.

Per quanto riguarda il secondo obiettivo, è stata eseguita un'attività sperimentale riguardante la trasmissione del modulo sperimentale, cioè il blocco costituito da riduttore e cinematismo. In questa fase sperimentale si è cercato di quantificare l'errore sulla posizione che viene introdotto lungo la trasmissione dovuto ai cedimenti ed ai giochi introdotti da riduttore ed accoppiamenti meccanici. Ottenuto tale errore è possibile analizzare se effettivamente le specifiche di progetto risultano rispettate.

## Organizzazione della tesi

Prima di presentare il modello del campo solare e della catena cinematica sono state presentate le varie tecnologie solari esistenti nel Mondo e successivamente ci si è focalizzati sulla tecnologia a collettori lineari di Fresnel, la quale potrebbe risultare una valida alternativa alle altre tecnologie solari a concentrazione per i suoi punti di forza quali la semplicità della struttura, la semplice movimentazione degli specchi, il metodo di inseguimento ed una migliore ottimizzazione del terreno su cui l'impianto è installato.

Il capitolo successivo è stato dedicato a comprendere il modello Dymola del motore stepper, cioè l'attuatore che deve eseguire la movimentazione degli specchi e del riduttore necessario date le elevate coppie in gioco e le bassissime velocità presentate dal sistema.

A questo punto è stata intrapresa la modellizzazione del prototipo a collettori



---

lineari di Fresnel composto da dieci specchi, il quale rappresenta una piccola parte dell'impianto solare termico da 1[MWe]. In questa parte particolare attenzione è stata posta alla realizzazione del modello del riflettore primario cioè alle sue caratteristiche strutturali, allo sfasamento fra i vari riflettori ed alle sollecitazioni che disturbano il suo corretto posizionamento.

Successivamente è stato realizzato il modello del cinematismo per la movimentazione dei riflettori primari. Tale modello ha richiesto l'utilizzo della libreria "Multibody", con la quale è stato possibile evidenziare il funzionamento di ogni singolo pezzo della trasmissione, cosa non possibile con la libreria del "dominio rotazionale" (rotational 1D) con cui sono stati realizzati i riflettori primari. Inoltre è stata creata un'interfaccia ad hoc che permettesse la comunicazione fra questi due mondi.

Dopo aver realizzato i modelli di cinematismo e riflettori, sono stati riportati i risultati ottenuti dalle simulazioni. In particolare, nella prima fase delle simulazioni il motore è stato fatto funzionare in condizioni normali, cioè pilotato dall'algoritmo del Sole. In questo modo sono state valutate tutte le coppie agenti sul modulo sperimentale ed è stato determinato il periodo più critico della giornata per quanto riguarda il posizionamento dei riflettori primari, andando a verificare che il posizionamento del riflettore fosse effettivamente corretto. Nella seconda fase delle simulazioni il motore è stato fatto funzionare alla velocità di sventamento, situazione che si verifica con condizioni atmosferiche avverse, ed è stata eseguita un'analisi delle coppie agenti sul modulo sperimentale in questa situazione confermando l'efficacia dell'attuatore scelto.

Nell'ultima parte del lavoro è stata presentata l'attività sperimentale eseguita sul prototipo con la quale si è cercato di comprendere i giochi ed i cedimenti del sistema. Al termine dell'attività sperimentale è stato possibile concludere che il modulo sperimentale rispetta le specifiche di progetto. Inoltre è stato eseguito il confronto fra le prove realizzate in simulazione e quelle sperimentali, il quale ha permesso di validare con successo il modello Dymola di riduttore e cinematismo. La validazione del modello risulta necessaria affinché le prove eseguite in simulazioni rispecchino quanto ottenuto nella realtà.

Nel capitolo conclusivo vengono riportate le problematiche affrontate durante questo lavoro e le conclusioni a cui si è giunti. In particolare, partendo da quest'ultime, sono state proposte delle aree di miglioramento riguardanti la modellizzazione.



# Capitolo 1

## Cenni al solare a concentrazione

In questo breve capitolo, dopo aver introdotto le cause che hanno portato ad investire sul solare termodinamico, verranno presi in considerazione differenti tecnologie per la concentrazione della radiazione solare. L'intento è quello di descrivere brevemente per ognuno di essi il principio di funzionamento, introducendo quindi brevi cenni sui vantaggi e svantaggi di questi impianti solari a concentrazione.

### 1.1 Il fabbisogno energetico della civiltà moderna

Dalla seconda metà del '700, ovvero dall'avvento della prima rivoluzione industriale, l'uomo è andato sempre più alla ricerca di fonti energetiche, necessarie allo sviluppo tecnologico e al conseguente miglioramento delle generali condizioni di vita. Questo sviluppo ha portato profondi cambiamenti del tessuto socio-economico, nonché tecnologico, dell'umanità ed il suo effetto è chiaramente visibile nella vita di tutti i giorni. Negli ultimi 150 anni il consumo energetico è cresciuto ad un tasso annuo medio intorno al 2,3%, ed oggi esso è per larga parte soddisfatto dai combustibili fossili. La quantità di energia utilizzata dall'uomo è aumentata fino al punto di superare l'energia geotermica proveniente dal nucleo terrestre.

Il fabbisogno di energia prima della rivoluzione industriale, per un esclusivo utilizzo termico, è stato soddisfatto dalle biomasse. La nascita dell'industria fu una diretta conseguenza dello sviluppo delle macchine termiche, quale la macchina a vapore di James Watt. Queste macchine a vapore avevano bisogno di grandi quantità di energia ricavata da combustibili a grande energia specifica, che portò alla sostituzione della legna da ardere con il carbone, di cui l'Inghilterra, teatro della prima rivoluzione industriale, ne era ricca.

Tuttavia la diffusione dell'industria a livello planetario fu favorita dalla scoperta e sviluppo dell'energia elettrica. Questo sviluppo necessitava di un forte sostentamento energetico ed è proprio in questo periodo che parte la ricerca forsennata di nuove fonti energetiche e del loro approvvigionamento.

Tra le fonti energetiche impiegate si annovera, oltre il carbone, il petrolio (le cui potenzialità termiche furono scoperte intorno alla metà dell'800), l'energia dei corpi idrici, l'energia geotermica, l'energia del gas naturale, l'energia nucleare, nonché le più moderne energie eolica e solare, senza dimenticare l'antica energia derivante dalle biomasse. Il grafico che segue presenta come le diverse fonti energetiche sono state impiegate nel corso degli anni, e come si prevede saranno impiegate[1].

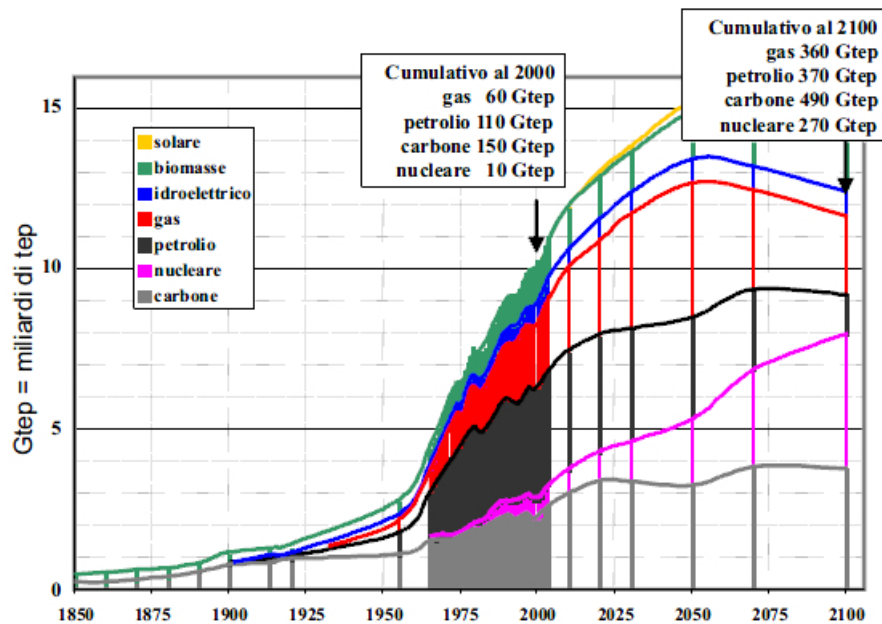


Figura 1.1: *Evoluzione dei consumi delle diverse fonti energetiche*

Nei fatti il consumo energetico è direttamente correlato alla ricchezza prodotta da una nazione ovvero il PIL. Si constata infatti che l'intensità energetica, ovvero il rapporto tra i consumi energetici ed il PIL, anche se leggermente decrescente con il progresso dell'efficienza di trasformazione, è circa la stessa per i Paesi poveri e per quelli più sviluppati.

## 1.2 L'energia solare nella storia

L'idea di utilizzare l'energia solare concentrata su collettori è già presente nella storia dell'umanità a partire dal mondo classico. Fin dall'VIII sec. a.C. il sacro fuoco delle Olimpiadi, come descritto da Plutarco, veniva appiccato tramite parabole bronzee lucidate. Poi altri personaggi nella storia della scienza hanno trattato gli specchi per la concentrazione solare come Archimede, Leonardo, e Galileo[2].

Il primo esperimento storicamente documentato di specchi ustori di tipo archimedeo con esito positivo fu realizzato da George Louis Leclerc conte di Buffon nel 1747. Egli utilizzò 147 specchi piani di vetro stagnati posteriormente di dimensioni  $16 \times 22$  [cm], i quali erano singolarmente aggiustabili su due assi con un obiettivo di legno d'abete alla distanza di 46 metri.

Le prime applicazioni utili comparvero nella seconda metà dell'Ottocento ad opera di Augustin Mouchout, una cucina solare nel 1870, il quale all'esposizione di Parigi del 1878 presentò una caldaia solare realizzata con uno specchio dal diametro di  $4$  [m], volume d'acqua  $70$  [l] in grado di produrre un vapore alla pressione di  $7$  [bar]. Grazie ai finanziamenti di Napoleone III, Mouchout realizzò un concentratore a forma di tronco di cono, dotato di una superficie captante di circa  $20$  [m<sup>2</sup>], e riuscì così a far produrre al suo motore poco più di  $1$  [Kw].

Nel 1878 l'inglese William Adams cominciò la costruzione della prima torre a concentrazione e nel 1855 un altro francese, Charles Tellier, utilizzò per la produzione del vapore dei collettori piani. Poco prima, negli Stati Uniti, l'ingegnere svedese John Ericsson inventò il primo concentratore parabolico e brevettò numerose macchine solari. Nell'ultimo decennio del 1800 comparvero le prime applicazioni commerciali, Aubrey Eneas nel 1892 fondò la prima compagnia al Mondo per lo sviluppo di applicazioni solari, la Solar Motors Co. I primi prodotti di Eneas commercializzati nel 1903 furono delle pompe solari. Nel 1912 venne realizzato il più grande impianto solare dell'epoca a Meadi (Egitto,  $20$  [Km] dal Cairo), formato da  $1200$  [m<sup>2</sup>] di collettori parabolici che focalizzavano la luce su un unico tubo assorbitore per un impianto d'irrigazione di  $55$  [CV] e  $27000$  [litri/min]. Poi a causa della prima guerra mondiale e della crescente industria petrolifera a basso costo, nel dopoguerra ci fu un arresto nella ricerca e sviluppo di applicazioni solari.

A partire dalla seconda metà del secolo scorso l'Italia divenne protagonista del solare termico grazie alle idee del prof. Giovanni Francia, ingegnere e matematico dell'Università di Genova, il quale divenne noto a livello mondiale come il padre delle centrali solari termoelettriche[3]. Oltre a diversi studi, che vedremo in seguito, fu l'ispiratore di Eurelios, la prima grande centrale solare a concentrazione al Mondo da  $1$  [MW] con ricevitore centrale Fresnel

o a torre, venne costruita nelle vicinanze di Adrano (Catania) e collegata nel 1980 alla rete elettrica.

Furono due le principali tecnologie che si svilupparono dagli anni '50 in poi, con assorbitore distribuito o con assorbitore centrale. La tecnologia ad assorbitore centrale utilizzava un campo di eliostati per focalizzare la radiazione su un'unica torre centrale, questo sistema prevedeva una particolare movimentazione degli eliostati con un tracking solare biassiale. La tipologia ad assorbitore distribuito prevedeva dei concentratori parabolici, parabolici lineari e specchi di Fresnel. I maggiori dettagli tecnici delle tecnologie verranno trattati in seguito.

Un'altra area d'interesse sviluppatasi negli anni '30-'40 del secolo scorso fu la generazione di acqua calda e il riscaldamento domestico[2]. Il primo pannello solare per scaldare l'acqua pare sia stato costruito nel diciottesimo secolo dallo scienziato svizzero Horace Benedict de Saussure. Si trattava di una semplice scatola di legno con un vetro nella parte esposta al Sole e la base di colore nero, capace di assorbire la radiazione solare termica intrappolata nella scatola stessa grazie a un locale effetto serra e alla scarsa dispersione dovuta alle buone caratteristiche isolanti del legno: tale pannello consentiva di raggiungere temperature di circa  $87[^\circ C]$ .

A livello commerciale il primo sistema per la produzione di acqua calda brevettato comparve nel 1891 realizzato dall'americano Clarence Kemp: nel 1897 in moltissime case della California erano già presenti dispositivi per il riscaldamento dell'acqua.

Questa applicazione prese piede negli anni '60 espandendosi molto velocemente soprattutto dal '75 in poi a causa della crisi petrolifera in atto. Scarsa efficienza, costi dell'impianto difficilmente ammortizzabili nel tempo ed eccessiva manutenzione portarono in disuso questa tecnologia.

Becquerel nel 1839 scoprì l'effetto fotovoltaico del selenio, questo più tardi portò alla realizzazione di celle fotovoltaiche per la produzione di energia elettrica, prima per applicazioni spaziali negli anni sessanta dove i costi non erano un limite ed era l'unica fonte di energia utilizzabile e successivamente anche per applicazioni terrestri. Per molto tempo è rimasta una tecnologia molto cara per i materiali utilizzati. Le celle fotovoltaiche vengono realizzate con semiconduttori e quando iniziarono ad essere utilizzate per applicazioni commerciali negli anni '80 avevano efficienze massime del 10% mentre ora raggiungono il 20%.

La ricerca nel settore delle energie rinnovabili e soprattutto nell'energia solare ha avuto fasi altalenanti dalla seconda metà del Novecento in poi, perché era influenzata dagli interessi economici gestiti dall'industria e dalle economie nazionali, molto importanti sono anche i finanziamenti pubblici in questo ambito di ricerca. Cambiamenti climatici, inquinamento e aumento della popo-

lazione, con incremento del fabbisogno energetico, hanno aperto nuove opportunità finanziarie per questo ambito di ricerca.

### 1.3 La radiazione solare

La fonte primaria di energia per la terra è quella solare la quale emette energia elettromagnetica e il cui spettro è riportato in *figura 1.3*. L'energia che giunge sulla terra per unità di superficie, misurata su un piano perpendicolare ai raggi solari, è la costante solare ed ha un valore di  $1367 [W/m^2]$ , *figura 1.2*, con variazioni periodiche dovute ai cicli solari.

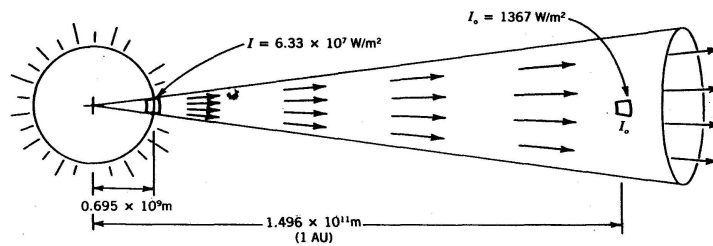


Figura 1.2: *Densità di radiazione solare*

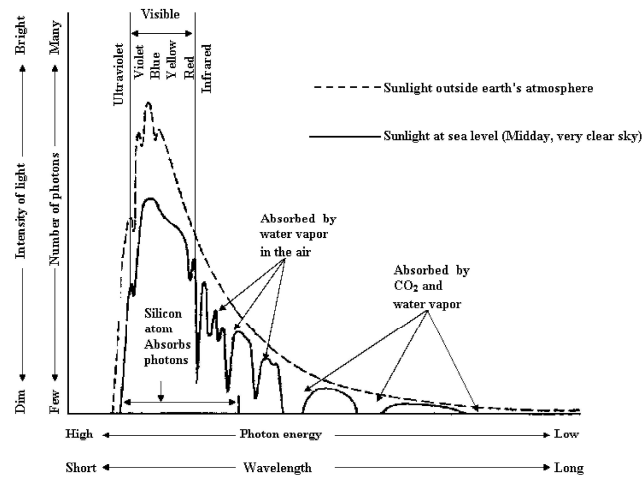


Figura 1.3: *Spettro della radiazione solare*

A causa dell'orbita ellittica della terra la radiazione solare che giunge sulla terra varia con il quadrato della distanza terra-Sole (circa  $\pm 3,4\%$ ) con irraggiamento massimo al perielio (punto più vicino al Sole), e un minimo all'afelio

(punto più distante dal Sole). Tale variazione può essere approssimata con la seguente formula:

$$I_0 = I_{SC} \cdot \left[ 1 + 0.034 \cdot \cos\left(\frac{360N}{365.25}\right) \right] \quad (1.1)$$

dove:

- $I_0$  è la radiazione solare normale incidente nello strato esterno dell'atmosfera;
- $I_{SC}$  è la costante solare;
- $N$  numero del giorno partendo dal primo gennaio.

Un altro parametro da tenere in considerazione per quanto riguarda la radiazione solare è l'effetto coseno. Se i raggi solari colpiscono una superficie normale ad essi l'intensità della radiazione è massima, in caso contrario viene ridotta di un fattore coseno causato dall'angolo compreso tra la normale alla superficie e i raggi solari stessi, ottenendo quindi la seguente relazione:

$$I_{0,h} = I_0 \cdot \cos\vartheta z \quad (1.2)$$

Dove:

- $I_{0,h}$  è la radiazione incidente al piano tangente alla superficie esterna dell'atmosfera;
- $\vartheta z$  è l'angolo tra la normale al piano tangente la superficie esterna dell'atmosfera in un punto e i raggi solari.

L'intensità della radiazione che giunge sulla terra dipende dalla locazione geografica e questo parametro è indispensabile per individuare sulla superficie terrestre le zone più adatte ad applicazioni solari. Sono stati implementati opportuni algoritmi per stimare l'intensità della radiazione solare che giunge sulla terra in funzione del tempo, della posizione e in alcuni casi anche in base alle condizioni atmosferiche, tra i quali si possono citare ad esempio l'Iqbal model C e l'ASHRAE model.

La radiazione passando nell'atmosfera subisce un'attenuazione e sulla superficie terrestre la costante assume un valore di circa  $1000[Watt/m^2]$ . Ovviamente questo è un valore di picco con Sole allo zenit e tempo sereno, posizione geografica e meteorologica ne causeranno una sensibile variazione ed alle latitudini europee si avrà un'insolazione media di  $200[Watt/m^2]$ . Osservando attentamente la *figura 1.3* si nota come la radiazione che raggiunge l'atmosfera viene in parte assorbita o riflessa dagli elementi presenti nei vari strati



atmosferici e quindi lo spettro solare viene modificato. In *figura 1.2* sono evidenziate delle bande di assorbimento, ad esempio di vapore acqueo e  $CO_2$ , parte della radiazione viene diffusa all'esterno dell'atmosfera. Il picco dello spettro si trova nella zona della luce visibile.

La parte di radiazione che non subisce modificazioni e raggiunge direttamente la superficie terrestre è chiamata *radiazione diretta*, mentre la parte della stessa che è stata diffusa dall'atmosfera è chiamata appunto *radiazione diffusa*. In Italia, la parte di radiazione diffusa copre al sud il 25% e al nord il 40% della radiazione incidente durante tutto l'anno.

## 1.4 L'energia solare sul nostro pianeta

Dal punto di vista meramente tecnico, con l'espressione energia solare si intende l'energia raggiante sprigionata dal Sole per effetto delle radiazioni termonucleari che avvengono al suo interno, e trasmessa alla Terra sotto forma di radiazione elettromagnetica.

Il consumo complessivo legato alle attività dell'uomo è comunque solo 1/10000 dell'energia incidente sulla superficie terrestre proveniente dal Sole. In via teorica possiamo pensare che utilizzando l'energia raggiante incidente su una zona del pianeta ad alta insolazione con un'area pari a 1/10000 della superficie terrestre possiamo coprire il fabbisogno energetico mondiale e avere anche un surplus energetico, infatti la radiazione solare non è equamente distribuita sulla superficie terrestre. Di seguito se ne presenta la distribuzione sul globo e in particolare sul mediterraneo.

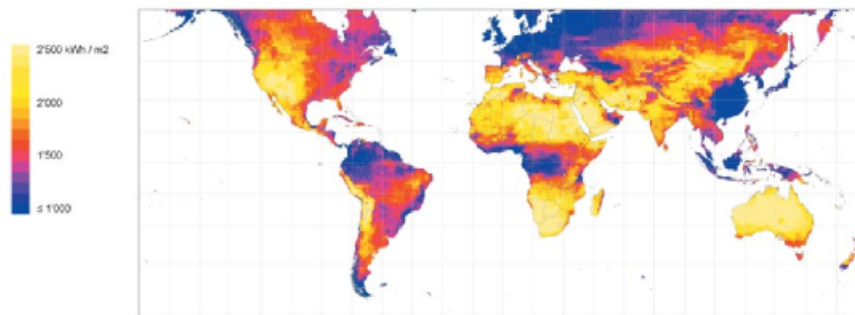


Figura 1.4: *Irraggiamento del globo terrestre*

Come si evince chiaramente dalle mappe le zone a maggior irraggiamento si trovano nella zona nord-occidentale dell'America settentrionale (dove è nato il solare termodinamico), la zona delle Ande in America meridionale, e la fascia

che comprende l’Africa settentrionale, il Medio Oriente e parte dell’Indocina. Dalla mappa del Mediterraneo possiamo notare che discrete condizioni di irraggiamento si hanno per la penisola iberica e l’estremo meridionale della penisola italiana e la Grecia.

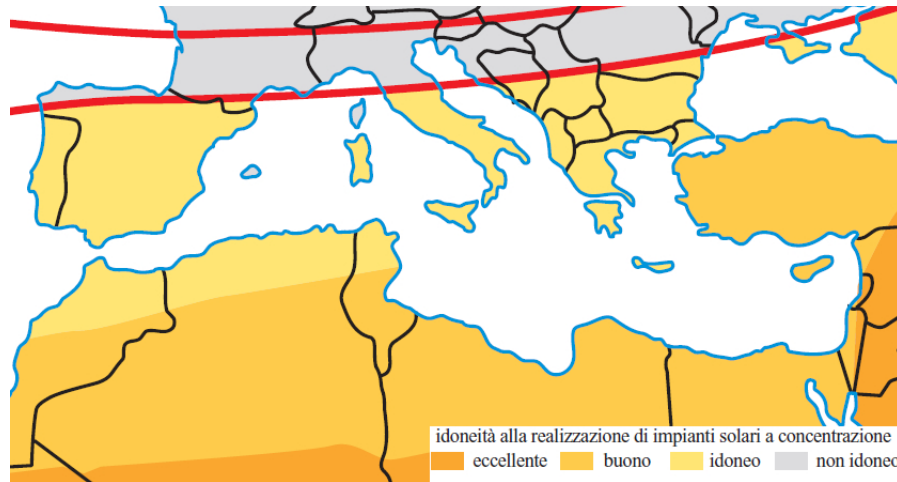


Figura 1.5: *L’irraggiamento nei dintorni del mar Mediterraneo*

## 1.5 Le motivazioni dell’apertura alle fonti energetiche alternative

La crisi economica, sta determinando un forte rallentamento dell’economia mondiale ed una fase recessiva delle economie mondiali i cui esiti finali sono tuttora incerti. Pur nella crisi, i paesi emergenti e quelli in via di sviluppo, mostrano tassi di crescita ancora sostenuti rispetto alla diffusa recessione dei paesi più avanzati.

Anche l’andamento della domanda d’energia mostra sensibili differenze tra le aree geopolitiche. I paesi emergenti e quelli in via di sviluppo potrebbero vedere, pur nel rallentamento economico, una continua crescita della domanda d’energia, in atto da anni, trascinata in modo particolare dalla domanda d’energia in India e in Cina.

Esistono principalmente due motivazioni che hanno portato all’apertura verso fonti energetiche alternative:

- fattori politico-economici legati ai combustibili fossili;
- il riscaldamento globale e l’energia verde.

### 1.5.1 Fattori politico-economici legati ai combustibili fossili

Da quando i combustibili fossili, in particolar modo il petrolio, sono diventati la più importante fonte energetica a livello mondiale, le nazioni che erano costrette ad importarlo hanno potuto usufruire, nei primi decenni, di un approvvigionamento stabile e conveniente, certe che questa situazione si sarebbe perpetuata negli anni. Su tale previsione hanno costruito le fondamenta dello sviluppo industriale e dei trasporti. La scelta di puntare esclusivamente sui combustibili fossili si è tuttavia rivelata un pesante errore di valutazione, in quanto di pari passo alle esportazioni è cresciuto il peso politico delle nazioni esportatrici di petrolio, ma soprattutto l'instabilità politica delle regioni mediorientali e le varie vicende politiche mondiale ha comportato delle ricadute pesanti sui prezzi. Il clima di incertezza e la necessità di alimentare un sistema molto energivoro spingono al rialzo il prezzo del petrolio sui mercati internazionali, con conseguenti ricadute sul costo dei prodotti industriali nazionali e del carburante.

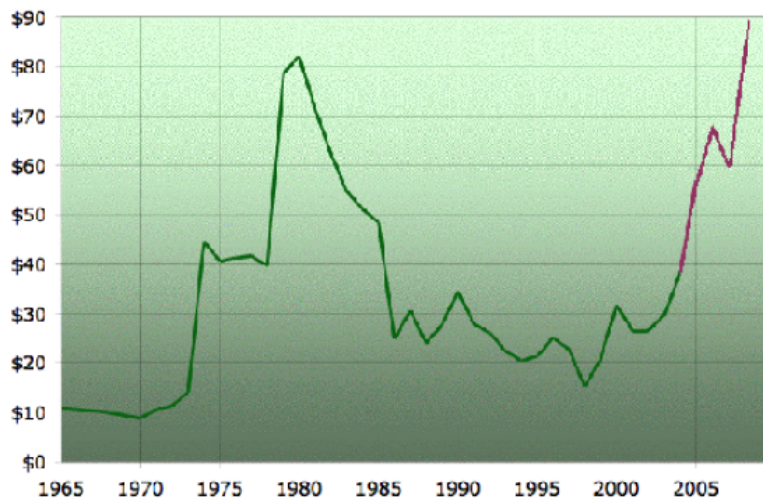


Figura 1.6: *Il costo negli anni del petrolio al barile*

In figura è riportata la variazione del costo del greggio negli anni posteriori al 1965. I vari picchi che si osservano dipendono da eventi particolari: il picco del 1980 è dovuto ad esempio alla nascita del cartello OPEC, ovvero l'organizzazione che comprende i paesi produttori di petrolio, mentre il rialzo negli ultimi anni è dovuto alla guerra del Golfo e le varie vicende politiche

del Medio Oriente oltre che la richiesta sempre maggiore di energia da parte di nazioni in via di sviluppo come la Cina e l'India.

L'elevato costo del petrolio, che trascina con se anche i prezzi di gas naturale e carbone, rende economicamente vantaggiose tecnologie e fonti energetiche, che altrimenti non sarebbero in grado di competere con i combustibili fossili. Si parla delle fonti rinnovabili, le quali a differenza del petrolio, garantiscono un costo dell'energia costante, in quanto il prezzo finale non comprende la quota relativa al costo del combustibile, essendo gratuito o comunque non influenzato dal prezzo del greggio.

### 1.5.2 Il riscaldamento globale e l'energia verde

Negli ultimi anni gli scienziati hanno sollevato il problema dei cambiamenti climatici che si stanno verificando sul nostro pianeta, che portano ad un aumento generale della temperatura media dell'atmosfera, con conseguenti danni agli ecosistemi oltre al modificarsi delle condizioni meteorologiche generali. Questo fenomeno detto effetto serra è dovuto all'anidride carbonica, maggiore prodotto della combustione, e altri gas che ostacolano il raffreddamento della crosta terrestre. La comunità internazionale ha dato una risposta a questo problema attraverso il protocollo di Kyoto con cui i paesi firmatari si sono impegnati a diminuire le emissioni di gas serra. Anche l'Unione Europea ha emesso una direttiva ai fini dell'attuazione del protocollo. Il consiglio dei ministri italiano ha contribuito a questo processo istituendo il mercato dell'energia verde proveniente da fonti rinnovabili. Questo ha dato vita ad un mercato con due prodotti energetici indipendenti, eliminando la concorrenza interna. Il prezzo dell'elettricità verde è oggi prossimo ai 12 cent di Euro/Kw e solo il 2% dell'energia elettrica prodotta deriva da fonti rinnovabili. L'UE ha come obiettivo a medio lungo termine il raggiungimento di una quota verde del 22%. A questo proposito il solare termodinamico si propone come una conveniente strada da percorrere, con cui si può arrivare a competere con gli stessi combustibili fossili.

## 1.6 Tecnologie Solari

Lo sviluppo delle moderne tecnologie a concentrazione[4] ha avuto inizio al pari di altri sistemi per lo sfruttamento di energie rinnovabili, nella prima metà degli anni '70 a seguito della crisi petrolifera del 1973.

Un'iniziativa dell'agenzia internazionale dell'energia (IEA) diede vita ad un programma di studio su larga scala per la produzione di energia elettrica solare per via termodinamica. Nacquero così in varie parti del Mondo alcune

piattaforme tecniche, che si sono evolute in basi sperimentali sul solare termico e sulla fisica delle alte temperature, senza puntare ad uno sfruttamento su vasta scala.

In Europa le aree sperimentali “storiche” dedicate a questo settore di ricerca sono: la Plataforma solar de Almeria (Spagna), l’area sperimentale della DLR di Colonia, Germania; il forno solare, CNRS di Odeillo, Francia e il Paul Scherrer Institute di Villigen, Svizzera.

Agli inizi degli anni '90 il “solare termico” costituiva una tecnologia ed un’industria in crescita, a tal punto che nel 1990 venne avviata la costruzione in California di un impianto da 345[MW].

Un cambio nella politica di incentivazione alle energie rinnovabili ha poi determinato un arresto dello sviluppo di queste tecnologie.

Oggi giorno gli impianti solari a concentrazione sono tornati nuovamente alla ribalta, lo scopo di tali impianti rimane sempre il medesimo ovvero quello di utilizzare l’energia solare per produrre energia termica ad alta temperatura in sostituzione dei tradizionali combustibili fossili. L’energia termica così prodotta può essere impiegata in vari processi industriali (quali, per esempio, la dissalazione dell’acqua di mare e la produzione di idrogeno da processi termochimici) o nella produzione di energia elettrica, contribuendo in questo modo a contenere il consumo mondiale di combustibile fossile e di conseguenza le emissioni nell’atmosfera.

Allo stato attuale l’obiettivo principale degli impianti solari a concentrazione è la generazione di energia elettrica.

In questo caso l’energia termica solare viene utilizzata in cicli termodinamici convenzionali come quelli con turbine a vapore, con turbine a gas o con motori Stirling. La *figura 1.7* mostra schematicamente le differenze tra impianti termoelettrici tradizionali e solari.

In regioni ad alta insolazione (potenza media annua superiore a  $300[W/m^2]$ ) da un metro quadrato di superficie di raccolta è possibile ottenere annualmente un’energia termica equivalente a quella derivante dalla combustione di un barile di petrolio, evitando inoltre l’emissione in atmosfera di circa  $500[kg]$  di anidride carbonica.

Per ovviare alla variabilità della sorgente solare l’energia termica può essere accumulata durante il giorno, rendendo il sistema più flessibile e rispondente alle esigenze dei processi produttivi. In alternativa si può ricorrere all’integrazione con combustibili fossili o rinnovabili quali olio, gas naturale e biomasse.

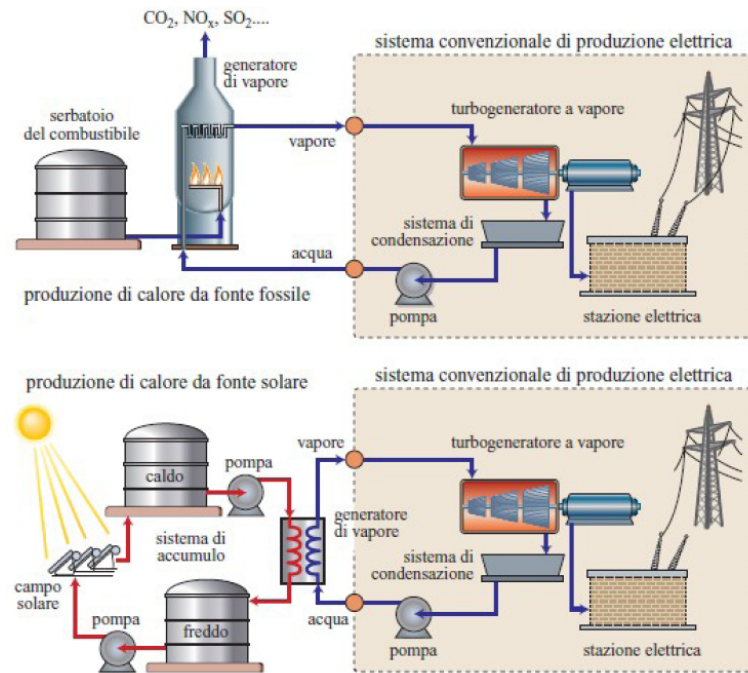


Figura 1.7: *Impianto termoelettrico: tradizionale e a fonte solare*

Gli impianti solari possono utilizzare diverse tecnologie per la concentrazione della radiazione solare; in ogni caso è possibile identificare in essi le seguenti fasi del processo:

1. raccolta e concentrazione della radiazione solare;
2. conversione della radiazione solare in energia termica;
3. trasporto ed eventuale accumulo dell'energia termica;
4. utilizzo dell'energia termica.

La raccolta e la concentrazione della radiazione solare, che per sua natura ha una bassa densità di potenza, rappresentano alcune delle problematiche principali degli impianti solari. Esse vengono realizzate, come già detto, mediante l'impiego di un concentratore, formato da pannelli di opportuna geometria con superfici riflettenti, normalmente comuni specchi di vetro. Tutti i concentratori presenti in un impianto solare, disposti ordinatamente sul terreno e opportunamente distanziati tra loro per non interferire nella raccolta della radiazione, costituiscono il campo solare.

Il ricevitore, che ha svariate forme e che può essere unico per tutto il campo solare oppure accoppiato a ciascun concentratore, trasforma l'energia solare in energia termica, ceduta poi a un fluido che viene fatto passare al suo interno. L'energia termica asportata dal fluido termovettore, prima dell'utilizzo

nel processo produttivo, può essere accumulata in diversi modi: sfruttando il calore sensibile del fluido stesso posto in serbatoi coibentati, oppure cedendo il suo calore a materiali inerti a elevata capacità termica o a sistemi in cambiamento di fase. In questo modo l'energia solare, per sua natura altamente variabile, può diventare una sorgente di energia termica disponibile per l'utenza con continuità.

Un parametro importante che caratterizza gli impianti solari a concentrazione è il solar multiple, o moltiplicatore solare, definito come il rapporto tra la potenza termica di picco del ricevitore e la potenza termica nominale utilizzata dal processo produttivo. In assenza di un sistema di accumulo termico tale parametro risulta uguale a 1 e tutta la potenza termica raccolta viene immediatamente utilizzata; valori superiori indicano la possibilità per l'impianto di accumulare l'energia termica in eccesso.

Il dimensionamento ottimale di un impianto solare a concentrazione va quindi stabilito con un'analisi di tipo economico; per esempio, stando alle valutazioni attuali, negli impianti termoelettrici solari la capacità ottimale per i sistemi di accumulo è quella che garantisce una produzione continuativa compresa tra 6 e 10 ore, a seconda della potenza elettrica nominale, in assenza dell'irraggiamento solare.

Come accennato, i sistemi a concentrazione sfruttano soltanto la radiazione diretta poiché non riescono a concentrare la radiazione diffusa; possono essere di tipo lineare o puntuale. I sistemi a concentrazione lineare sono più semplici ma hanno un più basso fattore di concentrazione e quindi raggiungono temperature di funzionamento minori rispetto ai sistemi a concentrazione puntuale.

In relazione alla geometria e alla disposizione del concentratore rispetto al ricevitore si possono distinguere tre principali tipologie di impianto:

- il collettore a disco parabolico;
- il sistema a torre centrale;
- il collettore parabolico lineare;
- il sistema Fresnel.

### 1.6.1 Collettore a disco parabolico

Questo sistema utilizza un pannello riflettente di forma parabolica che insegue il Sole, con un movimento di rotazione attorno a due assi ortogonali, e concentra la radiazione solare su un ricevitore montato nel punto focale *figura 1.8*. L'energia termica ad alta temperatura viene normalmente trasferita a un fluido e utilizzata in un motore, posizionato al di sopra del ricevitore, dove viene prodotta direttamente energia meccanica ed elettrica.

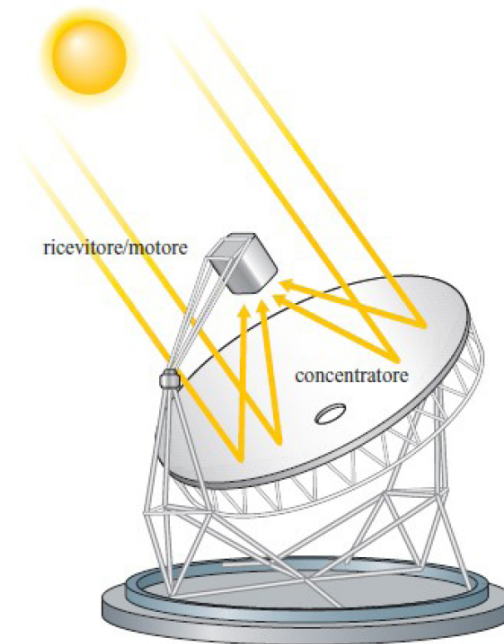


Figura 1.8: *Principio di funzionamento di un disco parabolico*

La forma ideale del concentratore è un paraboloide di rivoluzione; alcuni concentratori approssimano tale forma geometrica utilizzando un insieme di specchi con profilo sferico montati su una struttura di supporto.

Il progetto ottico di questo componente e l'accuratezza nella sua realizzazione determinano il fattore di intercettazione e di concentrazione della radiazione solare.

Il fattore di intercettazione è definito come la frazione del flusso solare che passa attraverso la finestra di ingresso del ricevitore ed è generalmente superiore al 95%, mentre il fattore di concentrazione è già stato definito.

Il ricevitore, che è l'elemento tecnologicamente più avanzato, assorbe l'energia della radiazione riflessa dal concentratore e la trasferisce al fluido di lavoro. La superficie assorbente è generalmente posizionata dietro il fuoco del concentratore per limitare l'intensità del flusso termico solare incidente a valori dell'ordine di  $75[W/cm^2]$ .

Applicazioni industriali di questo sistema forniscono valori del fattore di concentrazione superiori a 2000. Con tali valori si possono ottenere temperature di funzionamento molto alte e rendimenti di conversione dell'energia solare in energia elettrica anche oltre il 30%, i più elevati tra tutte le tecnologie solari attualmente esistenti.

Un concentratore di  $10[m]$  di diametro, per esempio, in presenza di un flusso



solare diretto di  $1000[W/m^2]$ , è in grado di erogare circa  $25[kWe]$ .

Per ragioni economiche, la dimensione del concentratore non va oltre  $15[m]$  di diametro, limitando quindi la sua potenza a circa  $25 - 30[kWe]$ . La tecnologia è comunque di tipo modulare e permette la realizzazione di centrali di produzione di piccola potenza per utenze isolate.

Il motore utilizzato in questi sistemi converte l'energia solare in lavoro, come nei convenzionali motori a combustione interna o esterna.

Il fluido di lavoro viene compresso, riscaldato e fatto espandere attraverso una turbina o un pistone per produrre energia meccanica, che può essere utilizzata direttamente dall'utenza o trasformata in energia elettrica mediante un alternatore.

Sono stati studiati diversi cicli termodinamici e differenti fluidi di lavoro; le attuali applicazioni industriali utilizzano motori con cicli Stirling e Bryton.

Nei motori Stirling si utilizza idrogeno o elio come fluido di lavoro, che viene alternativamente raffreddato, compresso fino a pressioni intorno a  $20[MPa]$ , riscaldato a temperature anche superiori a  $700[^\circ C]$  e poi fatto espandere. Per fare in modo che l'energia solare venga trasferita al fluido di lavoro a temperatura costante, nello scambio termico viene utilizzato un fluido intermedio in cambiamento di fase. Di solito si usa un metallo liquido (sodio) che evapora in corrispondenza della superficie dell'assorbitore del ricevitore e condensa sul fascio tubiero del motore. I vapori di sodio, una volta condensati, raggiungono per gravità la zona dell'assorbitore, distribuendosi per capillarità su tutta la sua superficie.

Il motore Bryton utilizza invece aria come fluido di lavoro, con una pressione massima di  $0.25[MPa]$  (rapporto di compressione pari a 2.5) e una temperatura di ingresso in turbina anche superiore a  $850[^\circ C]$ .

Grazie alle elevate temperature raggiunte dal fluido di lavoro, il suo rendimento di trasformazione da energia solare a elettrica supera quello del motore Stirling e può arrivare a oltre il 30%.

L'energia termica residua del fluido all'uscita della turbina viene utilizzata per preriscaldare l'aria proveniente dal compressore.

In questo tipo di applicazioni il ricevitore è ad assorbimento volumetrico, analogo a quello utilizzato negli impianti a torre: la radiazione solare concentrata passa attraverso una finestra di quarzo per poi essere assorbita da un sistema a matrice porosa (honeycombs e celle reticolari di materiale ceramico). Tale ricevitore fornisce elevate superfici di scambio termico con efficienze di conversione, da energia solare a termica, superiori all'80%.

L'energia termica al fluido può anche essere fornita da una camera di combustione a metano, per consentire il funzionamento del motore in condizioni di assenza della radiazione solare o di notte.

### 1.6.2 Sistema a torre centrale

Il sistema a torre con ricevitore centrale (vedi *figura 1.9*) utilizza pannelli riflettenti piani (eliostati) che inseguono il Sole con un movimento di rotazione su due assi, concentrando la luce solare verso un unico ricevitore; questo è montato sulla sommità di una torre e al suo interno viene fatto circolare un fluido per l'asportazione dell'energia solare.

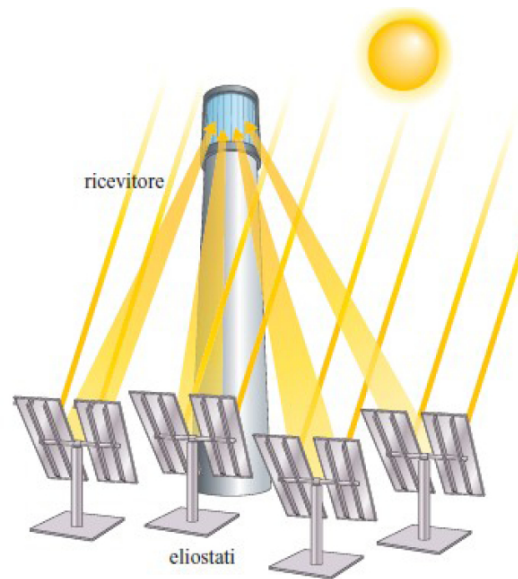


Figura 1.9: *Principio di funzionamento del sistema a torre centrale*

Il principio di funzionamento è analogo a quello del sistema a disco parabolico, con il concentratore costituito però da un elevato numero di eliostati a formare una superficie di raccolta, o captante, che può arrivare a centinaia di migliaia di metri quadri.

I raggi solari che colpiscono ciascun eliostato vengono riflessi su un punto unico, fisso nel tempo, che funge da punto focale.

L'altezza, rispetto al suolo, del punto focale cresce all'aumentare dell'estensione del campo solare e può superare anche il centinaio di metri.

Gli eliostati sono dislocati in modo da circondare la torre oppure sono posti a emiciclo verso nord; sono distanziati per evitare fenomeni di ombreggiamento e la loro distanza aumenta allontanandosi alla torre.

Sono state studiate diverse tipologie di eliostati per migliorare l'efficienza ottica e il controllo dei sistemi di inseguimento del Sole, nonché per ottimizzare la struttura di supporto, rendendola più semplice e leggera. Ciò al fine di

aumentare il rendimento dell'impianto e ridurre i costi.

La superficie captante di ciascun eliostato varia da circa 40 a 170[m<sup>2</sup>]; come materiale riflettente si utilizzano normalmente specchi di vetro, ma sono stati sperimentati anche materiali alternativi quali membrane riflettenti o fogli metallici.

Il fattore di concentrazione di questi impianti risulta superiore a 700. L'elevato fattore di concentrazione permette al fluido termovettore di raggiungere alte temperature di esercizio (maggiori di 500[°C]), con conseguenti alti rendimenti di trasformazione dell'energia termica in energia elettrica.

In genere la trasformazione avviene sfruttando l'energia termica in un tradizionale ciclo termodinamico acqua-vapore.

Le caratteristiche del vapore prodotto (temperatura e pressione) consentono anche di integrare i sistemi a torre negli impianti termoelettrici a combustibili fossili. Inoltre questi impianti a concentrazione hanno la possibilità di alimentare un sistema di accumulo termico per coprire in modo più soddisfacente la domanda di energia dell'utenza.

Il sistema a torre ha dimostrato la sua fattibilità tecnologica nella produzione di energia elettrica attraverso la realizzazione e l'esercizio di numerosi impianti sperimentali di piccola taglia (tra 0.5 e 10[MW]) in diversi paesi del Mondo (Spagna, Italia, Giappone, Francia, Stati Uniti); per applicazioni su larga scala necessita tuttavia di ulteriori verifiche.

La più recente applicazione di questa tecnologia ha riguardato l'impianto americano Solar Two, rimasto in esercizio fino all'aprile 1999.

### 1.6.3 Collettore parabolico lineare

Il sistema parabolico lineare (SEGS) è attualmente la tecnologia solare termica più matura.

I collettori parabolici concentrano la radiazione su ricevitori tubolari posti sopra di essi, dove un fluido è riscaldato a circa 450[°C] dal trasferimento termico e usato per produrre vapore surriscaldato.

I pannelli riflettenti e le strutture di sostegno giocano un ruolo significativo nel determinare l'efficienza globale dell'impianto. Questi sistemi devono convogliare la maggiore quantità di energia incidente sopra tubi posti nel fuoco della parabola, formata dagli specchi stessi, come si vede in *figura 1.10*. Per raggiungere questo obiettivo è necessario un basso livello di deformazione della struttura (specchi e supporti), come conseguenza dei carichi dovuti al peso proprio e al vento nelle condizioni operative.

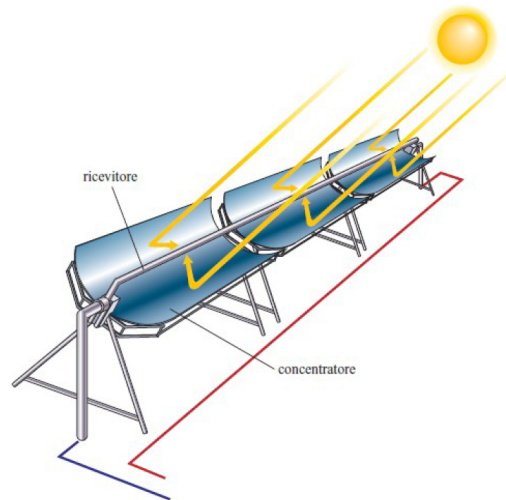


Figura 1.10: *Collettore parabolico lineare*

Impianti a concentratori parabolici lineari hanno dimostrato la loro convenienza commerciale infatti dopo un aggressivo piano di ricerca e sviluppo finalizzato a migliorare i diversi componenti si è ottenuto un ingente abbassamento del costo dell'elettricità prodotta.

Il progetto "Archimede" sviluppato dall'ENEA (Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente) prevede l'impiego di questa tecnologia.

Lo schema dell'impianto è riportato in *figura 1.11*.

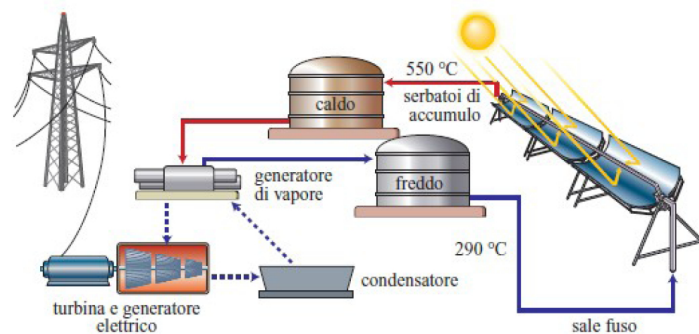


Figura 1.11: *Schema di funzionamento impianto ENEA*

Il fluido termovettore opportunamente studiato per questo impianto è costituito da sali fusi. Questi sali, composti da una miscela di nitrati di sodio e

di potassio, sono prelevati dal serbatoio a più bassa temperatura ( $290[^\circ\text{C}]$ ); vengono fatti circolare nei ricevitori delle stringhe di collettori solari, si riscaldano fino a circa  $550[^\circ\text{C}]$  e vengono inviati al serbatoio ad alta temperatura, a costituire l'accumulo termico. I sali fusi provenienti dal serbatoio caldo sono poi mandati in uno scambiatore di calore per la produzione di vapore, utilizzato dal sistema di generazione elettrica, e quindi reimmessi nel serbatoio freddo.

La temperatura di esercizio dell'impianto viene controllata regolando opportunamente la portata dei sali nelle stringhe di collettori in funzione dell'intensità della radiazione solare.

Poiché la miscela di sali inizia a solidificare a una temperatura di circa  $240[^\circ\text{C}]$ , è necessario che la temperatura minima di esercizio dell'impianto sia mantenuta, con un adeguato margine, al di sopra di tale valore per evitare ostruzioni nei circuiti.

Le alte temperature di esercizio che può raggiungere il fluido termovettore, qualità peculiare del progetto dell'ENEA, consentono un'agevole integrazione di questo impianto solare con gli impianti termoelettrici a combustibili fossili, inclusi i più moderni a ciclo combinato, ottenendo in tal modo i più alti rendimenti finali di conversione.

#### 1.6.4 Sistema Fresnel

Un'evoluzione del collettore parabolico lineare è rappresentata dal collettore lineare Fresnel di *figura 1.12*, dove il concentratore è sostituito da segmenti di specchi parabolici disposti secondo il principio della lente di Fresnel.

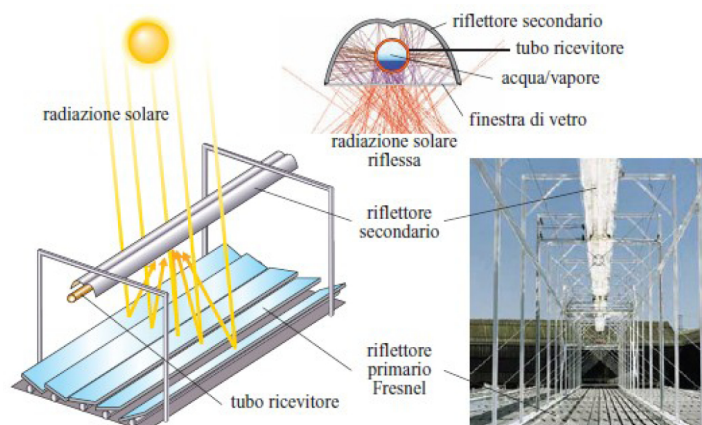


Figura 1.12: *Il sistema Fresnel*

In questo caso il tubo ricevitore è posizionato nel punto focale ed è fisso; a differenza del collettore parabolico lineare, la movimentazione riguarda quindi solo il concentratore. Ciò rappresenta un vantaggio in quanto, per far circolare il fluido termovettore, si evita l'utilizzo di tubi flessibili nel collegamento tra i singoli collettori e tra questi e le tubazioni della rete di distribuzione. Inoltre, non essendo presente l'effetto ombra tra concentratori vicini, non è necessario distanziare le file di collettori, ottenendo così un migliore sfruttamento della radiazione che arriva sul terreno.

Normalmente tale tipo di impianti utilizza l'acqua come fluido termovettore, con produzione diretta di vapore all'interno del tubo ricevitore.

## 1.7 Conclusioni

La *figura 1.13* mostra i principali parametri tecnici delle filiere tecnologiche precedentemente descritte. I dati riportati sono stati ricavati dall'esercizio di impianti esistenti (collettore parabolico lineare e disco parabolico) o da proiezioni sulla base delle prestazioni ottenute in impianti dimostrativi di piccola taglia.

	POTENZA (MW <sub>e</sub> )	FATTORE DI CONCENTRAZIONE	EFFICIENZA SOLARE DI PICCO <sup>2</sup> (%)	EFFICIENZA SOLARE MEDIA ANNUA <sup>2</sup> (%)	RENDIMENTO CICLO TERMODYNAMICO (%)	FATTORE DI CARICO <sup>3</sup> (%)	SUPERFICIE OCCUPATA, m <sup>2</sup> /(MWh/a)
Parabolico lineare	10-200	70-80 <sup>4</sup>	21	10-15 17-18 <sup>1</sup>	30-40 TV	24 25-70 <sup>1</sup>	6-8
Fresnel	10-200	25-100 <sup>4</sup>	20 <sup>1</sup>	9-11 <sup>1</sup>	30-40 TV	25-70 <sup>1</sup>	4-6
Torre solare	10-150	300-1.000	20 35 <sup>1</sup>	8-10 15-25 <sup>1</sup>	30-40 TV 45-55 CC	25-70 <sup>1</sup>	8-12
Disco parabolico	0,01-0,04	1.000-3.000	29	16-18 18-23 <sup>1</sup>	30-40 MS 20-30 TG	25 <sup>1</sup>	8-12

<sup>1</sup> Dato stimato

<sup>2</sup> Efficienza solare = produzione elettrica netta/radiazione solare diretta normale

<sup>3</sup> Fattore di carico = ore di funzionamento impianto solare/8.760 ore annue

<sup>4</sup> Fattore di concentrazione riferito al diametro del ricevitore

TV, Turbina a Vapore; CC, Ciclo Combinato; MS, Motore Stirling; TG, Turbina a Gas

Figura 1.13: *Principali parametri degli impianti solari a concentrazione*

# Capitolo 2

## Impianti a collettori lineari di Fresnel

Il seguente capitolo ha come scopo principale la descrizione di un impianto a collettori lineari di Fresnel. Durante la stesura verranno prese in esame alcune note storiche riguardanti questi impianti solari. Successivamente si procederà con la descrizione delle varie parti che compongono un sistema di questo genere e verso la fine si analizzerà brevemente la movimentazione del riflettore primario dal punto di vista della scelta dell'algoritmo d'inseguimento del Sole maggiormente idoneo allo scopo del lavoro eseguito.

### 2.1 Note storiche

I principi su cui si basa il funzionamento di un tale impianto presero spunto, come precedentemente descritto, dalle idee del prof. Giovanni Francia (1911-1980), il quale divenne noto a livello mondiale come il “padre” delle centrali solari termoelettriche[5]. Dopo 200 anni di predominanza dell'energia prodotta da petrolio e gas, l'idea di Francia fu quella di riuscire a raccogliere l'energia solare in modo da ottenere le temperature necessarie a far funzionare macchine e impianti delle società tecnologicamente e industrialmente avanzate, a partire da quelli per la produzione di energia elettrica. L'energia solare era abbandonante ma a bassa densità e bassa temperatura quindi il problema era quello di realizzare strutture per focalizzare la luce solare. Riuscì a dimostrare per la prima volta al mondo che era possibile produrre con il calore del Sole vapore ad alte pressioni e ad alte temperature in sistemi a concentrazione lineare di tipo Fresnel. Francia condusse le sue sperimentazioni negli impianti di Marsiglia (1964) e in Italia, S. Ilario (1965) (come si vede in *figura 2.1*) ed i risultati ottenuti ispirarono Francia a progettare grandi centrali solari inserite in contesti urbani. Inoltre introdusse geniali e rivoluzionarie invenzioni

negli impianti solari a concentrazione lineare e a concentrazione con ricevitore puntuale o centrale, rispetto a come questi erano stati concepiti fino ad allora. Le invenzioni furono relative sia all'architettura generale di apposite componentistiche, dai cinematismi degli specchi per l'inseguimento del Sole all'uso delle celle anti-irraggianti o a nido d'ape nella costruzione di ricevitori o caldaie, particolari di grandissimo rilievo quest'ultimi che sono stati oggi rimpiazzati con efficienti superfici selettive, capaci di assorbire al massimo e riflettere al minimo la radiazione solare su di loro concentrata dagli specchi. Successivamente il suo lavoro fu portato avanti da David Mills, presso l'università di Sidney e commercializzato in Australia dalla Solar Heat and Power Pty Ltd, che pose le basi per la realizzazioni di impianti di grande potenza di tale tipo, sinteticamente indicati con l'acronimo CLFR (Compact Linear Fresnel Reflector)[6]. Nella sua versione attuale consentirebbe di realizzare a basso costo grandi impianti solari dell'ordine delle centinaia di  $[MW]$  da ubicare in quelle zone del mondo dove la radiazione solare diretta è molto abbondante. Le caratteristiche di semplicità ed economicità delle tecnologie proposte da Mills convinsero due investitori, Vinod Khosla e Ray Lane, entrambi partner della potente società di ventur capital Kleiner Perkins Caufield & Byers a finanziare inizialmente, nel 2007, con 40 milioni di dollari di capitale di rischio la fondazione Ausra, in Nevada, determinandone così l'avvio e il rapido sviluppo delle attività.

Tuttavia le principali applicazioni in cui troviamo questi impianti al giorno d'oggi non sono quelle della distribuzione energetica su larga scala bensì quelle del cosiddetto raffreddamento solare (solar cooling), ovvero impianti di bassa potenza su tetti di grandi palazzi per l'esclusiva produzione di aria condizionata oppure per il raffreddamento in alcune applicazioni industriali. Un'altra applicazione comune di tali tecnologie è quella in cui sono impiegate in simbiosi con caldaie tradizionali a combustibili fossili che forniscono la necessaria integrazione di calore al fluido.

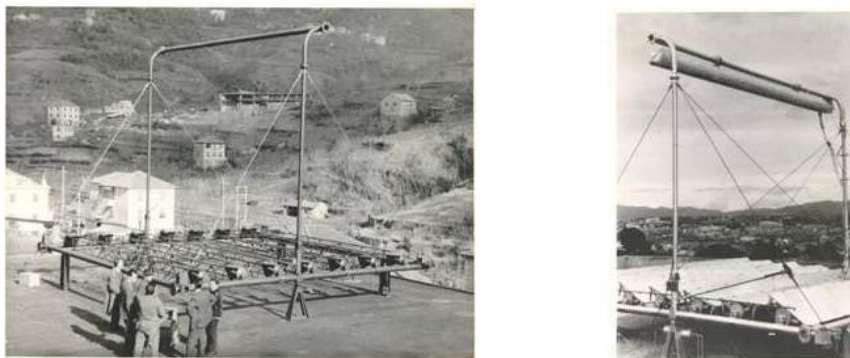


Figura 2.1: *I primi prototipi*



## 2.2 Principi di funzionamento

La peculiarità di un impianto CSP (Concentrated Solar Power) o impianto di tipo Fresnel è la sua semplicità concettuale che rende possibile una scomposizione in moduli replicabili della struttura, dove con modulo si intende una matrice di specchi che costituisce l'impianto elementare di Fresnel sia da un punto di vista geometrico che di movimentazione. Un elevato numero di moduli posti sul terreno riflettono e concentrano i raggi solari su di un tubo ricevitore stazionario posto ad alcuni metri di altezza da terra. A ridosso di tale tubo è posizionato uno specchio riflettente secondario il cui scopo è quello di raccogliere e riconcentrare i raggi di luce riflessa dispersi dalla superficie primaria. Questa dispersione può essere causata da uno sfuocamento accidentale degli specchi, ma una componente della radiazione è comunque sistematicamente fuori fuoco a causa della rotazione degli specchi; questo aspetto verrà approfondito in seguito. L'insieme del tubo ricevitore e della superficie secondaria è denominato CPC (Compound Parabolic Concentrator).

Il principio che sta alla base dell'impianto, ben visibile in figura, è quello della lente di Fresnel, in quanto ricorda il procedimento che condusse il fisico Augustin-Jean Fresnel a inventare la lente che porta il suo nome, ottenuta "frazionando" una lente sferica in una serie di sezioni anulari concentriche[7], chiamate anelli di "Fresnel" permettendo in tal modo un minor dispendio di materiali. Infatti la necessità di soli specchi piani riduce i costi rispetto alla produzione ed all'impiego di geometrie più complesse e permette una più semplice movimentazione del sistema. Per tale motivo questa tipologia di impianti porta il nome di "lineare". Inoltre più specchi si usano, più ci si avvicina al caso continuo di una parabola. Il principio sopra citato è determinante per portare il fluido di lavoro ad alte temperature, condizione necessaria per ottenere un rendimento elevato nella trasformazione da energia solare ad energia elettrica.

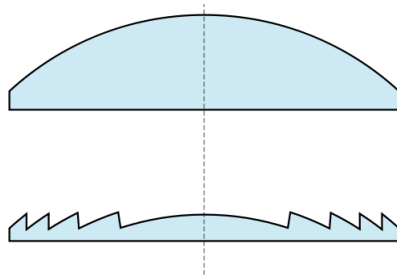


Figura 2.2: *Lente equivalente Fresneliana*

## 2.3 Descrizione generale di un concentratore lineare di Fresnel

In un concentratore lineare di Fresnel[8] la radiazione solare è concentrata in un tubo assorbitore lineare, non solidale con gli specchi, utilizzando file di specchi quasi piani che vengono movimentati in remoto partendo da angoli di posizionamento diversi per ogni fila. Per evitare il fenomeno di dispersione della luce riflessa dalla superficie primaria, una superficie secondaria viene posta al di sopra del tubo assorbitore per riconcentrare i raggi.

Il tubo assorbitore è alimentato ad acqua che si riscalda ed evapora producendo vapore che viene inviato in una turbina per la produzione diretta di energia. L'uso di temperature non troppo spinte limita anche le perdite di calore e pertanto aumenta l'efficienza del sistema.

Dell'impianto solare descritto i sottosistemi principali risultano essere i seguenti:

- sistema di inseguimento solare;
- struttura portante;
- sistemi di riflessione primario;
- il tubo ricevitore;
- sistema di assorbimento.

### 2.3.1 Sistema di inseguimento solare

Un'analisi da letteratura dei differenti metodi di inseguimento del Sole rileva che esistono algoritmi basati su dati astronomici capaci di stabilire gli angoli caratteristici della posizione del Sole nel cielo con incertezze inferiori a  $0.0003^\circ$ .

Di fondamentale importanza risultano essere gli studi effettuati per la valutazione dell'accuratezza di tali algoritmi in situazioni reali che in caso negativo hanno portato a considerare l'integrazione di un sistema automatico di inseguimento basato su opportuna sensoristica[9].

Come precedentemente menzionato, nel collettore di Fresnel gli specchi possono essere assimilati ad una parabola schiacciata e sezionata per cui un numero elevato di specchi va orientato per poter inseguire il movimento solare. Per quanto riguarda la movimentazione degli specchi di un impianto Fresnel, essa differisce molto rispetto a quella dei sistemi a collettori parabolici lineari e da uno studio dell'arte su queste tecnologie, sono state individuate due possibili opzioni:

- un motore per fila di specchi;
- uno o due motori per modulo.

Nel primo caso con la tipologia di tracking scelta si è stimato di poter movimentare tra i 20-30 specchi in serie con una maggiore semplicità e precisione del sistema di puntamento del singolo specchio, ma al contempo con costi decisamente più elevati ed un sistema di controllo più complesso.

Nel secondo caso la trasmissione del moto tra le varie file di specchi può avvenire tramite un sistema di ruote dentate/vite senza fine comandata da attuatore rotativo oppure con un'asta rigida (o tiranti) che collega i vari specchi comandata da attuatori lineari. Un altro tipo di trasmissione presente in letteratura è una configurazione con cremagliera comandata da un attuatore lineare. Con tali tipologie di tracking si stima di poter movimentare tra i 30-40 specchi con notevoli vantaggi sulla semplicità del controllo e l'economicità a discapito della propagazione degli errori di tracking sulle file di specchi più esterne.

Il movimento degli specchi, in entrambi i casi, segue lo stesso angolo di rotazione per tutti gli specchi per cui in linea di principio questi possono tutti essere collegati con un sistema di leve movimentato da un unico motore. Tuttavia le tolleranze sugli accoppiamenti devono essere tali da non compromettere gli angoli di riflessione degli specchi.

Il sistema di controllo deve essere calibrato per adoperare un singolo controllore per un singolo motore o un controllore unico per tutti i motori.

Per quanto riguarda la scelta dei motori da utilizzare risulta essere un fattore importante la gestione temporale dell'inseguimento. Due sono le possibili tipologie:

- inseguimento continuo: in cui la posizione del Sole viene assiduamente monitorata, con il sistema d'inseguimento sempre in funzione;
- inseguimento per step temporali: rispetto al caso precedente la posizione del Sole viene monitorata in modo discreto, con il sistema d'inseguimento che si muove in modo incrementale.

Le tolleranze sugli elementi che costituiscono la struttura di sostegno degli specchi e la precisione del sistema di tracking deve essere tale da poter garantire errori di puntamento piccoli, caratterizzati da  $\sigma_{tracking} < 3[mrad]$ . E' possibile utilizzare sensori di posizione e/o inclinazione per correggere in retroazione l'errore sull'angolo di tracking. Inoltre anche la struttura di sostegno del CPC e del tubo ricevitore non devono generare errori eccessivi sul posizionamento del tubo rispetto alla sua posizione normale, con  $\sigma_{ricevitore} < 2[mrad]$ . In questa ambito è di particolare interesse il software di puntamento che deve essere estremamente preciso e accurato. L'efficienza del sistema risente molto dell'accuratezza del sistema di puntamento e variazioni di angolo superiori a 0.2 gradi comportano cali di efficienza di qualche punto percentuale.

### 2.3.2 Struttura portante

I sistemi di riflessione e il sistema di assorbimento sono tenuti assieme da una struttura meccanica rigida ma leggera al fine di rendere molto più agevole la movimentazione degli specchi che su questa vengono montati. Per cui la struttura che regge gli specchi e il materiale che lo compone devono rispettare certe caratteristiche meccaniche e di stabilità termica-chimica.

Le strutture utilizzate[10] per sostenere il pannello, analizzate per assicurare competitività economica e prestazionale, risultano essere:

- la struttura Doluflex: un pannello strutturale a sandwich, la cui peculiare caratteristica costruttiva ne consente una facile sagomabilità, il quale possiede elevate caratteristiche di rigidità, planarità, leggerezza, economicità e riciclabilità ;
- cassa di supporto con lamiere piegate: realizzata con una struttura esterna a cassa, da cui ne deriva il nome, che permette di aumentare la resistenza alla deformazione dei riflettori primari;
- struttura a traliccio sostenuta longitudinalmente da un profilato centrale: un sistema strutturale composto da elementi progettati per resistere puramente a carichi assiali in modo tale da ottenere globalmente una struttura efficiente, vale a dire più leggera a parità di rigidità rispetto ad una struttura in grado di sopportare momenti.

In figura *figura 2.3* sono riportati alcuni esempi di strutture di sostegno del pannello.



Figura 2.3: *Strutture di sostegno del pannello: (a) cassa di supporto con lamiere piegate, (b) struttura a traliccio*

La movimentazione del pannello Doluflex sul telaio[11] è ottenuta attraverso la rotazione di perni (o alberi) su corpi volventi che possono essere ad esempio rotelle in plastica o cuscinetti. I perni o alberi sono fissati al pannello per mezzo di flange o angolari in posizione baricentrica rispetto all'asse di rotazione.

La struttura di sostegno del CPC prevede un sistema di montanti e traverse, opportunamente sostenuti da tiranti, che hanno come funzione quella di sorreggere il peso del componente (CPC+tubo+fluido) e sopportare i carichi di vento e neve. Inoltre non sono da trascurare le dilatazioni termiche che gli elementi longitudinali subiscono a causa delle temperature d'esercizio ed esterne.

Negli impianti analizzati in letteratura le soluzioni solitamente utilizzate per il collegamento del tubo ricevitore con il CPC[10] sono:

- lucchetto o cavetto d'acciaio, che ancorato alla struttura portante sostiene dall'alto il tubo all'interno del CPC (*figura 2.4(a)*);
- appoggi dal basso direttamente sul montante per sorreggere il tubo all'interno del CPC (*figura 2.4(b)*).

La *figura 2.4* mostra due diverse tipologie di collegamento CPC-tubo ricevitore.

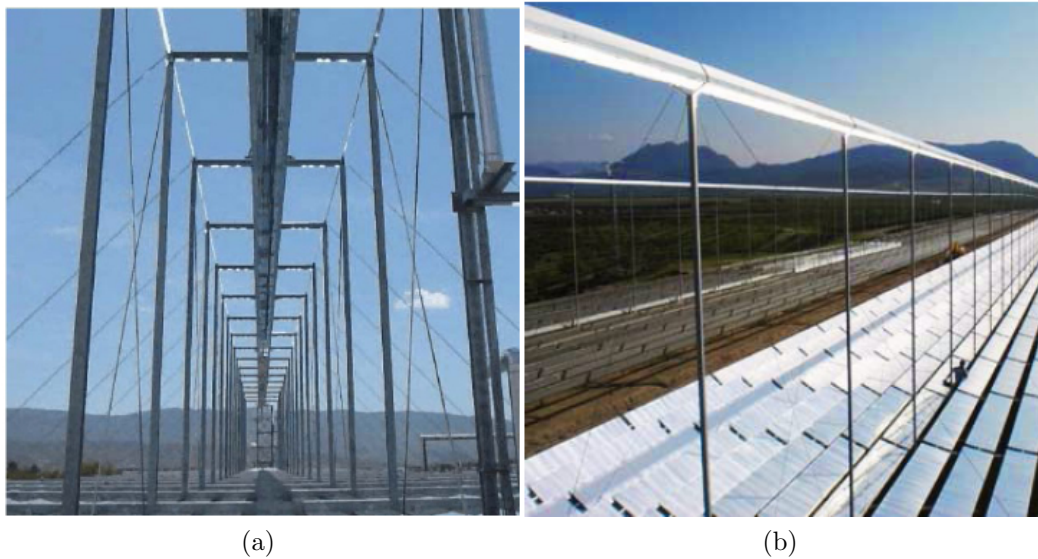


Figura 2.4: *Due diverse tipologie di struttura portante: (a) con lucchetto, (b) con appoggio dal basso*

### 2.3.3 Sistema di riflessione primario

Il sistema di riflessione primario è composto da specchi quasi piani, ma leggermente curvati[12], disposti parallelamente su un piano. Una leggera curvatura,

riprodotta nel momento in cui la superficie riflettente viene incollata alla sua struttura di supporto, risulta necessaria per orientare i raggi riflessi su un fuoco (assorbitore) posto a qualche metro di altezza dagli specchi. Gli specchi hanno dimensioni che variano da 0.5-1.5 metri di larghezza e da 1-5 metri di lunghezza e vengono disposti sulle strutture precedentemente descritte che vengono disposte in combinazioni di serie e parallelo a creare dei moduli. La distanza tra due file di specchi paralleli è molto bassa (circa il 25% delle dimensioni dello specchio) e pertanto consente di avere una copertura del piano fino al 75%.

Dato che l'efficienza dell'impianto dipende molto dall'efficienza della riflessione, la precisione sulla curvatura dello specchio, nonché la sua riflessività, devono essere alte non solo durante la fase di realizzazione ma anche durante tutta la vita dello specchio. Non esiste un'unica soluzione tecnologica percorribile per quanto riguarda la realizzazione della superficie riflettente dei pannelli primari. La tecnologia di realizzazione degli specchi ad oggi prevede l'utilizzo di superfici argentate protette da vetri con spessori che vanno dai 3-5 millimetri (che hanno anche funzione strutturale) e da vernici multistrato che si applicano sul back dello strato riflettente per proteggerlo dall'effetto degli agenti esterni che ne causano l'invecchiamento e la perdita di prestazione nel tempo. Questa soluzione non è ad oggi economica e porta con se innumerevoli problematiche legate al peso e alla fragilità degli specchi. Una valida alternativa agli specchi convenzionali nelle applicazioni CSP è rappresentata dalle superfici riflettenti di alluminio, nella misura in cui riescano a garantire valori di riflettanza speculare comparabili, cioè pari ad almeno il 92% della radiazione solare incidente, con errori di non perfetta specularità descritti da una distribuzione normale con  $\sigma_{specularita} < 0.25[mrad]$ .

Anche in questo caso la superficie di alluminio, con spessore al di sotto di 1 millimetro, va supportata per conferire stabilità meccanica e va protetta superficialmente per evitare che gli agenti esterni vadano ad ossidarla nel tempo. Il vantaggio di tale situazione è legato alla facilità di realizzazione e lavorazione del materiale che si presta bene ad ottenere alte precisioni di curvatura. Vanno tuttavia risolti i problemi legati all'erosione del materiale nel tempo legata alle polveri sottili che nel tempo graffiano le superfici. La tendenza sarà pertanto di ridurre lo spessore e di conseguenza il peso dello strato di vetro (con basso contenuto di ferro per aumentarne la riflessività) utilizzando strutture portanti di alluminio che seguono il profilo geometrico studiato per lo specchio, su cui viene incollato il vetro. Anche le vernici adesive nonché i substrati protettivi della superficie argentata vanno sviluppati con cura al fine di evitare degradi nel tempo, delaminazioni del vetro e riduzione delle prestazioni.

Il fatto che a sua volta ogni specchio offra un grande raggio di curvatura che

permette di focalizzare ancora di più la radiazione è un effetto secondario che esula dagli scopi di questo lavoro. In generale negli impianti lineari non accade di avere una focale per ogni singolo specchio quindi, senza perdita di generalità, gli specchi saranno considerati piani.

Partendo dal suddetto caso in cui è stata considerata una superficie parabolica, è possibile affermare che data una radiazione incidente perpendicolarmente all'asse di simmetria dello specchio (asse ottico), esiste una focale ovvero un punto dove ogni raggio è convogliato. Il punto in questione dovrà coincidere con la posizione del tubo ricevitore e questo è il caso che precedentemente incontrato del collettore parabolico, dove la movimentazione rende possibile avere sempre i raggi solari paralleli all'asse ottico ed aver quindi una focale. Per garantire un'adeguata "focalizzazione" e soddisfare gli elevati standard di precisione richiesti al sistema di tracking su tutte le file di specchi, la larghezza laterale di un modulo non dovrà eccedere i  $21[m]$  lineari ( $= n^{\circ}specchi \cdot larghezza\_specchio + n^{\circ}gap \cdot larghezza\_gap$ ). Inoltre, la lunghezza di un singolo specchio non deve generare valori di freccia eccessivi che inficino il comportamento ottico e gravino eccessivamente sui motori e sul sistema di accoppiamento[13].

Al fine di evitare che le perdite di efficienza dovute ad una cattiva conformità della morfologia del pannello riflettente (sup.riflettente+supporto) siano eccessive, la precisione minima tollerabile sulla forma della superficie riflettente rispetto a quella teorica è di  $\sigma_{morfologia} = 2.5[mrad]$ [14].

### 2.3.4 Il tubo ricevitore

Il tubo assorbitore è tipicamente un tubo in acciaio rivestito con un coating termoassorbente di spessore inferiore ai 100 micron, che deve resistere alla temperatura di esercizio, pari a circa  $280 - 350[^{\circ}C]$  e non subire un eccessivo degrado delle sue proprietà anche in situazioni di criticità con temperature fino a  $400[^{\circ}C]$ .

Il coating selettivo riveste un ruolo importante sia in termini di prestazioni che di stabilità alla temperatura e alle ossidazioni esterne. L'utilizzo di tubi assorbitori mantenuti in atmosfere controllate o in vuoto spinto ( $p \sim 10^{-3}[mbar]$ ) attraverso l'utilizzo di un tubo di vetro secondario e coassiale saldato con l'acciaio alle estremità, risolverebbe le problematiche di stabilità dei materiali alle elevate temperature, ma comporterebbe allo stesso tempo una maggiore onerosità del sistema e notevoli complicazioni realizzative. Il vuoto infatti limita la degradazione del coating alle temperature in gioco (maggiori di  $380[^{\circ}C]$  nel caso di collettori parabolici) e inoltre induce l'effetto di scambio convettivo che è più alto quanto maggiore è la temperatura di funzionamento.

Il tubo presenta inoltre dilatazioni termiche che vanno rese compatibili con

quelle del vetro attraverso dei giunti sigillati e saldati. Eventuali rotture del tubo esterno potrebbero provocare effetti di degrado accelerati, per cui richiederebbero fermi impianto con tutte le conseguenze che da questi ne derivano. Esistono anche soluzioni con vuoto non spinto o addirittura in presenza d'aria. Nel primo caso sarà necessario incamiciare opportunamente il tubo ricevitore con un tubo coassiale di vetro ad elevata trasmittanza in modo tale da isolare il tubo ricevitore dal CPC evitando il degrado della superficie riflettente nel caso in cui i materiali non resistano alle temperature d'esercizio. In entrambe le situazioni risulta importante studiare il gap ottimale che deve separare la "cuspid" del CPC dalla superficie del tubo in modo da bilanciare le perdite termiche e quelle ottiche, nonchè per rendere realizzabile dal punto di vista costruttivo l'elemento CPC+tubo. La distanza risulta essere di circa  $20 - 40[mm]$ .

Per quanto riguarda i coating selettivi, questi devono assorbire efficientemente l'energia solare concentrata dagli specchi primari ed essere caratterizzati da bassa emissività nell'infrarosso.

Considerando che il fluido termovettore circolante nel ricevitore è formato da acqua allo stato liquido e vapore, nel range di temperature  $270 - 320[^\circ C]$ , le pressioni in gioco che il tubo deve sopportare si aggirano tra  $50 - 110[bar]$ . Nel caso di acqua e vapore il fluido bifase ha un coefficiente di scambio termico più basso rispetto a un olio diatermico ed inoltre sottopone il tubo a pressioni più alte. Inoltre il vapore che si genera all'interno del tubo rende più sensibile il tubo a variazioni di temperatura e gradienti termici locali che stressano il coating. Queste considerazioni incidono sulla scelta dello spessore da utilizzare.

Per ottenere rapporti di concentrazione elevati, in modo tale da minimizzare le perdite termiche del ricevitore, il diametro del tubo risulterà essere nel range tra  $70 - 90[mm]$ [15]. Le dimensioni determinate comportano un peso del sistema tubo+acqua di circa  $9 - 10[kg/m]$  per il diametro di  $70[mm]$  e  $13 - 14[kg/m]$  per  $90[mm]$ .

### 2.3.5 Sistema di assorbimento

Il sistema di assorbimento è costituito da una superficie riflettente secondaria che rifocalizza i raggi solari riflessi dagli specchi primari sul tubo assorbitore, come mostrato in *figura 2.5*, all'interno del quale scorre il fluido termovettore che si surriscalda per effetto dello scambio termico.



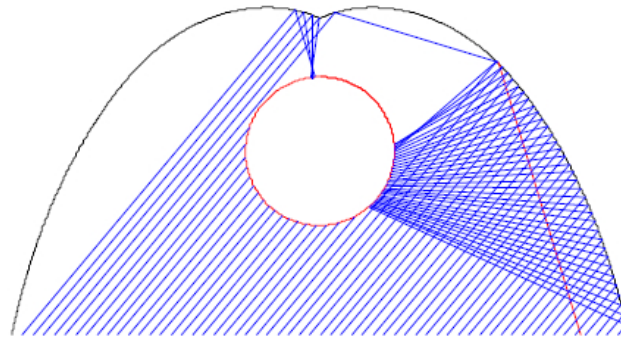


Figura 2.5: Rifocalizzazione dei raggi solari sul tubo ricevitore

Aumentando l'apertura della superficie riflettente secondaria o CPC (compound parabolic concentrator) è quindi possibile recuperare parte dell'energia ottica, che a causa della non perfetta focalizzazione della tecnologia Fresnel e delle imprecisioni del sistema di puntamento degli specchi primari, non andrebbe ad incidere sul tubo assorbitore. Sembrerebbe quindi vantaggioso aumentare il più possibile l'apertura del CPC in modo da rifocalizzare la maggior quantità di raggi possibile sul ricevitore. Tuttavia la dimensione dell'apertura del CPC e quella del diametro del tubo sono legate tra loro da leggi geometriche. Maggiore è l'apertura del CPC, maggiore è il diametro del tubo ricevitore e la sua superficie di scambio, con conseguente incremento delle perdite termiche. Un range ammissibile di apertura del CPC è  $300 - 500[mm]$  che corrisponde ad uno sviluppo lineare di  $650 - 1100[mm]$ .

Tra i materiali oggi adottati per la realizzazione del CPC ci sono le superfici di alluminio oppure superfici di vetro rese altamente riflettenti grazie all'applicazione di opportuni coating che permettono di raggiungere target di riflettenza emisferica elevati. Bisogna tuttavia valutare la stabilità di questi materiali alle elevate temperature di esercizio a cui viene sottoposto il collettore secondario, che possono raggiungere picchi fino a  $300[^\circ C]$ [11].

La superficie riflettente secondaria, che utilizza i materiali descritti in precedenza, è soggetta a stress termici molto elevati considerato che la sua temperatura è molto vicina a quella del tubo ricevitore (se non si usa il vuoto attorno al tubo). Lo stress termico provoca deformazioni nella struttura e ne modifica le proprietà nel tempo. La scelta dei materiali, della forma e delle temperature di esercizio pertanto è importante al fine di preservare le prestazioni.

Per ottimizzare l'efficienza termica dell'impianto ed evitare che le perdite per irraggiamento e convezione siano eccessive è necessario isolare la superficie esterna del CPC con un opportuno spessore di materiale isolante come

mostrato nella seguente figura.

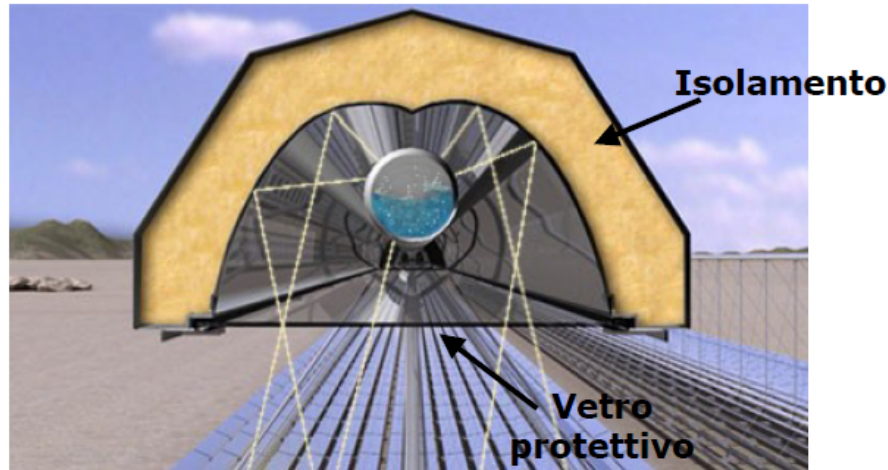


Figura 2.6: *Struttura del CPC*

La conformità morfologica della superficie del collettore secondario rispetto alla sua forma ideale deve tenere conto delle dilatazioni termiche a cui sono soggetti gli elementi riflettenti per via delle temperature d'esercizio. La precisione morfologica deve essere paragonabile a quella delle superfici primarie ( $\sigma_{morfologia} = 2.5[mrad]$ )[14].

### 2.3.6 Vantaggi e svantaggi della tecnologia Fresnel

Un impianto CLFR presenta diversi vantaggi[16][17] rispetto agli altri impianti solari termoelettrici a concentrazione. Innanzitutto il CLFR consta di componenti e sistemi (i lunghi specchi, i relativi sostegni per l'inseguimento del Sole, le torri di sostegno del ricevitore ecc.) low-tech, fabbricati localmente con materiali facilmente reperibili (acciaio, cemento, vetro) e componenti altamente sofisticati (elettronica di controllo, componentistica del ricevitore, dalle lenti di Fresnel alle superfici selettive) fabbricati con produzioni di massa.

Le dimensioni standard con cui vengono prodotti industrialmente le lastre di vetro o i "rotoli" di alluminio possono costituire un fattore di valutazione economica (minimizzazione degli sfridi) sulla scelta della geometria della superficie primaria da adottare.

In altre parole si hanno bassi costi strutturali dovuti alla relativamente semplice geometria del sistema, un migliore sfruttamento dei principi ottici degli specchi e minori costi di manutenzione a pari performance rispetto alle altre tecnologie solari.

Osservando un CLFR ed un concentratore parabolico lineare è possibile effettuare una serie di considerazioni[6]. E' più semplice costruire più specchi quasi piani, anziché un grande specchio curvo: poiché gli specchi piani sono meno esposti alla forza del vento rispetto ai grandi paraboloidi curvi, la relativa struttura di sostegno è più semplice da realizzare e, a parità dell'area degli specchi di raccolta della radiazione solare, il suo peso può essere anche solo il 30 per cento di quello della struttura di sostegno di un campo di specchi paraboloidi con evidenti riflessi sul suo costo. I paraboloidi curvi, per giunta, devono inseguire il Sole muovendosi solidalmente con il ricevitore con una serie di conseguenti implicazioni di carattere costruttivo sullo stesso, per esempio sulle sue dimensioni, necessariamente limitate. In un impianto a collettori lineari di Fresnel, come precedentemente descritto, il collettore risulta essere non solidale con gli specchi, questo permette di non adottare giunti elastici collegati ai tubi che si muovono, come accade nei collettori parabolici, rendendo il sistema più affidabile e semplificando la movimentazione del sistema cioè permettendo una più semplice realizzazione degli specchi e riducendone i costi. Questo abbattimento dei costi è importante perché per avvicinarsi al caso continuo di una parabola è necessario un elevato numero di riflettori primari.

Rispetto agli impianti parabolici, in un CLFR si ha un migliore sfruttamento del terreno in quanto è sufficiente un piccolo gap tra gli specchi per minimizzare gli ombreggiamenti. L'efficienza di sfruttamento del terreno per un singolo modulo si aggira attorno al 60-75%, mentre si riduce circa al 50% nel caso di due stringhe affiancate.

Nei CLFR il ricevitore, come visto in precedenza, è un componente fisso ed indipendente rispetto al movimento degli specchi. In tale modo la radiazione solare concentrata sul ricevitore produce vapore acqueo con caratteristiche tali da poter essere estratto e inviato per azionare direttamente la turbina, che a sua volta aziona un generatore elettrico. Pertanto nell'impianto non è necessario un secondo fluido di lavoro, al quale trasferire il calore tramite uno scambiatore, come avviene nelle tradizionali centrali elettriche. L'unico fluido di lavoro è l'acqua/vapore, che, sotto pressione, consente anche l'immagazzinamento del calore per quando non c'è il Sole. Inoltre il vapore che si genera all'interno del ricevitore, a mano a mano che l'acqua si scalda, si raccoglie nella sua parte superiore. Questo facilita l'estrazione del vapore. A parità di superficie degli specchi che captano la radiazione solare, un campo a concentrazione lineare di Fresnel occupa metà della superficie richiesta da un impianto con dei grandi paraboloidi. Quest'ultimi devono essere opportunamente distanziati l'uno dall'altro per evitare il reciproco ombreggiamento. I principali svantaggi della tecnologia Fresnel[18] sono legati alle perdite geometriche di tali impianti e sono molto bene rappresentati nella seguente figura.

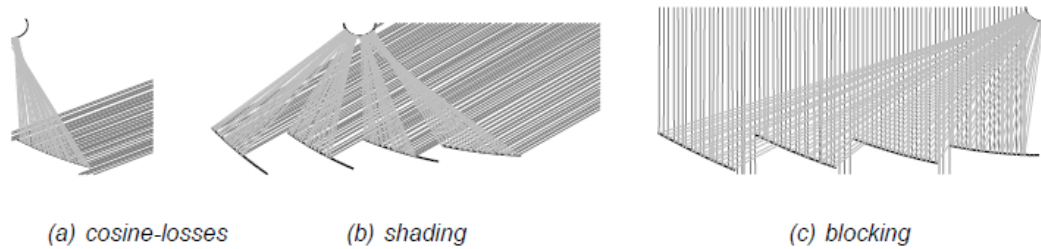


Figura 2.7: Perdite dovute alla geometria dei concentratori lineari di Fresnel

Una prima causa d'errore è dovuta all'effetto coseno che rappresenta la differenza tra la quantità di energia proveniente dal Sole raccolta su una superficie ortogonale ai raggi solari e quella raccolta su una superficie inclinata rispetto ai raggi solari. Per ovviare a questo errore, supposto che tutti gli specchi si trovino su una superficie piana, e quindi siano tutti alla stessa altezza, ed ordinati in file consecutive, si può dimostrare che la disposizione ottimale preveda file equidistanziate.

Un'altra causa d'errore è rappresentata dall'ombreggiamento che un riflettore primario genera sul precedente o successivo riflettore primario a seconda dell'ora durante la giornata. Infatti, una piccola parte del riflettore primario non riesce a captare i raggi solari provenienti dal Sole perché ombreggiato da un altro riflettore primario e questo comporta uno spreco di materiale per lo specchio perché la parte in ombra non apporta riflessione dei raggi solari sul CPC. Nel caso in cui non sia presente il fenomeno dell'ombreggiamento un ulteriore svantaggio che si può creare in un impianto CLFR è quello dell'ostacolamento. Il problema si crea durante alcuni periodi della giornata a causa del posizionamento dei riflettori primari che potrebbero riflettere la radiazione solare sulla parte posteriore del riflettore primario precedente o successivo anch'esso orientato di un certo angolo per captare la radiazione proveniente dal Sole.

Tutti i problemi sopra citati potrebbero essere drasticamente abbattuti aumentando l'assorbimento dei riflettori primari o aumentando il gap fra una fila e l'altra di riflettori primari con un aumento della superficie utilizzata per tale impianto. Variazioni alla geometria di tali impianti comporta un aumento di perdite dovute al non accurato assemblaggio e al sistema di tracking degli specchi.

Ulteriori svantaggi dei CLFR derivano dalla minor efficienza di conversione di energia solare in energia elettrica, che comporta una diminuzione del rendimento dell'impianto, a causa della peggiore caratteristica ottica del concentratore di Fresnel se paragonato con altre tipologie di impianti termodinamici.

Per limitare questo svantaggio sono stati effettuati diversi studi per agire su tali impianti in modo tale da migliorare la produzione di energia elettrica andando ad agire sugli anelli più deboli dei CLFR. In questo modo si è cercato di rendere maggiormente appetibili tali impianti all'interno del mercato dell'energia cercando di renderli competitivi rispetto agli altri impianti termodinamici dato che i CLFR soffrono di uno scarso sviluppo commerciale. Anche se risulta essere vantaggioso il fatto che il tubo ricevitore risulti non essere solidale durante la movimentazione con i riflettori primari, sorgono comunque notevoli problemi legati alla precisione sulla focalizzazione della luce sul tubo ricevitore dato che la focale risulta essere posta a circa 10[m], una distanza decisamente elevata se confrontata con la distanza della focale che presentano i dischi parabolici o i collettori parabolici.

## 2.4 Tracking solare

Molti sistemi in commercio si occupano del problema dell'inseguimento del disco solare (sun tracking) ed uno studio completo di questo problema richiederebbe un'intera tesi. Qui di seguito ci proponiamo di investigarne solamente i principali.

La tipologia d'impianto studiata utilizza un sistema di inseguimento solare monoassiale, come anche i collettori parabolici, a differenza delle centrali a disco parabolico od a torre dove la movimentazione necessita di essere guidata su due assi.

Nelle situazioni come quella in esame, ove si necessita di concentrare i raggi solari, si capisce subito come il sistema di inseguimento sia fondamentale per mantenere alta l'efficienza degli impianti e tutto ciò lo si ottiene mantenendo correttamente la riflessione del raggio incidente sul tubo ricevitore. E' per tale motivo che in questa analisi la precisione del metodo di tracking (o errore di puntamento) è un valore importante che dovrà essere il più piccolo possibile in quanto si trova in testa ad una catena che via via lo peggiorerà, ma che alla fine dovrà sempre rientrare nei limiti richiesti.

### 2.4.1 Coordinate terrestri

Il sistema di coordinate orizzontali usa l'orizzonte locale dell'osservatore come piano fondamentale. Esso divide in modo conveniente il cielo nell'emisfero superiore, visibile, e in quello inferiore, invisibile (dato che c'è la Terra di mezzo). Il polo dell'emisfero superiore è denominato *zenit*, mentre il rispettivo polo dell'emisfero inferiore è detto *nadir*. L'angolo formato tra la proiezione sul piano orizzontale dei raggi del Sole e la direzione sud prende il nome di

*azimuth* e risulta positivo se la proiezione cade ad est (mattina) e negativo viceversa.

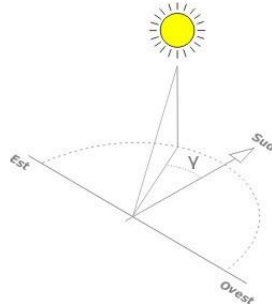


Figura 2.8: *L'azimut  $\gamma$*

L'angolo formato tra la direzione dei raggi ed il piano orizzontale su cui giace l'osservatore prende il nome di *altezza*.

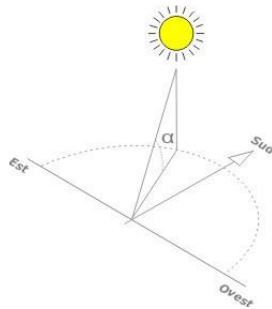


Figura 2.9: *L'altezza  $\alpha$*

Il sistema di coordinate orizzontali è noto anche come sistema di coordinate altazimutali. Il sistema di coordinate orizzontali risulta essere solidale con la Terra, non con le stelle. Perciò l'altezza e l'azimut di un oggetto cambiano col passare del tempo, col movimento apparente dell'oggetto nel cielo. Inoltre, dato che il sistema orizzontale è definito dall'orizzonte locale dell'osservatore, lo stesso oggetto visto da luoghi differenti della terra nello stesso istante avrà valori differenti di altezza e azimut. Le coordinate orizzontali sono molto utili per determinare gli istanti di levata e tramonto di un oggetto celeste.

Dal momento che la ricezione prevede la rotazione monoassiale in direzione Nord-Sud[19], si può calcolare un angolo di inclinazione degli specchi che sia una funzione dei precedenti, azimut ed altezza. Questo non è altro che l'angolo di incidenza dei raggi del Sole il quale, omettendo la dimostrazione, è legato ai precedenti dalla seguente relazione:

$$\varepsilon = \arctan \frac{\tan(\gamma)}{\sin(\alpha)}$$

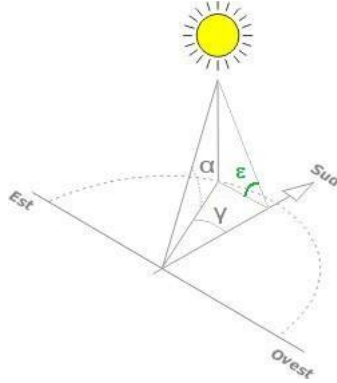


Figura 2.10: L'angolo  $\varepsilon$

Ipotizzando di considerare un solo specchio si può affermare che l'attuatore del movimento, ovvero il motore con la relativa trasmissione, si dovrà muovere secondo tale legge, osservando però che così facendo si rifletterebbero i raggi sempre verso il Sole e allora si dovrà correggere la precedente formula introducendo un fattore pari a un mezzo. La velocità di rotazione sarà quindi:

$$\omega = \frac{\dot{\varepsilon}}{2}$$

Ora, estendendo queste considerazioni a un numero qualsiasi di specchi, otterremo anche un'altro fattore importante, cioè lo sfasamento costante che esiste tra ognuno di essi. Nel caso gli specchi fossero baricentrati, secondo gli studi eseguiti in merito al problema di inseguimento di traiettoria [20], è stato dimostrato che tutti gli specchi presentano un offset iniziale caratteristico (il quale dipende da quanto il modulo dista dal CPC) e si muovono con la stessa legge di moto. In tale modo è possibile movimentare tutti gli specchi con un unico motore con tutti i relativi vantaggi. Nel caso di specchi non baricentrati non si può creare un offset iniziale caratteristico per ogni specchio e la non linearità che si viene a creare non permette di determinare una legge di moto unica, ma prevede quindi una valutazione istante per istante di una legge molto più complessa per ogni singolo specchio. Tutto ciò comporta anche il dover utilizzare, per la movimentazione, un motore per specchio. In conclusione, valutando l'errore di rotazione per differenti valori di distanza del baricentro dal CPC, si può notare che per piccoli valori di braccio si può ottenere una legge di moto unica con la possibilità di movimentare tutti gli specchi con un unico motore.

La posizione del Sole in ogni momento è fornita dagli algoritmi di inseguimento solare, dei quali seguirà una breve descrizione.

## 2.4.2 Metodi di tracking

Un sistema di inseguimento solare è un sistema in grado di determinare la posizione del Sole in ogni istante della giornata. I sistemi di inseguimento possono essere classificati in due grandi categorie:

- anello chiuso: una unità di controllo ha come input dei segnali ottenuti da sensori che misurano dei parametri indotti dal Sole (tipicamente la luminosità) li elabora determinandone la posizione solare;
- anello aperto: degli algoritmi calcolano la posizione del Sole in funzione di località e tempo, sulla base di leggi astronomiche note.

I principali parametri di valutazione dei sistemi di inseguimento risultano essere:

- precisione;
- periodo di validità;
- costo computazionale.

### Inseguimento ad anello chiuso

I sistemi in anello chiuso, come quello in figura, si basano su principi di controllo in retroazione, dove un ruolo fondamentale lo giocano i sensori utilizzati.

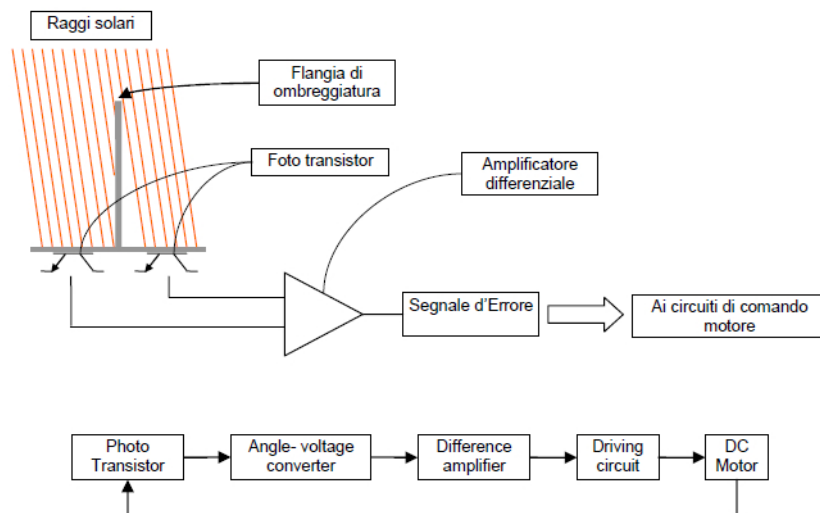


Figura 2.11: Schema di funzionamento di un sistema d'inseguimento ad anello chiuso



Le informazioni fornite dai sensori possono essere utilizzate in due modi differenti:

- utilizzate in un blocco di controllo per comandare direttamente i motori;
- utilizzate da un sistema di elaborazione più complesso per implementare una strategia di controllo più completa ed adatta a ridurre l'errore di puntamento.

I risultati più promettenti presenti in letteratura sono derivati dai seguenti studi:

- Kalogirou (1996);
- Khalifa e Mutawalli (1998);
- Poulek (2000);
- Roth (2004);
- Berenguel (2004);
- Aiuchi (2004);
- Bakos (2005).

I metodi per l'individuazione della posizione del Sole sopra citati si avvalgono di ricettori fotovoltaici. Queste tecniche trovano il loro limite nella presenza di coperture nuvolose. In questo caso la luce diffusa dalle nubi rende inefficace qualsiasi tipo di rilevazione ottica. Per ovviare al problema si possono adottare due strategie:

- i motori di puntamento vengono attivati a intervalli regolari con una opportuna velocità per seguire l'andamento del Sole;
- il sistema ad anello chiuso viene commutato in modalità ad anello aperto e la posizione viene calcolata da opportuni algoritmi.

### **Inseguimento ad anello aperto**

I sistemi ad anello aperto pongono le loro basi sul calcolo astronomico delle coordinate del Sole. Sebbene la posizione degli astri sia determinata da leggi fisiche, per un calcolo accurato occorre tenere conto di diversi fattori di correzione:

- nutazione: moto di oscillazione dell'asse terrestre;
- aberrazione: spostamento apparente delle stelle sulla volta celeste dovuta al moto di rivoluzione della terra e al fatto che la velocità della luce è finita;
- parallasse: comporta un cambiamento della posizione apparente del Sole sulla volta celeste a seconda del periodo dell'anno e dal punto di osservazione;

- rifrazione atmosferica: l'atmosfera terrestre ha un indice di rifrazione diverso da quello del vuoto, l'indice di rifrazione varia inoltre in funzione di pressione e temperatura nei vari strati dell'atmosfera;

In letteratura sono presenti diverse implementazioni di algoritmi per il calcolo della posizione del Sole che garantiscono precisioni molto elevate, ma va evidenziato come qualsiasi sia il modello implementato, i suoi risultati sono legati alla posizione dell'osservatore (sistema di riferimento).

I principali algoritmi astronomici presenti in letteratura sono:

- Spencer (1971);
- Pitman and Vant-Hull (1978);
- Walraven (1978);
- Michalsky (1988);
- Blanco-Muriel et al. (2001);
- Reda and Andreas (2004);
- Grena (2007).

Fortunatamente le tecnologie satellitari GPS rendono pressoché trascurabile l'errore nell'individuazione di tale posizione. Tutti questi algoritmi hanno un periodo di validità limitato, in particolare i risultati più promettenti in termini di precisioni sembrano forniti dai seguenti algoritmi:

- "Solar Position Algorithm for Solar Radiation Application" (SPA) sviluppato da Ibrahim Reda e Afshin Andreas (2004)[21] ed è un algoritmo di elevata precisione per il calcolo di zenit e azimuth presentando un'incertezza stimata in  $\pm 0.0003^\circ$  ed una validità dall'anno 2000 a.C. al 6000 d.C. La procedura implementata è quella adottata dal The Astronomical Algorithms di Meeus (1988) con l'aggiunta di opportune modifiche per l'adattamento alle applicazioni solari. Nei calcoli si tiene conto di molte variabili che possono influenzare il calcolo della posizione solare: nutazione, aberrazione, parallasse, rifrazione atmosferica, pressione atmosferica e temperatura.
- "Computation of the Solar Position" (CSP-ENEA) sviluppato da Roberto Grena (2008)[22] è un algoritmo con una precisione stimata in un errore massimo di  $\pm 0.0027^\circ$  con deviazione standard di  $\pm 0.001^\circ$ , realizzato per ridurre la complessità di calcolo e per questo ha una validità limitata tra il 2003 e il 2023. E' un algoritmo che garantisce un buon compromesso tra velocità e precisione, tiene conto di perturbazione lunare, nutazione, differenza tra coordinate topocentriche e geocentriche, temperatura, pressione e rifrazione.

### 2.4.3 Scelta del metodo di inseguimento

Dai risultati ottenuti in letteratura, e da un'analisi di mercato delle realizzazioni attualmente disponibili, risulta evidente come i sistemi in anello aperto garantiscano una precisione decisamente superiore a quella ottenuta con sistemi in anello chiuso. Risulta inoltre impossibile determinare la posizione del Sole con un sistema in anello chiuso nel caso di variabilità delle condizioni atmosferiche e in queste condizioni questi sistemi ricorrono a soluzioni ad anello aperto.

Con riferimento al concentratore lineare di Fresnel, per le considerazioni sopra riportate, risulta opportuno ricorrere ad un sistema ad anello aperto per la determinazione della posizione del Sole.

I parametri di rilievo, impiegati nella scelta di uno dei due metodi di inseguimento ad anello aperto precedentemente descritti, sono:

- la stima della complessità computazionale;
- la stima della precisione.

Il primo parametro è valutabile in base ai test effettuati su una macchina target e il tempo di calcolo della posizione è pari a:

- 0.0780 ms per SPA;
- 0.0063 ms per CSP.

Nonostante l'algoritmo SPA richieda un calcolo molto più oneroso, a causa dell'elevato numero di operazioni da svolgere rispetto all'algoritmo CSP, il tempo di elaborazione richiesto è estremamente esiguo rispetto al processo sotto controllo, quindi potrebbe essere utilizzato per questa applicazione di tracking ottenendo così un errore minimo di inseguimento ad anello aperto. Il secondo parametro è stimabile implementando i due algoritmi in Matlab ed effettuando un confronto con i dati forniti dal sito USNO (United States Naval Observatory)[23] che fornisce dati astronomici dei corpi celesti in coordinate topocentriche. In figura si mostra un confronto tra zenit e azimuth fra i valori forniti da USNO e i valori calcolati dai due algoritmi nella giornata del 18 giugno 2009.

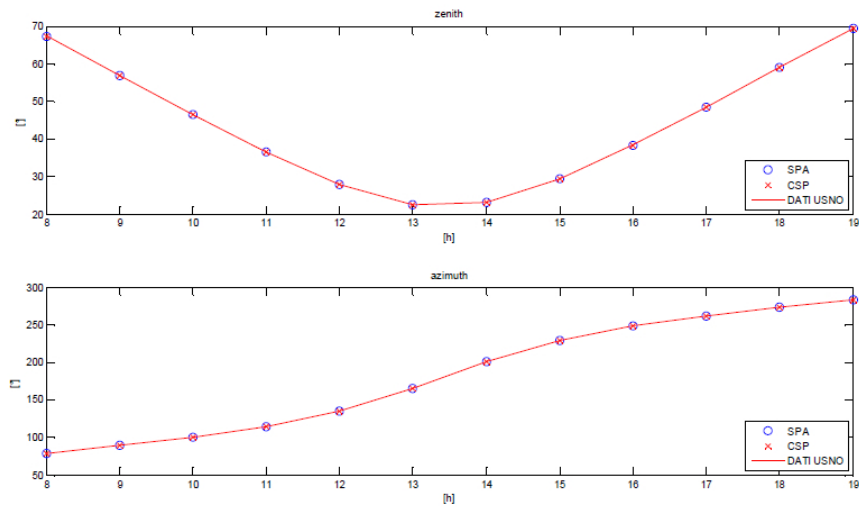


Figura 2.12: Confronto fra SPA, CSP e dati USNO di zenit e azimuth

Nei precedenti grafici non si apprezza chiaramente la differenza fra i due algoritmi e i dati forniti, per questo in figura sono riportati due grafici che rappresentano l'errore fra i due algoritmi nel calcolo di zenit e azimuth rispetto ai dati USNO.

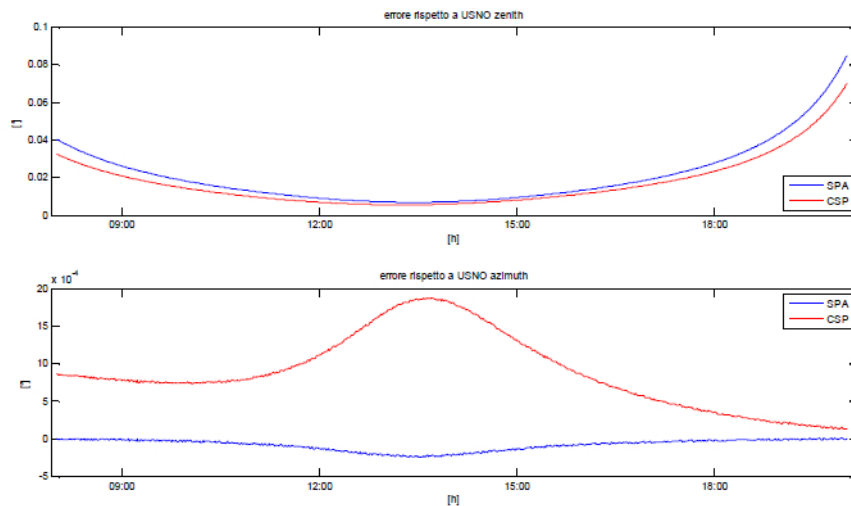


Figura 2.13: Errore di SPA e CSP nel calcolo di azimuth e zenit rispetto ai dati USNO

Entrambi gli algoritmi presentano errori più elevati di zenit nelle ore del mattino e della sera, mentre per quanto riguarda l'azimut l'errore è maggiore nel mezzogiorno.

Si osserva, dal confronto con la serie USNO, che l'algoritmo SPA fornisce valori di posizione più precisi di quelli forniti dal CSP. L'errore di zenit è dello stesso ordine di grandezza in entrambi gli algoritmi presentati mentre l'errore dell'azimut per SPA è notevolmente inferiore.

Sull'algoritmo SPA risulta presente un errore rispetto ai dati USNO di zenit molto elevato, anche superiore a quello del CSP, però si è potuto verificare che tale errore, confrontato con i dati dell'Almanacco Astronomico, rientra perfettamente nelle specifiche e per questo motivo verrà assunto come riferimento l'algoritmo SPA. E' stato indicato come "errore" la differenza fra i valori ottenuti dall'algoritmo CSP rispetto a quelli dell'algoritmo SPA.

L'andamento temporale dello scostamento ("errore") è necessario per valutare se l'algoritmo CSP può essere adeguato all'applicazione presa in esame. L'interesse per tale algoritmo nasce dalla sua minore complessità computazionale, che permette l'uso di piattaforme di calcolo non eccessivamente complesse.

Quanto segue, in *figura 2.14*, illustra gli andamenti della differenza presente fra l'angolo di inclinazione degli specchi calcolato da SPA e quello determinato da CSP durante la giornata del 18 giugno 2009.

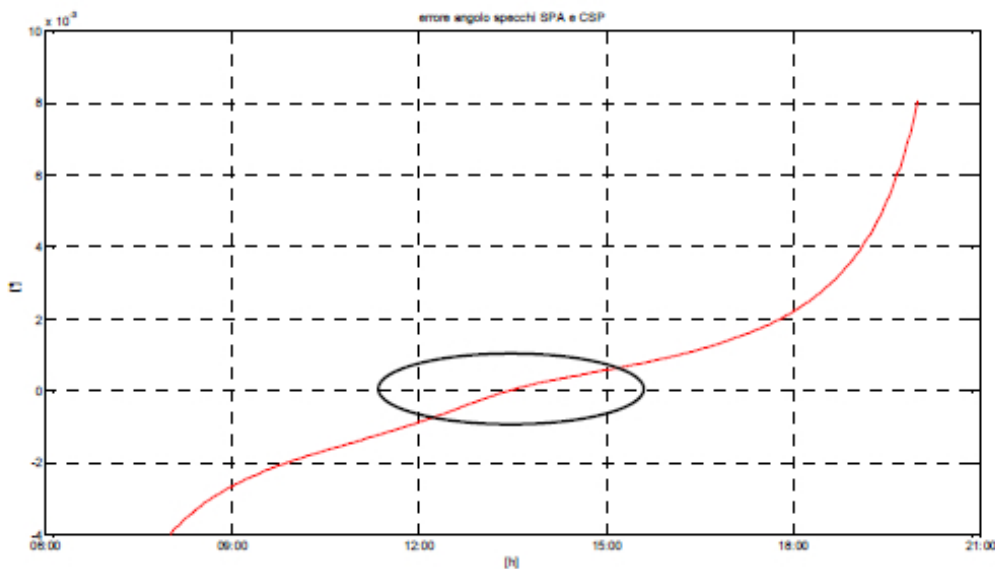


Figura 2.14: Differenza tra l'inclinazione degli specchi calcolata dai due algoritmi

La cosa più interessante da notare è l'equivalenza fra i due algoritmi nelle ore vicino al mezzogiorno mentre si ha un netto discostamento al mattino e alla sera. Il seguente comportamento viene a replicarsi su tutti i giorni dell'anno. Successivamente è stata valutata la variazione di questi scostamenti nel periodo 2010 – 2030, corrispondente agli anni di attività dell'impianto solare in esame. Lo scopo risulta essere quello di verificare se l'algoritmo CSP, al di fuori del suo periodo di validità si discosta eccessivamente dai risultati forniti dall'algoritmo SPA.

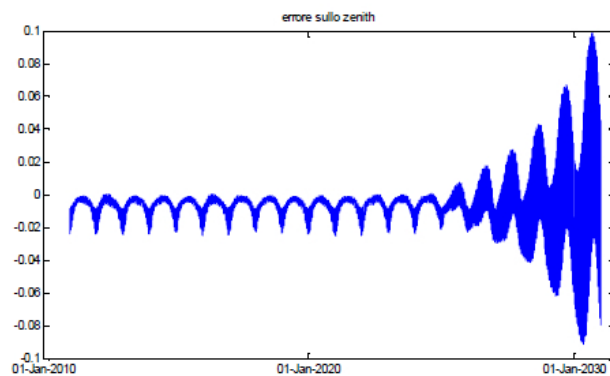


Figura 2.15: *Errore dell'angolo di zenit tra CSP e SPA nel periodo 2010-2030*

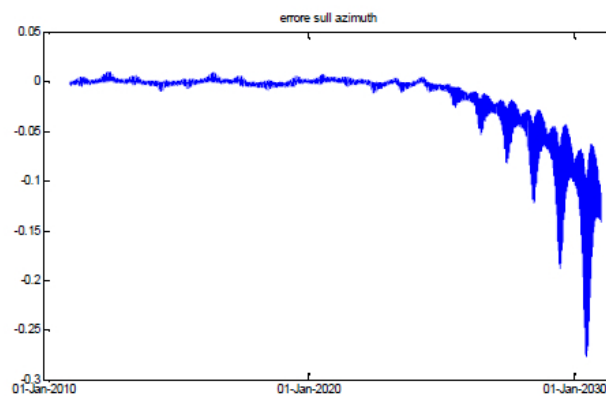


Figura 2.16: *Errore dell'angolo di azimuth tra CSP e SPA nel periodo 2010-2030*

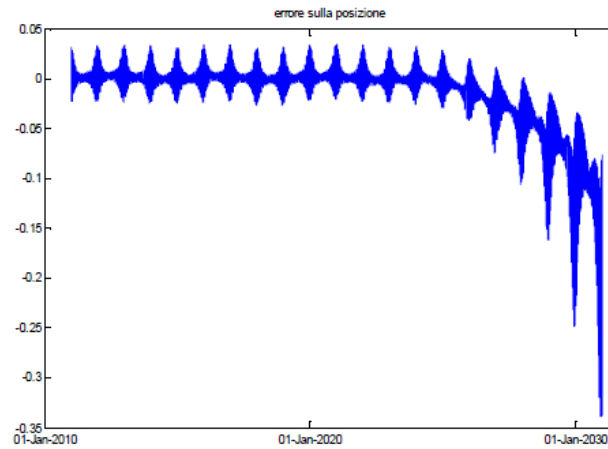


Figura 2.17: *Errore sulla posizione tra CSP e SPA nel periodo 2010-2030*

I grafici precedentemente ricavati sono stati tracciati calcolando la differenza tra SPA e CSP di zenit, azimut e posizione degli specchi per ogni giorno dell'anno e in tre diverse ore (9, 12, 15) della giornata e sono riportati rispettivamente in *figura 2.15, 2.16, 2.17*.

Risulta chiaro che superato l'anno 2030 (anno di fine validità dell'algoritmo CSP), l'andamento dello scarto tra i due algoritmi diverge notevolmente. Questo pone a sfavore dell'algoritmo CSP in quanto la vita preventivata degli impianti solari in oggetto è di almeno venti anni e quindi l'arco temporale di interesse deve raggiungere e superare l'anno 2030.

Inoltre, è stato osservato che l'errore tra i due algoritmi, come precedentemente sottolineato, aumenta notevolmente nel mezzogiorno rimanendo inferiore alla mattina ed alla sera. Questo comportamento risulta maggiormente evidenziato nel grafico seguente il quale è stato tracciato anche in funzione dell'ora del giorno.

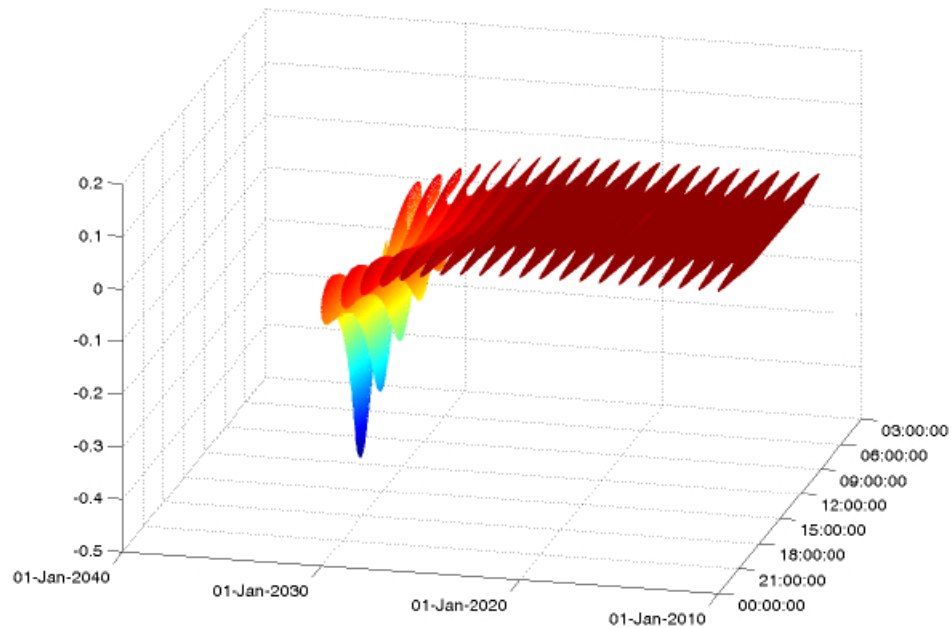


Figura 2.18: *Errore sulla posizione tra CSP e SPA nel periodo 2010-2030 in funzione delle ore del giorno*

Risulta evidente come oltre l'anno 2030, senza introdurre modifiche all'interno dell'algoritmo CSP, non è possibile raggiungere le precisioni richieste dal progetto.

Inoltre, considerando il dato di tempo di calcolo riportato in precedenza, anche se SPA richiede un tempo di elaborazione di un ordine di grandezza maggiore rispetto a CSP, tale tempo risulta essere esiguo rispetto a quello del processo da controllare. Concludendo si ritiene che, considerando i tempi di calcolo e i vantaggi di precisione, la scelta cade sull'algoritmo SPA. Le valutazioni fin qui fatte confermano che l'algoritmo SPA è adeguato alle specifiche richieste dal progetto.

## 2.5 Il progetto FREeSUN

Il progetto FREeSUN è sviluppato nell'ambito del bando Efficienza Energetica Industria 2015. Esso consiste nella realizzazione di un impianto solare termodinamico a concentrazione di tipo Fresnel della potenza di 1[MWe]. Tale impianto sarà la prima installazione funzionante sul territorio nazionale



di tale tecnologia e rappresenterà il punto di partenza per la produzione di energia da fonti rinnovabili.

Il progetto FREeSUN è realizzato da un valido partenariato composto da aziende, università e centri di ricerca i quali presentano una forte complementarità ed allo stesso tempo una perfetta eterogeneità nei diversi settori d'interesse.

Lo scopo del progetto FREeSUN è pertanto quello di effettuare una ricerca industriale mirata alla progettazione di un impianto di grossa potenza ( $50[MWe]$ ) per produrre energia elettrica in condizioni stand-alone (con un sistema di stoccaggio), utilizzando e migliorando componenti attualmente esistenti, in modo da massimizzare l'efficienza dell'impianto e ridurre i costi relativi all'installazione ed alla gestione. L'obiettivo finale è la realizzazione di un impianto dimostrativo ( $1[MWe]$ ) in cui verranno validati i risultati ottenuti dallo studio delle singole parti costitutive l'impianto eccetto che per il sistema di accumulo termico. Tale impianto servirà a testare l'efficacia della ricerca in modo tale da avviare una filiera produttiva nazionale.

Il Politecnico di Milano è impegnato in diversi aspetti del progetto FREeSUN. Uno di questi è legato alla movimentazione dei riflettori primari. L'attività svolta dal Politecnico e da altri partner industriali prevede la progettazione degli organi di trasmissione del moto e l'identificazione dell'attuatore in grado di assolvere a tale compito.

Per valutare la bontà delle scelte fatte in fase di progettazione si è scelto di realizzare un modulo sperimentale composto da dieci specchi sul quale verrà eseguita un'intensa attività sperimentale.

## 2.6 Conclusioni

In conclusione, dopo aver analizzato il principio di funzionamento e gli elementi che compongono un impianto a collettori lineari di Fresnel, si è proceduto con l'individuazione dell'algoritmo di inseguimento del Sole idoneo per tale applicazione. Nei prossimi capitoli si procederà con la modellizzazione dell'attuatore del modulo sperimentale e del modulo sperimentale in cui verranno modellati gli elementi costituenti un impianto a collettori lineari di Fresnel e verrà chiarito come l'algoritmo di inseguimento del Sole scelto andrà a comandare l'attuatore del modulo sperimentale.



# Capitolo 3

## L'attuatore del modulo sperimentale

Uno degli obiettivi di questo lavoro di tesi, che si colloca all'interno del progetto FREeSUN, è quello di realizzare un modello del modulo sperimentale. Con la modellizzazione è possibile comprendere tutte le dinamiche fisiche dell'oggetto che si vuole modellare in modo tale da venir in aiuto alla progettazione fisica vera e propria.

Per far questo è stato scelto di utilizzare il software Dymola[24] che essendo multidominio permette di simulare contemporaneamente sia parti meccaniche che parti elettriche.

Dymola è un software commerciale per la simulazione di sistemi che utilizza il linguaggio di programmazione Modelica e presenta un ambiente di simulazione con un editor grafico ed un traduttore Modelica. Modelica è un linguaggio open-source di modellizzazione di sistemi dinamici, sviluppato dalla Modelica Association, un'associazione no-profit internazionale che ha l'intento di stabilire uno standard nella simulazione dei sistemi dinamici.

I vantaggi nell'uso del software Dymola sono dettati dall'essere un linguaggio orientato agli oggetti, di essere come già accennato multidisciplinare, di essere indirection ed infine di essere acausale.

La modellizzazione acausale si basa sulle equazioni e non sulle dichiarazioni, quindi la "direzione" della soluzione delle equazioni si adatta al flusso di dati con il quale la soluzione è calcolata.

Nel seguente capitolo verranno affrontate le tematiche relative al modello del motore passo-passo definito anche motore stepper.

In particolare nella prima parte del lavoro si effettuerà una breve analisi dei criteri che hanno condotto alla scelta di un moto per passi.

In seguito verrà presentata una descrizione generale del funzionamento, delle tipologie e del pilotaggio del motore passo-passo.

Infine verrà brevemente presentato il modello Dymola del motore passo-passo e del riduttore impiegati per la movimentazione dei riflettori primari.

### 3.1 Scelta del moto

In generale gli attuatori possono sviluppare due tipologie di moto le quali sono:

- moto continuo: in cui l'attuatore fa eseguire al carico una rotazione continua;
- moto per passi: in cui l'attuatore fa eseguire al carico una rotazione e, per un determinato periodo di tempo, lo mantiene in quella posizione prima di eseguire un nuovo passo.

L'aspetto più eloquente che ha condotto alla determinazione del tipo di moto da adottare risulta essere la velocità di rotazione. La movimentazione del carico, formato dai riflettori primari, avviene ad una bassissima velocità di rotazione dell'attuatore pari a circa  $0,0000363[\text{rad}/\text{sec}]$ . Oltre alla necessità di movimentare il carico a bassissima velocità vi è un'ulteriore richiesta che riguarda la coppia, la quale deve essere abbastanza elevata per poter movimentare l'intero parco specchi. Generalmente in queste applicazioni in cui risulta necessario un funzionamento a bassa velocità si effettua un disaccoppiamento fra motore e carico per mezzo di un riduttore di velocità.

La bassissima velocità e l'elevata coppia richiesta conducono verso la scelta di un rapporto di riduzione molto più elevato di quelli tradizionalmente utilizzati. Allo stesso tempo risulta improponibile utilizzare elevati rapporti di riduzione a causa dei giochi molto superiori alle specifiche di progetto. Questa limitazione si ripercuote anche sulla scelta dell'attuatore da utilizzare per la movimentazione del carico. In altre parole, si insinua l'impossibilità di utilizzare motori brushless o motori a corrente continua i quali funzionano di consueto a velocità più elevate a causa del comportamento poco lineare degli attuatori di potenza per bassi livelli di corrente.

Le difficoltà prese in esame hanno condotto alla scelta di un motore passo-passo, escludendo la possibilità di conseguire il moto continuo, accettando invece di conseguire un moto per passi (o steps) di ampiezza tale da essere compatibile con i limiti di tolleranza richiesti.

Un ulteriore vantaggio di tale scelta è determinata dalla possibilità di ottenere coppie di spunto elevate a basse velocità con costi relativamente contenuti.

## 3.2 I motori passo-passo

Questi dispositivi (vedi *figura 3.1*) sono costituiti da un certo numero di avvolgimenti all'interno dei quali circola la corrente elettrica che ha lo scopo di produrre un flusso di campo magnetico che ruota nel traferro posto tra lo statore ed il rotore. Il campo magnetico opportunamente generato determina la rotazione dell'albero motore che avverrà non in modo continuo, ma bensì per passi o step.

Gli avvolgimenti vengono pilotati da opportuni dispositivi elettronici di potenza i quali ad ogni commutazione determinano uno spostamento angolare del campo magnetico la cui entità viene definita passo angolare.

I motori passo-passo, presentano una serie di vantaggi rispetto agli altri motori elettrici. Tali vantaggi sono riassumibili in buone coppie a basse velocità, risoluzioni ottime e costi contenuti. Le loro prestazioni determinano un punto di forza nella scelta di questi attuatori per tutte quelle applicazioni che richiedono elevata precisione negli spostamenti e nella velocità di rotazione (ad esempio trovano largo impiego nella robotica e negli azionamenti). Inoltre questi motori possono essere anche utilizzati con lo scopo di mantenere fermo l'albero in una determinata posizione d'equilibrio. Infatti, se alimentati, si limitano a bloccare l'albero in una ben precisa posizione angolare.

In definitiva possiamo dire che i maggiori pregi di questi dispositivi sono:

- la possibilità di realizzare azionamenti di precisione in catena aperta e quindi con relativa semplicità;
- l'elevata robustezza meccanica ed elettrica.

Mentre i principali difetti risultano essere:

- la necessità di impiegare circuiti elettronici per il pilotaggio;
- il funzionamento a scatti, soprattutto a bassi regimi;
- il basso rendimento energetico;
- la presenza di coppie meccaniche non troppo elevate.



Figura 3.1: *Motori stepper*

### 3.2.1 Tipologie di motori stepper

In commercio esistono fondamentalmente tre tipologie di motori passo-passo:

- a magneti permanenti (PM);
- a riluttanza variabile (VR);
- ibridi.

A loro volta possono essere distinti in unipolari e bipolari, dove per unipolari si intende che la corrente percorre l'avvolgimento in un unico verso, mentre per bipolare si avrà un avvolgimento continuo e la corrente lo attraverserà in entrambi i versi.

Di seguito verrà effettuata una descrizione delle tre tipologie.

#### Motori a magneti permanenti

Lo schema di principio di un motore a magneti permanenti è riportato in *figura 3.2*. In esso è presente un rotore costituito da un cilindro magnetizzato il quale presenta sulla periferia due poli magnetici. Lo statore risulta costituito da due circuiti magnetici ognuno eccitato da un proprio avvolgimento.

Questi motori risultano essere i meno costosi, ma non consentono di raggiungere velocità elevate perché il rotore è costituito da un magnete che nel ruotare genera un campo magnetico che ad una certa velocità si oppone alla rotazione. Il problema viene risolto nella seguente categoria di motori.

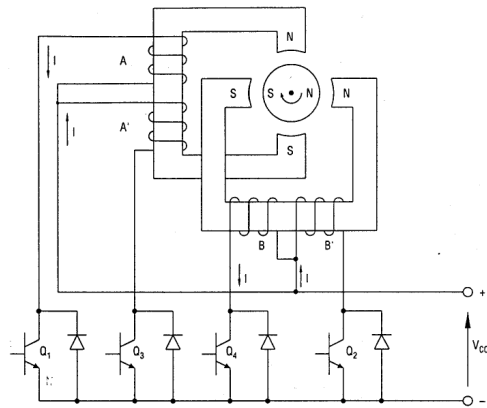


Figura 3.2: Schema di un motore passo-passo a magneti permanenti unipolare

### Motori a riluttanza variabile

Il motore passo-passo a riluttanza variabile, riportato in *figura 3.3*, basa il suo principio di funzionamento sul fatto che le linee di forza del campo magnetico tendono a disporsi secondo un cammino di minima riluttanza. Se il circuito magnetico è in qualche modo deformabile, esso verrà modificato al solo scopo di rendere minima la riluttanza del percorso magnetico. Quindi, in questi motori, il variare della riluttanza va a coinvolgere il percorso delle linee di forza che viene reso minimo.

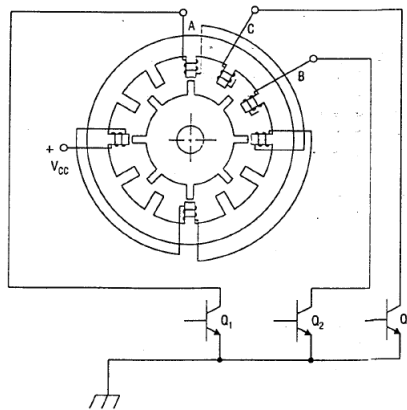


Figura 3.3: Schema di un motore passo-passo a riluttanza variabile

Questi tipi di motore presentano un numero di poli diverso fra statore e rotore. Con questo accorgimento il rotore ruota in modo da rendere minima la

resistenza (riluttanza) al campo magnetico generato dallo statore.

Risulta indispensabile che la scelta sia effettuata in modo tale che il rapporto fra il numero di poli di statore e rotore sia primo e con scarto reciproco unitario.

Questi motori consentono velocità elevate però presentano una coppia decisamente minore dei motori a magneti permanenti ed hanno un costo più elevato.

### Motori ibridi

Nei motori stepper ibridi il rotore, rappresentato in *figura 3.4(b)*, è molto simile ad una coppia di ruote dentate affiancate fra loro e solidali all'albero, le quali sono costituite da un nucleo magnetico. Le due ruote sono permanentemente magnetizzate, una come NORD, l'altra come SUD. Inoltre le coppette (i "denti" delle ruote) sono realizzate in materiale ferromagnetico. Il numero delle coppette è variabile, anche se cinquanta è il valore più frequente. Le ruote presentano fra loro uno sfasamento pari a  $1/2$  del passo dei denti, in questo modo il dente di una delle due sezioni coincide con la valle dell'altra. In genere il rotore è sorretto da dei cuscinetti a sfera.

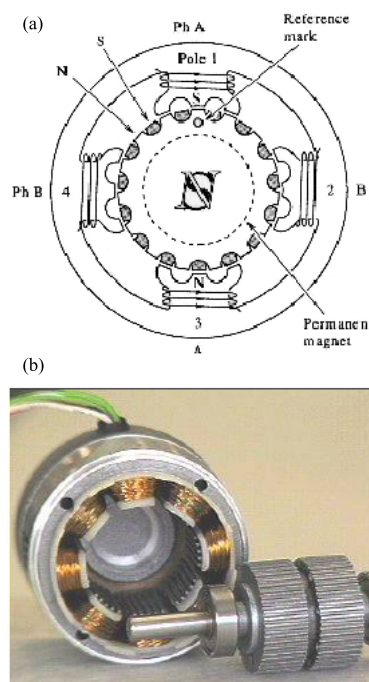


Figura 3.4: Schema di un motore passo-passo ibrido: (a) statore, (b) statore e rotore



Lo statore (*figura 3.4(a)* e *3.4(b)*) appare come il classico insieme di avvolgimenti e il circuito magnetico è costituito da quattro o otto “espansioni polari”. All’interno, lo statore, presenta piccoli denti che si affacciano precisamente con quelli del rotore.

Durante il funzionamento solo i denti della stessa espansione polare e di quella opposta si affacciano esattamente ai denti del rotore. Le altre coppie risultano sfalsate rispettivamente di  $1/4$ ,  $1/2$  e  $3/4$  del passo dei denti.

Avvolti attorno ai poli magnetici dello statore ci sono i fili che, opportunamente percorsi dalla corrente, generano il campo magnetico.

In base alla configurazione di questi fili, tali motori vengono differenziati in bipolari e unipolari.

Il numero di passi del motore dipende dal numero dei denti del rotore e dai poli dello statore. Valori comuni del numero di passi sono 16, 100, 200 [*passi/giro*], numeri che hanno come denominatore comune la divisibilità per quattro.

I vantaggi di questi motori riguardano le migliori prestazioni in termini di risoluzione, coppia e velocità.

### 3.2.2 Modalità di pilotaggio

Esistono quattro modalità di pilotaggio del motore passo-passo:

- One phase on: in cui al rotore viene fatto eseguire un passo accendendo un solo transistor di *figura 3.2* alla volta; in pratica ogni volta che viene acceso un transistor, la corrente scorre nell’apposito avvolgimento provocando un campo magnetico lungo il circuito e portando alla nascita di due polarità opposte N-S sulle espansioni polari. Il rotore cilindrico magnetizzato porta allora i suoi due poli magnetici ad affacciarsi in modo opposto, S-N, con le espansioni polari del circuito magnetico ed in tal modo il rotore esegue un passo.
- Two phase on: in cui è possibile accendere contemporaneamente due transistor successivi della sequenza in *figura 3.2* ottenendo un campo magnetico che ad ogni passo è la composizione dei due campi precedenti. Il rotore rispetto al caso precedente assume le posizioni intermedie. La peculiarità di questo pilotaggio è rappresentata dalla maggiore intensità del campo magnetico nel traferro del motore, che determina una maggiore coppia disponibile.
- Half-step: è il cosiddetto funzionamento a mezzo passo nel quale si sfruttano tutte le combinazioni descritte in precedenza. Permette d’avere un numero di passi doppio rispetto ai casi precedenti anche se il campo magnetico non presenta un valore costante con la rotazione angolare

subita: il campo magnetico presenta valori oscillanti alternativamente fra un valore massimo ed uno minimo.

- Microstepping: si basa sulla possibilità di ottenere una serie ampia a piacere di posizioni intermedie inviando due correnti di diverso modulo nelle due fasi adiacenti. Così facendo il rotore si posizionerà tanto più vicino ad una fase quanto maggiore sarà la corrente in essa rispetto a quella dell'altra fase. Il vantaggio principale, oltre all'aumento del numero di posizioni dell'albero, consiste nell'eliminazione del funzionamento a passi, ottenendo conseguentemente un moto più fluido.

### 3.2.3 Parametri caratteristici dei motori passo-passo

Per poter scegliere l'attuatore adatto per l'applicazione che si vuole movimentare è necessario conoscere la curva di coppia dell'attuatore. Nel caso dei motori stepper tale curva non è unica dal momento che i motori stepper possiedono differenti coppie caratteristiche.

Inoltre le curve di coppia che caratterizzano questi motori sono fortemente influenzate dall'inerzia del carico.

Tali coppie vengono riportate qui di seguito:

- coppia di tenuta o coppia statica (holding torque): è la coppia che può essere applicata a motore eccitato e fermo senza che si provochi la rotazione dello stesso;
- coppia residua (detent torque): è la coppia che si oppone alla rotazione dell'albero del motore quando questi non è alimentato;
- coppia di pull-out: è la massima coppia applicabile ad un motore in moto senza causare la perdita di sincronismo tra sequenza elettrica e meccanica;
- coppia di pull-in: è la massima coppia che può essere applicata al motore perchè possa avviarsi senza perdere il sincronismo.

Alcuni dei suddetti parametri si possono determinare esclusivamente eseguendo delle prove sperimentali.

La seguente figura mostra un'andamento qualitativo delle curve di coppia di un motore stepper.

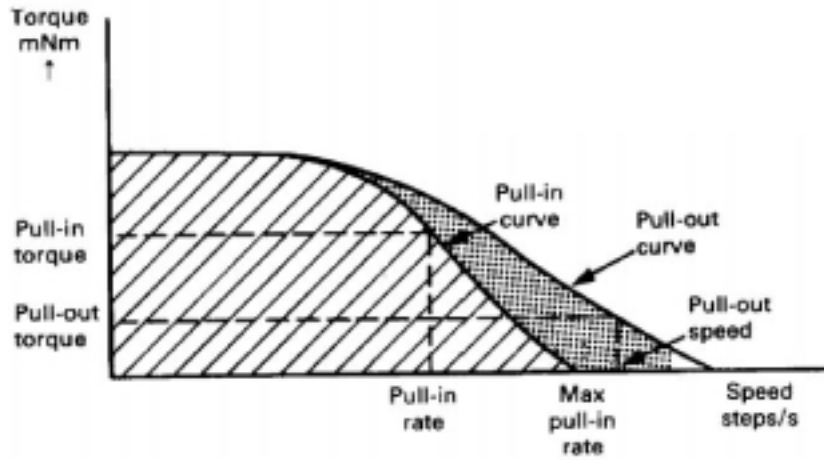


Figura 3.5: Caratteristica meccanica di un motore passo-passo ibrido

### 3.2.4 Il modello analitico

Viste le premesse e le informazioni in possesso, l'attuatore scelto è quindi un motore stepper ibrido a due fasi bipolare. Le equazioni utilizzate per descrivere il suo funzionamento sono quelle classiche del motore ibrido[26] e vengono qui di seguito riportate:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_a \frac{di_a}{dt} + Ri_a - k_e \omega_r \sin(\vartheta Nr) = V_a \\ L_b \frac{di_b}{dt} + Ri_b - k_e \omega_r \cos(\vartheta Nr) = V_b \\ \tau = -k_e i_a \sin(\vartheta Nr) - k_e i_b \cos(\vartheta Nr) \quad , \\ J \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r = \tau \\ \omega_r = \frac{d\vartheta}{dt} \end{array} \right. \quad (3.1)$$

i cui parametri vengono così definiti:

- $L_a$  ed  $L_b$  sono le induttanze delle fasi del motore;
- $i_a$  e  $i_b$  sono le correnti che scorrono nelle fasi;
- $R_a$  ed  $R_b$  sono le resistenze di fase;

$k_e$  è il fattore di conversione da  $[A]$  a  $[N \cdot m]$ ;  
 $\omega_r$  è la velocità angolare del rotore;  
 $\vartheta$  è la posizione angolare del rotore;  
 $Nr$  rappresenta il numero dei poli presenti sul rotore;  
 $V_a$  e  $V_b$  sono le tensioni di alimentazione in ingresso alle due fasi;  
 $\tau$  è la coppia generata;

Le prime due equazioni del sistema (3.1) rappresentano le equazioni elettriche alle maglie che permettono di determinare la tensione presente agli avvolgimenti.

La terza equazione permette di determinare la coppia d'uscita del motore definendo il legame esistente tra coppia e corrente, mentre la quarta equazione è l'equazione meccanica del motore.

L'ultima equazione lega la posizione con la velocità angolare dell'albero motore.

### 3.3 Modello Dymola del motore stepper

Ora che è noto il funzionamento dei motori passo-passo, è possibile descrivere brevemente il modello del motore stepper ibrido e della relativa logica di controllo. Il modello che è stato realizzato è riportato nella seguente figura.

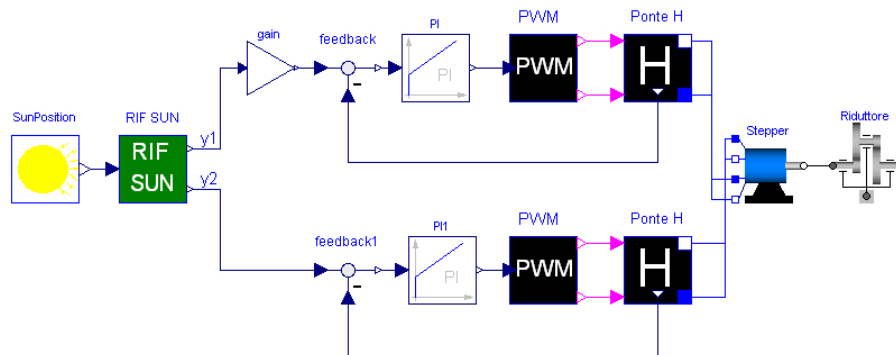


Figura 3.6: Modello Dymola del driver e del motore stepper

Prima di analizzare i vari blocchi è opportuno comprendere a grandi linee il funzionamento dell'intero sistema.

Dalla figura 3.6 si nota che le due fasi del motore risultano collegate con i due ponti ad H i quali, a loro volta, utilizzano come segnale d'ingresso le uscite dei blocchi "PWM". In ogni blocco "ponte H" viene prelevata la corrente ai piedi del ponte, mentre una delle uscite del ponte ad H, ben visibile in figura 3.6, eseguirà il "sense di corrente". Quest'ultimo viene eseguito confrontando il

valore di corrente circolante nel ponte ad H, per mezzo del blocco “feedback”, con l’uscita del blocco “RIF SUN”, il quale genera i due riferimenti che la corrente nelle fasi dovrà seguire. All’uscita del blocco feedback si otterrà un segnale errore che, dopo esser passato per il blocco regolatore PI, agirà sul Duty-Cycle per mezzo del blocco “PWM”.

L’uso di due blocchi “ponte H”, “PWM” e PI per il pilotaggio del motore è reso necessario dal fatto che il motore modellizzato è uno stepper ibrido a due fasi.

Lo schema descritto genera un pilotaggio di tipo “current feedback”, il quale consente di inseguire il riferimento di corrente generato in ingresso.

In [33] è riportata un’analisi più approfondita di tale modello.

### 3.4 Il blocco “SunPosition”

All’interno del modello Dymola dell’impianto è presente il blocco “SunPosition”, visibile in *figura 3.6*, nel quale è stato implementato l’algoritmo astronomico SPA di inseguimento del Sole descritto nel *paragrafo 2.4.2*.

Il blocco “SunPosition” genera il riferimento solare per il sistema di movimentazione. Gli ingressi di tale blocco risultano essere:

- ora, giorno, mese, anno, fascia oraria UTC;
- angolo iniziale del Sole al mattino, pressione atmosferica, temperatura;
- altitudine, latitudine, longitudine.

All’uscita del blocco si ottiene l’andamento dell’angolo  $\gamma$  (*figura 3.7*), punto di partenza per generare il pilotaggio del motore.

L’uscita del blocco di riferimento solare, come precedentemente descritto, deve poter essere utilizzata per generare i riferimenti di pilotaggio del motore.

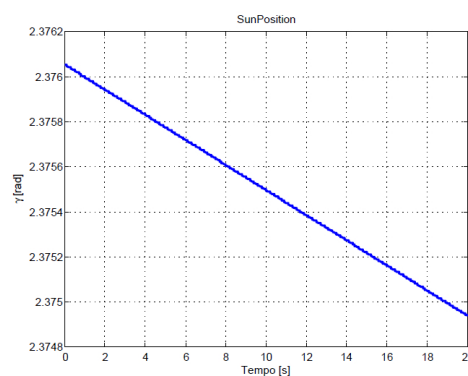


Figura 3.7: Uscita del blocco “SunPosition”

Dalla *figura 3.7* si evince che l'angolo  $\gamma$  varia in modo molto lento nel tempo, tale situazione ha condotto, come precedentemente descritto, alla scelta di un motore passo-passo per la movimentazione dei riflettori.

Si procede ora con l'analisi degli elementi che permettono di generare i riferimenti di corrente per la sequenza di pilotaggio One Phase On del motore stepper.

### 3.5 Il blocco “RIF SUN”

Il blocco “RIF SUN”, riportato in *figura 3.8*, utilizza come ingresso il riferimento solare e in uscita genera la sequenza di accensione delle fasi.

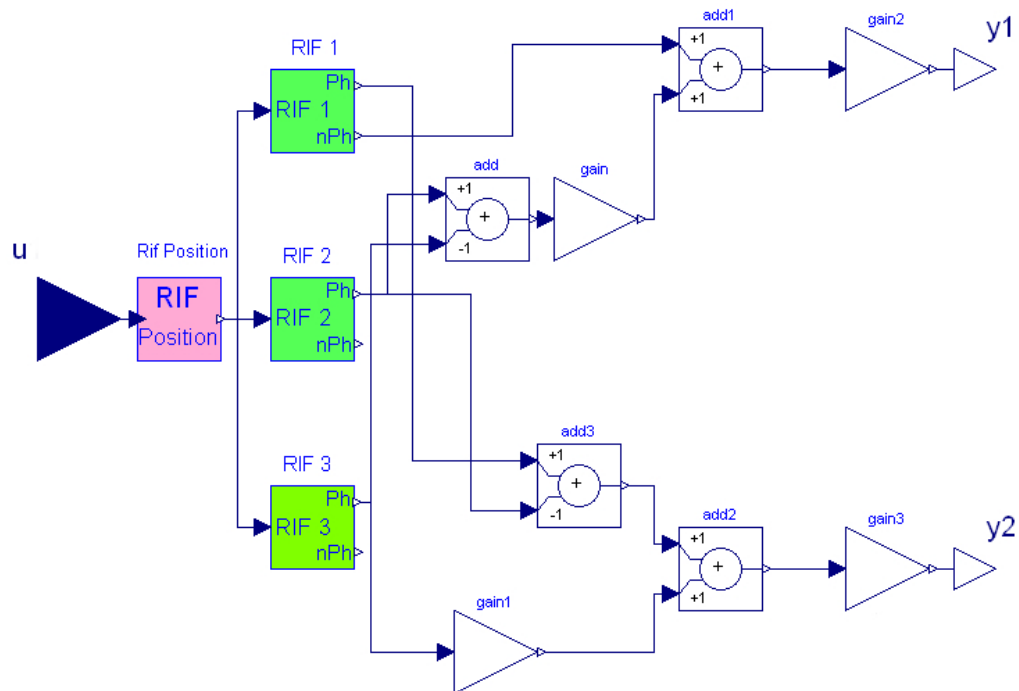


Figura 3.8: Il blocco “RIF SUN”

Gli elementi che lo compongono sono i seguenti:

- un blocco “RIF Position” che trasforma il riferimento da assoluto a relativo;
- tre blocchi “RIF” realizzati in ugual modo, i quali determinano la durata del periodo One Phase On, ma con diverso valore della soglia di scatto nel componente che realizza l'isteresi;

- una logica matematica che a partire dalle uscite dei blocchi “RIF” permette di ottenere la sequenza di pilotaggio One Phase On.

Il riferimento solare assoluto, proveniente dal blocco “SunPosition”, e presente al connettore  $u$ , verrà rielaborato dal blocco “RIF Position” in modo tale da ottenere un riferimento relativo che consente di riflettere i raggi solari che colpiscono gli specchi, sul CPC. La seguente figura mostra come è stato realizzato il blocco “RIF Position”.

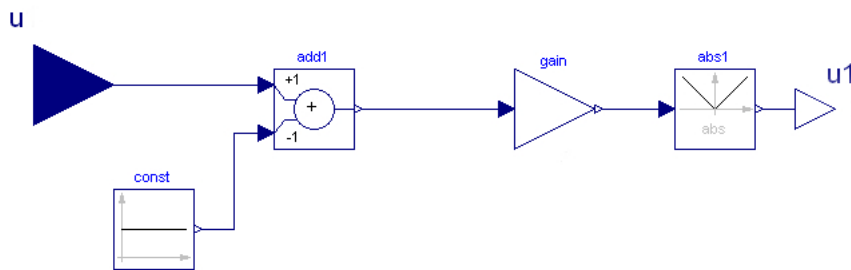


Figura 3.9: Il blocco “RIF Position”

Gli elementi che lo compongono e le funzioni da essi svolte risultano essere:

- un blocco add1 che somma il valore assoluto del riferimento solare, ottenuto all'uscita dell'elemento “SunPosition” (gamma), con un valore costante pari alla somma di  $\frac{\pi}{2}$  con l'angolo che si forma tra l'asse x e lo specchio all'inizio della simulazione ( $c$ ), in modo tale da poter ottenere il valore relativo del riferimento solare;
- un blocco gain di valore pari a 0.5 determinato dal fatto che gli specchi si muovono ad una velocità che è la metà di quella del Sole;
- un blocco abs1 che effettua il modulo del valore all'uscita del blocco “gain” in modo tale da ottenere una gradinata crescente come riferimento solare relativo. Nulla sarebbe variato se la gradinata fosse stata decrescente, tranne che il senso di rotazione del motore.

L'uscita del blocco “RIF Position”, visibile in *figura 3.8*, rappresenta l'ingresso dei tre blocchi “RIF”, i quali realizzano funzioni d'onda rettangolari, di diversa durata, che determinano il riferimento per il pilotaggio One Phase On.

Nelle seguenti figure viene mostrata la struttura dell'elemento “RIF” e i segnali dei principali blocchi che lo compongono.

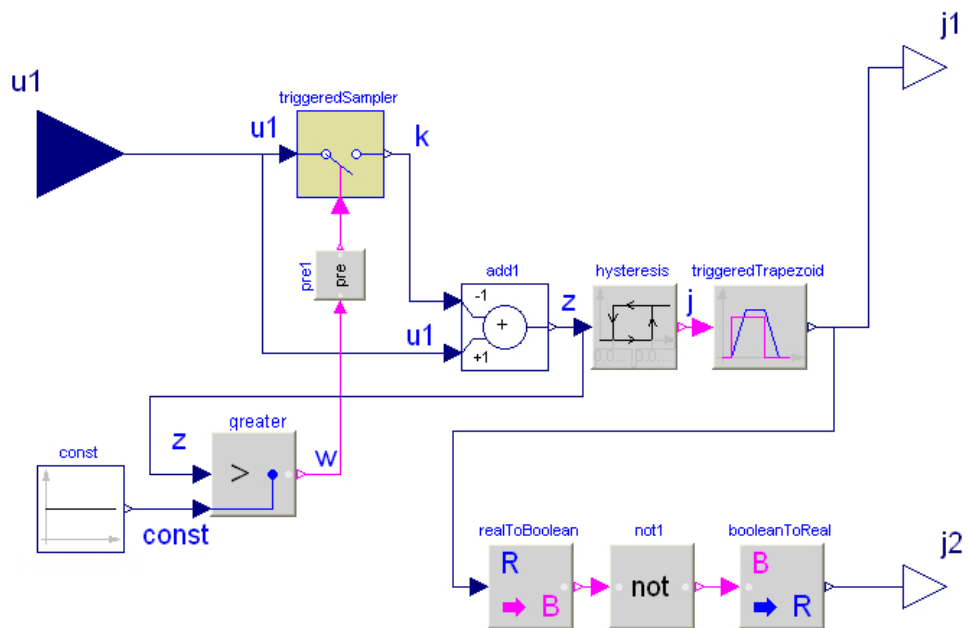


Figura 3.10: Il blocco "RIF"

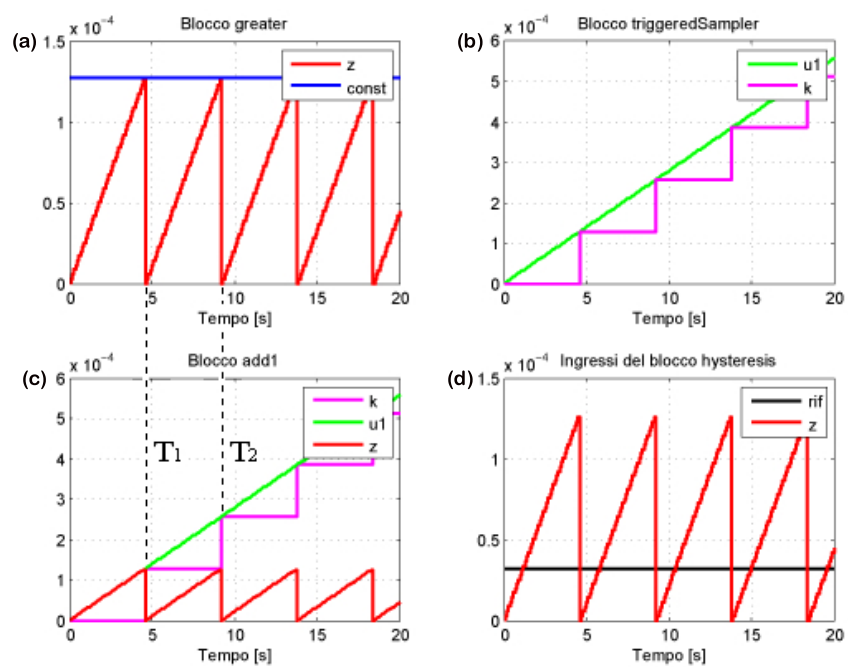


Figura 3.11: Principali segnali: (a) blocco greater, (b) blocco triggeredSampler, (c) blocco add1, (d) ingressi blocco hysteresis



Al tempo  $T_1$ , come mostrato in *figura 3.11(a)*, l'uscita del blocco  $\text{add1}(z)$  eguaglia il valore del blocco  $\text{const}$ , impostato in modo tale da essere equivalente al valore che assume il riferimento solare dopo quaranta scalini. L'uscita del blocco  $\text{greater}(w)$  assume per un breve istante il valore logico "1" per poi tornare al valore logico "0". Il segnale  $w$  sarà il segnale di trigger del blocco  $\text{triggeredSampler}$ .

All'istante in cui  $w$  vale "1", si chiude il blocco  $\text{triggeredSampler}$ , solitamente aperto, e la sua uscita ( $k$ ) scatta fino ad assumere il valore relativo della posizione del Sole ( $u_1$ ). Tale valore viene mantenuto finché non si ripresenta un nuovo valore logico "1" che farà ripartire il ciclo come mostrato in *figura 3.11(b)*.

A questo punto l'uscita del blocco  $\text{triggeredSampler}(k)$  viene sottratta ad  $u_1$ , per mezzo dell'elemento  $\text{add1}$ , in modo tale da produrre sempre una funzione a dente di sega di una certa pendenza e di un certo periodo, come ben visibile in *figura 3.11(c)*. Eseguendo simulazioni a diverse ore della giornata si nota che la funzione a dente di sega presenterà una pendenza e quindi un periodo variabili a seconda dell'ora del giorno in esame.

Il blocco  $\text{hysteresis}$ , il cui segnale d'ingresso ( $z$ ) e la soglia ( $\text{rif}$ ) sono riportati in *figura 3.11(d)*, permette di generare una forma d'onda rettangolare a partire da una funzione a dente di sega.

Ogni qual volta il segnale d'ingresso  $z$  eguaglia il valore  $\text{rif}$  (valore costante impostato all'interno del blocco  $\text{hysteresis}$  che determina la soglia di scatto di tale blocco), l'uscita dell'elemento  $\text{hysteresis}(j)$  passa dal valore logico "0" al valore logico "1" e viceversa, ottenendo la forma d'onda qui di seguito riportata.

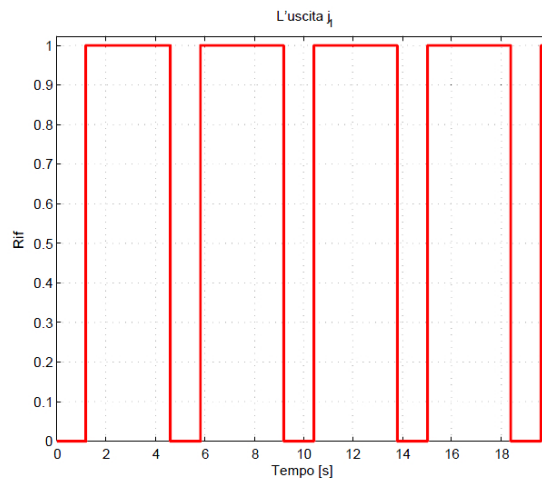


Figura 3.12: L'uscita  $j_1$  del blocco "RIF"

All'interno del blocco "RIF" sono anche presenti un blocco realToBoolean, not1 e booleanToReal i quali permettono di ottenere un segnale  $j_2$  uguale ed inverso a  $j_1$ , come riportato nella seguente figura.

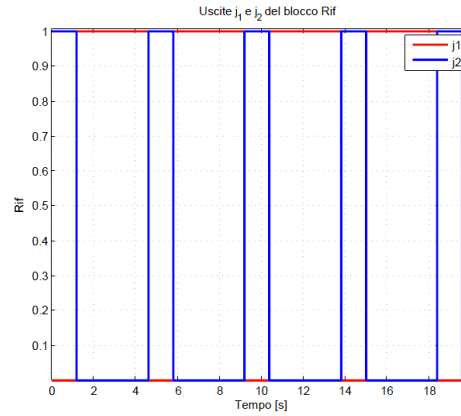


Figura 3.13: L'uscita  $j_1$  e  $j_2$  del blocco "RIF"

Come detto in precedenza i tre blocchi "RIF" sono strutturalmente uguali, l'unica differenza che presentano è il valore impostato come limite di scatto all'interno del componente che realizza l'isteresi. I valori impostati risultano essere pari rispettivamente ad un quarto, alla metà ed a tre quarti del periodo. Per comprendere meglio il funzionamento di questi blocchi, vengono illustrati gli andamenti delle loro uscite.

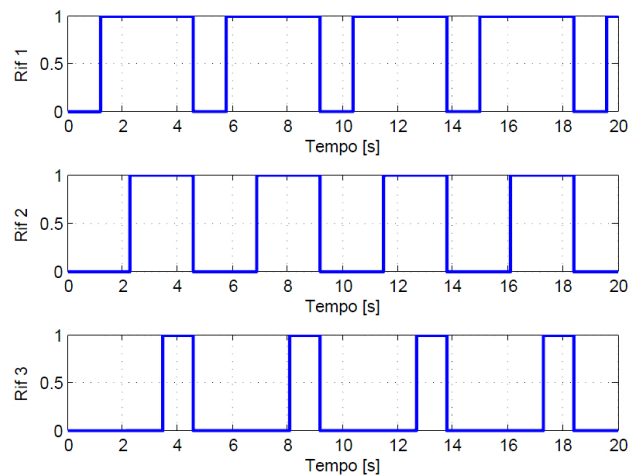


Figura 3.14: Uscite dei blocchi "RIF1", "RIF2" e "RIF3"

Le forme d'onda rettangolari in uscita a questi tre elementi vengono elaborate da una logica matematica, visibile in *figura 3.8*, la quale genererà il tipico andamento di riferimento One Phase On.

Tutto ciò risulta maggiormente comprensibile nella seguente figura dove vengono poste in evidenza le uscite  $y_1$  e  $y_2$  di *figura 3.8*, le quali mostrano le sequenze di energizzazione delle fasi del motore stepper.

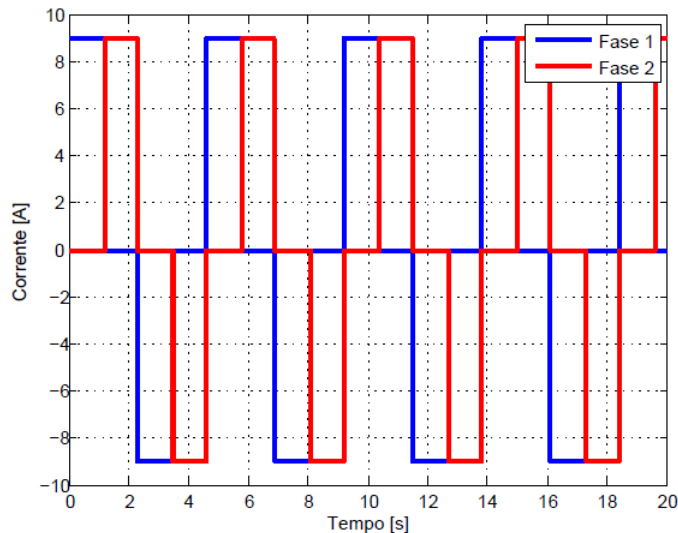


Figura 3.15: Sequenza di energizzazione One Phase On

La sequenza di energizzazione di *figura 3.15* subirà un confronto con l'uscita sense del blocco "ponte H" per mezzo del blocco feedback la cui uscita andrà ad agire sui blocchi "PWM".

Combinando opportunamente le uscite dei blocchi "RIF1", "RIF2" e "RIF3" è possibile ottenere la sequenza di pilotaggio Two Phase On.

### 3.6 Il blocco "PWM"

Ritornando alla *figura 3.6* si osserva che il segnale di riferimento ai connettori  $y_1$  e  $y_2$  del blocco "RIF SUN" viene quindi confrontato, per mezzo del blocco feedback, con il valore della corrente circolante nelle fasi che viene prelevata dal ponte ad H.

L'uscita del blocco feedback, ovvero il segnale errore, dopo essere passato attraverso il regolatore costituirà l'ingresso  $u_2$  (*figura 3.16*) del blocco "PWM", la quale funzione è quella di creare la sequenza di impulsi in grado di aprire e chiudere gli interruttori del ponte ad H.

Nella *figura 3.16* viene riportato il blocco “PWM” con i vari elementi che lo compongono.

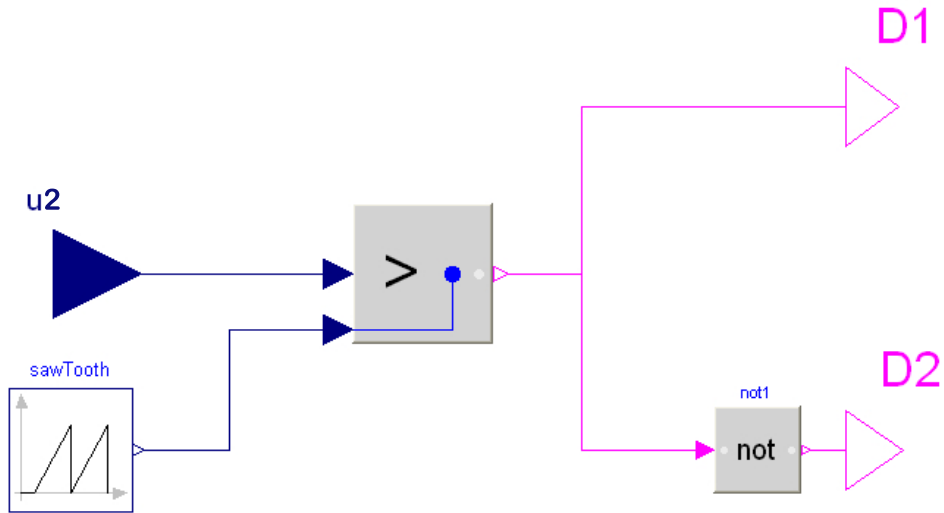


Figura 3.16: Il blocco “PWM”

All'interno del blocco “PWM” si individuano i seguenti elementi:

- un blocco `sawTooth` che genera la funzione a dente di sega, la quale genera la frequenza di funzionamento del PWM;
- un blocco `Greater` che effettua il confronto fra la funzione a dente di sega e il segnale errore in ingresso al blocco “PWM” (connettore  $u_2$ ); all'uscita di tale blocco viene generato il segnale di controllo di una coppia di interruttori del ponte ad H;
- un blocco `not` che permette di generare la forma d'onda complementare a quella in uscita dal blocco `Greater` per il pilotaggio dell'altra coppia di interruttori del ponte ad H.

Quando il segnale errore supera il valore della funzione `sawTooth`, si ottiene all'uscita del blocco `Greater` il valore logico “1”, in caso contrario si ottiene “0”. L'uscita viene quindi inviata al connettore  $D_1$  ed il valore negato al connettore  $D_2$ , cioè agli ingressi dei ponti ad H.

### 3.7 Il blocco “ponte H”

La seguente figura mostra come è stato implementato nel modello il ponte ad H.

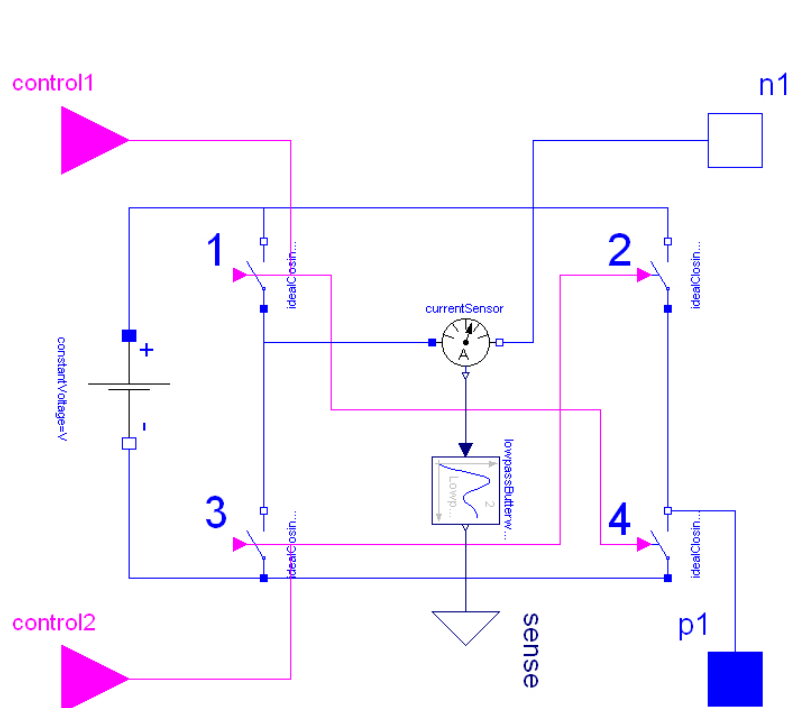


Figura 3.17: Il blocco “ponte H”

Gli elementi che compongono il blocco in questione sono:

- quattro blocchi controlledIdealClosingSwitch che rappresentano quattro interruttori ideali che pilotano le fasi del motore;
- un blocco ConstantVoltage che fornisce l'alimentazione continua al ponte ad H;
- un blocco CurrentSensor che misura la corrente circolante nel ponte ad H;
- un blocco LowpassButterworth che rappresenta un filtro passa-basso, il quale risolve il loop algebrico che viene a crearsi chiudendo l'anello di corrente.

Gli ingressi del ponte ad H, control1 e control2, sono governati dalle uscite del blocco “PWM” uguali ed opposte. In particolare l'ingresso control1 gestisce gli interruttori 1 e 4 di *figura 3.17*, mentre control2 gestisce gli interruttori 2 e 3. Per come è stato realizzato il modello, il ponte presenta un funzionamento bipolare che implica l'apertura e la chiusura di entrambi i rami del ponte in un periodo di switching, ossia durante il periodo di pilotaggio dell'interruttore. Come già affermato l'uscita del filtro LowpassButterworth andrà a confrontar-

si con il riferimento, presente all'uscita del blocco "RIF SUN", per mezzo del blocco feedback.

### 3.8 Il blocco "Stepper"

Il blocco "stepper", rappresenta il motore passo-passo vero e proprio. Al suo interno, come riportato nella *figura 3.18*, sono ben visibili i seguenti elementi:

- due avvolgimenti statorici ognuno dei quali è rappresentato da un resistore e da un induttore;
- un blocco emf al cui interno sono racchiuse le equazioni costitutive del motore riportate nel sistema (3.1), tranne le parti riguardanti le cadute di tensione su resistori ed induttori determinate all'interno dei relativi elementi;
- un blocco damper che rappresenta lo smorzamento viscoso del motore;
- un blocco inertia che rappresenta l'inerzia del rotore.

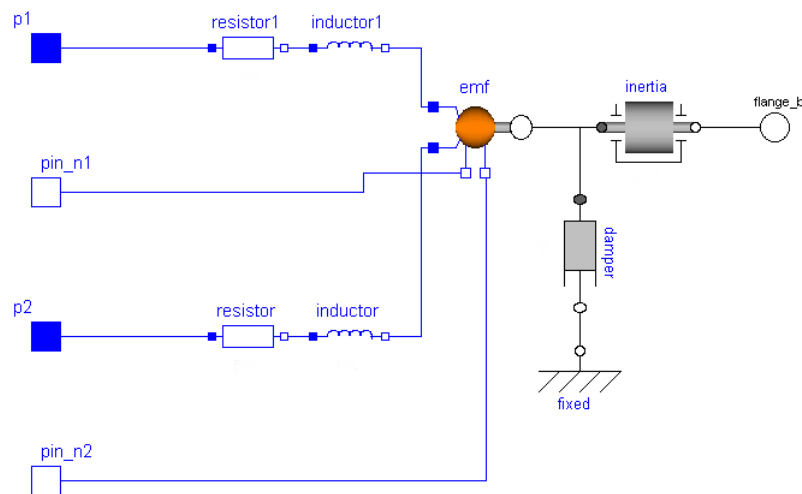


Figura 3.18: Il blocco "Stepper"

Ai capi degli avvolgimenti statorici del motore stepper viene applicata una tensione media, determinata dagli elementi a monte di tale blocco. Tale tensione media produce una corrente media all'interno di ognuno degli avvolgimenti del motore.

Il blocco "emf" di *figura 3.18* determina la forza contro elettromotrice generata dallo stepper durante il suo funzionamento.

Il valore della tensione ai capi del blocco “emf” viene individuato per mezzo delle seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} V_1 &= K_e \cdot \omega_r \cdot \sin(Nr \cdot \vartheta) \\ V_2 &= K_e \cdot \omega_r \cdot \cos(Nr \cdot \vartheta) \end{aligned} \quad (3.2)$$

dove il parametro  $K_e$  è il coefficiente di trasformazione elettrica o costante di velocità (il cui valore corrisponde alla costante di coppia se ci si riferisce al sistema delle unità di misura del sistema internazionale SI:  $K_e = K_t$ ),  $Nr$  è il numero di denti del rotore, mentre  $\vartheta$  rappresenta l'angolo di posizionamento del rotore.

La coppia prodotta dallo stepper, e riportata sulla flangia d'uscita, è determinata dalla relazione:

$$\tau = -K_e \cdot (i_a \cdot \sin(\vartheta \cdot Nr) + i_b \cdot \cos(\vartheta \cdot Nr)); \quad (3.3)$$

### 3.9 I risultati ottenuti

Dopo aver chiarito il modello del motore stepper, è possibile presentare i risultati ottenuti in fase di simulazione.

Il motore stepper che verrà impiegato nel modulo sperimentale è il Sanyo-Denki SM2863-5225 i cui parametri caratteristici sono riportati nel datasheet in *appendice B*.

Nelle seguenti figure vengono riportate rispettivamente la posizione del motore e la corrente negli avvolgimenti statorici. Le prove sono state eseguite in assenza di carico e generando il riferimento di corrente attraverso l'algoritmo solare SPA.

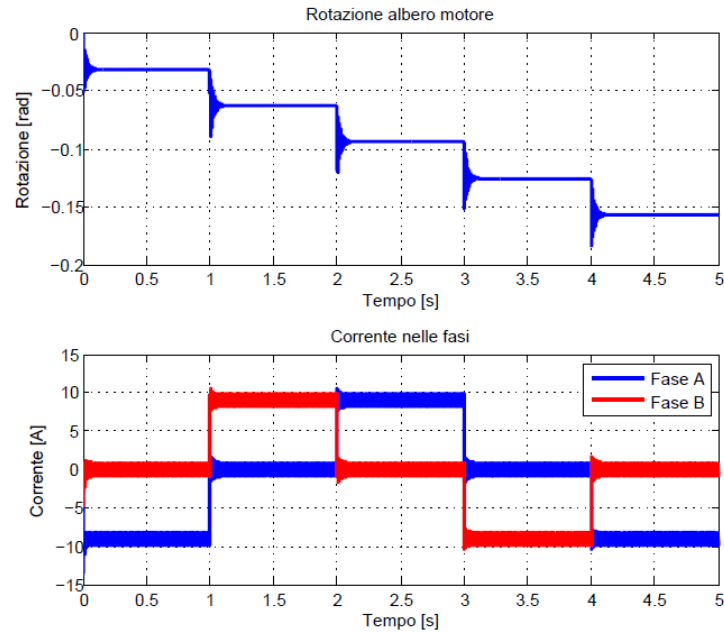


Figura 3.19: Rotazione albero motore e corrente di alimentazione nelle fasi

La prima delle due immagini rappresenta molto bene quanto discusso in precedenza, cioè il tipico andamento a gradini o steps del motore. La seconda immagine evidenzia l’alternarsi delle correnti all’interno delle fasi. Questo continuo alternarsi permette al motore il compimento di uno step.

Inoltre si osserva che, come già detto all’inizio del *paragrafo 3.5*, il blocco “RIF SUN” genera un pilotaggio di tipo One Phase On.

### 3.10 Il modello del riduttore

Per quanto discusso nel *paragrafo 3.1*, all’interno della trasmissione risulta presente un riduttore. Tale organo di riduzione si interporrà tra il motore descritto nei precedenti paragrafi e la trasmissione che verrà descritta nel capitolo successivo.

Come già detto in precedenza l’inserimento del riduttore consente di aumentare la coppia e contemporaneamente di ridurre la velocità in uscita.

Il riduttore scelto per lo scopo è il  $TP^{+100}$  di Wittenstein, il cui datasheet è riportato in *appendice C*. Esso presenta un fattore di riduzione pari a 220 ottenuto con tre stadi di riduzione ed una coppia massima d’uscita pari a  $2600[Nm]$ .

La seguente figura chiarisce come questo elemento è stato modellizzato.



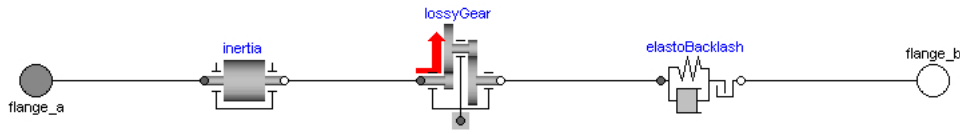


Figura 3.20: Blocco “Riduttore”

All'interno del blocco “Riduttore” si nota la presenza dei seguenti elementi:

- un blocco Inertia che introduce l'inerzia del riduttore;
- un blocco LossyGear che definisce il riduttore vero e proprio con l'effettivo rendimento;
- un blocco Elastobacklash che introduce il gioco, la rigidità e lo smorzamento torsionale del riduttore.

I blocchi appena descritti consentono di ricreare un riduttore che sia il più possibile prossimo a quello reale.

I valori d'inerzia, dei giochi introdotti e della rigidità torsionale sono facilmente ricavabili dal datasheet del riduttore riportato in *appendice C*.

Per quanto riguarda l'elemento Lossy Gear al suo interno è contenuta una tabella, denominata “lossTable”, la quale prevede la definizione di due rendimenti ( $\eta_{mf1}$  e  $\eta_{mf2}$ ) e di due coppie resistenti ( $\tau_{bf1}$  e  $\tau_{bf2}$ ) in funzione della velocità angolare ( $\omega_a$ ) della flangia d'ingresso di *figura 3.20*. In modo particolare  $\eta_{mf1}$  e  $\tau_{bf1}$  si riferiscono al caso in cui  $\omega_a > 0$  mentre  $\eta_{mf2}$  e  $\tau_{bf2}$  al caso in cui  $\omega_a < 0$ . I rendimenti descrivono le perdite per attrito dovute al contatto tra i denti delle ruote che compongono il riduttore, mentre le due coppie sono riferite all'attrito introdotto dai due cuscinetti presenti all'interno del riduttore.

Compilando la “lossTable” è possibile modellizzare un riduttore reale comprensivo di perdite, cioè con un rendimento non costante funzione di  $\tau_B$  e  $\omega_B$  e quindi indirettamente anche di  $\omega_A$ , come visibile in *figura 3.21*.

Per la compilazione della “lossTable” [27], il punto di partenza è stato determinare quali sono i parametri incogniti nella formula generale che esprime la coppia in uscita di un riduttore reale, qui di seguito riportata:

$$\tau_B = i \cdot (-\eta_{mf} \cdot \tau_A + \tau_{bf}) \quad (3.4)$$

dove:

$\tau_B$  è la coppia d'uscita;

$i$  è il rapporto di riduzione;  
 $\eta_{mf}$  è il rendimento dovuto all'attrito fra i denti;  
 $\tau_A$  è la coppia d'ingresso;  
 $\tau_{bf}$  è l'attrito del cuscinetto.

Come già accennato i parametri incogniti risultano essere  $\eta_{mf}$  e  $\tau_{bf}$ . Per quanto riguarda la coppia d'uscita, in alcuni casi risulta essere nota perché il costruttore del riduttore fornisce il grafico, qui sotto riportato, che lega il rendimento alla coppia d'uscita per una certa velocità d'uscita ( $\omega_B$ ).

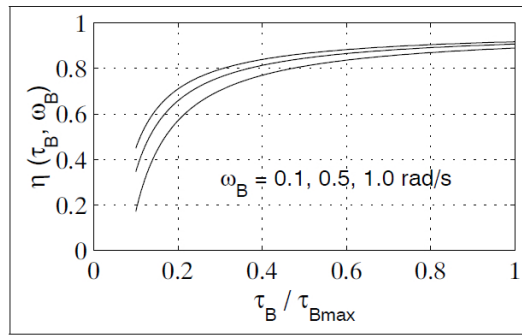


Figura 3.21: Grafico del rendimento in funzione della velocità e della coppia

A questo punto, per determinare i parametri incogniti, sono state fissate le coppie di carico ad una determinata velocità d'uscita  $\omega_B$  in modo tale da misurare la corrispondente coppia in ingresso  $\tau_A$ .

Ora è possibile creare un sistema lineare di equazioni, in cui le uniche incognite sono  $\eta_{mf}$  e  $\tau_{bf}$ :

$$\begin{bmatrix} -i \cdot \tau_{A,1}(\omega_{A,k}) & 1 \\ -i \cdot \tau_{A,2}(\omega_{A,k}) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -i \cdot \tau_{A,m}(\omega_{A,k}) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \eta_{mf} \\ \tau_{bf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{B,1} \\ \tau_{B,2} \\ \vdots \\ \tau_{B,m} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Invertendo il precedente sistema lineare e risolvendolo per mezzo del procedimento dei minimi quadrati descritto in [28], è possibile determinare i parametri incogniti. L'uso del metodo risolutivo dei minimi quadrati è stato necessario a causa della non invertibilità della prima matrice.

Determinati i parametri incogniti, per mezzo delle seguenti equazioni, è possibile compilare la "lossTable".

$$\eta_{mf} := \begin{cases} \eta_{mf}(|\omega_A|) : \begin{cases} \tau_A \cdot \omega_A > 0 & \text{or} \\ \tau_A = 0 & \text{and } \omega_A > 0 \end{cases} \\ \frac{1}{\eta_{mf}(|\omega_A|)} : \begin{cases} \tau_A \cdot \omega_A < 0 & \text{or} \\ \tau_A = 0 & \text{and } \omega_A < 0 \end{cases} \\ \dot{\omega}_A = 0 : \omega_A = 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

e

$$\tau_{bf} := \begin{cases} \tau_{bf1}(|\omega_A|) : \begin{cases} \tau_A \cdot \omega_A > 0 & \text{or} \\ \tau_A = 0 & \text{and } \omega_A > 0 \end{cases} \\ \tau_{bf1}(|\omega_A|) : \begin{cases} \tau_A \cdot \omega_A < 0 & \text{or} \\ \tau_A = 0 & \text{and } \omega_A < 0 \end{cases} \\ \dot{\omega}_A = 0 : \omega_A = 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

con

$$\tau_{bf}(\omega_A) = \begin{cases} \geq 0 : \omega_A > 0 \\ \leq 0 : \omega_A < 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

Ovviamente aumentando il numero di prove è possibile ottenere dei valori incogniti che si avvicinano maggiormente a quelli del caso reale.

A causa della mancanza delle curve di *figura 3.21*, non è stato possibile descrivere accuratamente il modello del riduttore reale. Allora per approssimare accuratamente il riduttore è stato fissato il carico in ingresso alla velocità  $\omega_A$  ed utilizzando il rendimento globale si è giunti a determinare il valore di  $\tau_B$ . Il passo successivo è stato quello di risolvere il sistema (3.5) ottenendo quindi i parametri da inserire all'interno della "lossTable". Per completare il modello del riduttore è necessario valutare il suo smorzamento torsionale. Tale parametro, non essendo riportato all'interno del datasheet, verrà valutato in fase di simulazione.

### 3.11 Conclusioni

Questo capitolo ha mostrato che il problema della movimentazione dei riflettori primari è un aspetto molto critico della fase di progettazione, soprattutto se si vogliono contenere notevolmente i costi.

La scelta è ricaduta su un motore stepper in quanto questo tipo di attuatore permette la movimentazione degli specchi a bassissime velocità. Questo ha portato ad escludere la possibilità di utilizzare motori brushless, in quanto poco adatti a tali velocità. Inoltre l'utilizzo di un motore stepper permette di rispondere all'esigenza di contenere i costi.

È stato poi mostrato come per giungere alle bassissime velocità richieste dal carico sia necessario accoppiare all'attuatore un riduttore di grossa taglia.

# Capitolo 4

## Modello Dymola del modulo sperimentale

Prima di realizzare l'impianto vero e proprio composto da diversi moduli da 80 riflettori, il progetto FREeSUN prevede di realizzare un impianto prototipo per poter testare la bontà delle scelte fatte durante la progettazione.

Questo modulo sperimentale differisce dai moduli utilizzati nell'impianto in quanto al posto di avere 20 colonne ne presenta solo 10 e al posto di 4 riflettori in serie, è stato inserito un solo riflettore. Ne consegue che i riflettori del modulo sperimentale saranno in totale 10. Inoltre, nel modulo sperimentale verranno installati un motore ed un riduttore di cui si è già discusso nel precedente capitolo.

Come già accennato in precedenza per l'attuatore, anche per il modulo sperimentale è stato scelto di realizzare un modello in Dymola. Senza questo modello sarebbe stato molto difficile ad esempio prevedere correttamente le coppie in gioco all'interno del modulo e procedere con la scelta non solo dell'attuatore, ma anche dei materiali e delle sezioni che compongono il telaio del modulo.

Nella prima parte di questo capitolo verranno descritti con particolare attenzione i differenti elementi che compongono gli specchi o riflettori primari del modulo sperimentale prestando particolare attenzione a come questi sono stati modellizzati.

Nella seconda parte di questo capitolo verranno invece descritti in dettaglio gli elementi che hanno permesso di modellizzare la catena cinematica, la quale permette la movimentazione dei riflettori primari durante l'arco della giornata.

## 4.1 Il blocco “ModuloSperimentale”

Il modulo sperimentale di Fresnel che verrà realizzato si compone di dieci riflettori primari posti alla sinistra del CPC. Si è scelto di realizzare dieci colonne da uno specchio ciascuna per poter indagare sul funzionamento della trasmissione progettata e per contenere i costi di progetto. Per meglio comprendere quello che sarà il modulo sperimentale viene riportato nella seguente figura il relativo modello CAD. Inoltre viene riportato in *figura 4.1a* la parte d’impianto che tale modulo vuole ricreare.

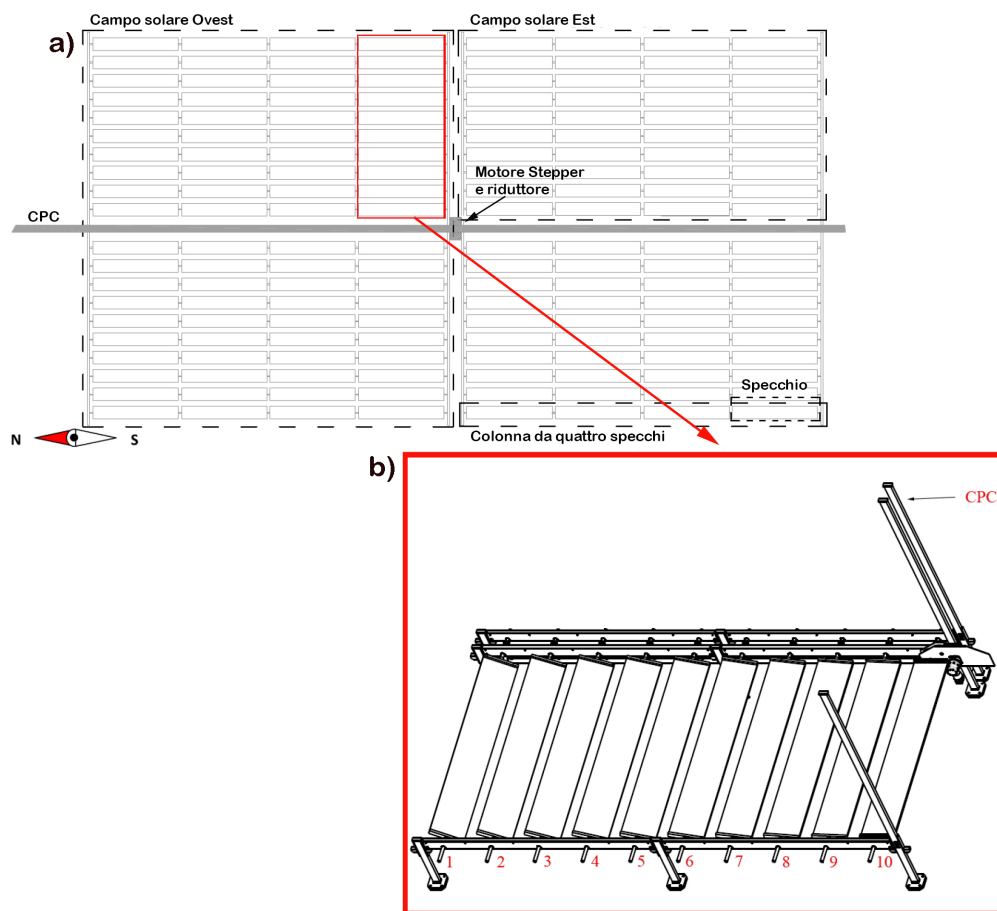


Figura 4.1: (a) Campo solare composto da due moduli da 80 specchi (b) Vista dall’alto del modulo sperimentale di Fresnel

Dopo aver chiarito come sarà il modulo sperimentale si passa alla sua modellizzazione. Il modello Dymola del modulo sperimentale di Fresnel è racchiuso nel blocco “ModuloSperimentale” che consta dei seguenti elementi:

- un sistema di riferimento definito dal blocco World;
- un sistema di leveraggi a sua volta composto da:
  - un blocco “Leva Iniziale” che riceve il moto dal riduttore;
  - otto blocchi “Leva Centrale” che realizza la parte centrale della catena cinematica;
  - un blocco “Leva Finale” che rappresenta l’ultimo stadio della catena cinematica;
- dieci blocchi “3d- >1d” che consentono di convertire il moto da tridimensionale a bidimensionale;
- dieci blocchi “Specchio” che rappresentano i singoli riflettori primari citati in precedenza.

In *figura 4.2* viene proposto il blocco “ModuloSperimentale”, nel quale sono ben visibili i blocchi e tutti gli elementi sopra citati.

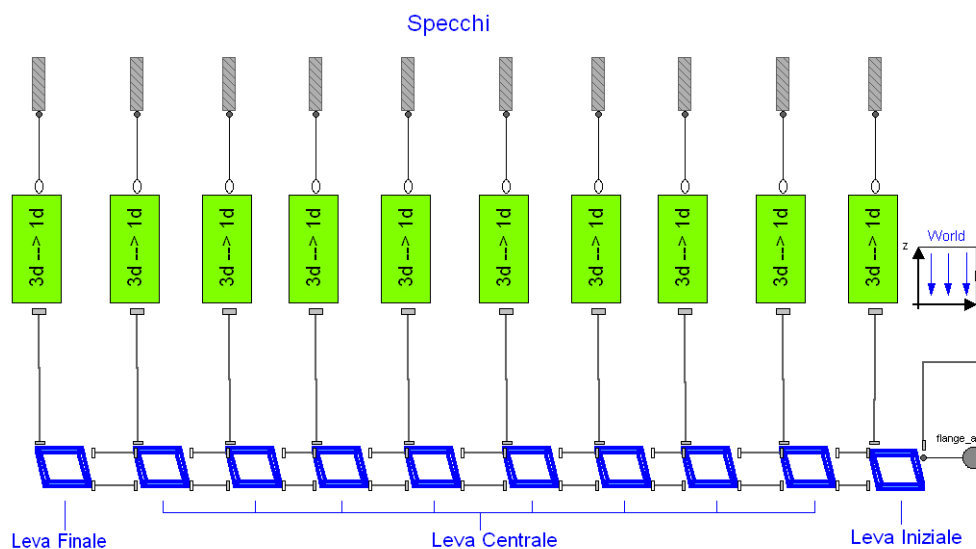


Figura 4.2: Blocco “ModuloSperimentale”

Nei capitoli precedenti, si è discusso del layout dell’impianto Fresnel e del metodo di tracking adottato. La conclusione alla quale si è giunti risulta essere quella di movimentare più riflettori con un unico attuatore.

La presenza di un’unica legge di moto unita alla distanza che i vari specchi devono avere tra loro, determina un offset angolare fra i vari specchi. Tale offset è costante e viene generato al momento dell’installazione dei riflettori.

### 4.1.1 L'offset angolare dovuto alla distanza dello specchio dal CPC

Per comprendere cosa rappresenta questo offset si riporta nella seguente figura la posizione che gli specchi dovrebbero assumere nel caso di un impianto composto da venti colonne da quattro specchi, quando il Sole sta tramontando.

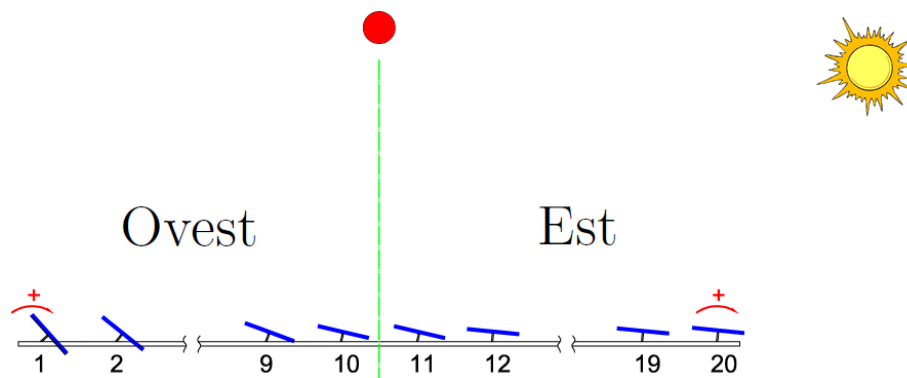


Figura 4.3: Posizionamento qualitativo degli specchi al tramonto

Per fare sì che la luce catturata dal riflettore primario, venga riflessa nella direzione voluta, e vada a colpire il CPC, è necessario considerare gli angoli riportati nella seguente figura.

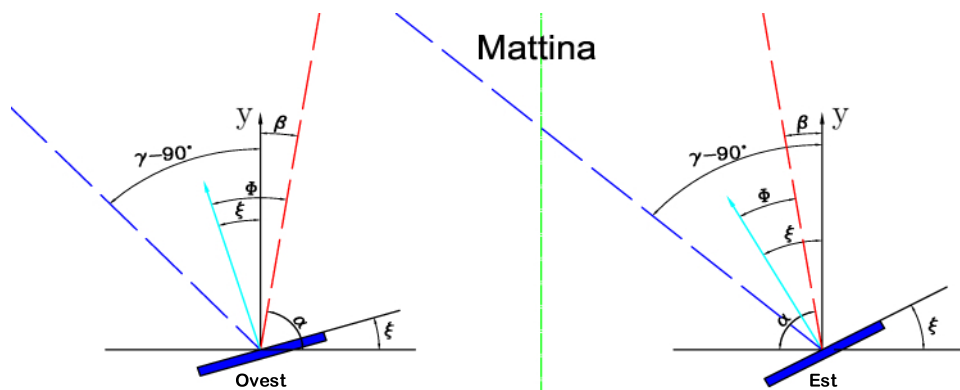


Figura 4.4: Angoli caratteristici del riflettore primario al mattino



La *figura 4.4* mostra con una linea blu tratteggiata il raggio solare, mentre la linea rossa rappresenta quello riflesso sul CPC.

La posizione del Sole, durante l'arco della giornata, viene generata all'interno del modello Dymola per mezzo dell'algoritmo di tracking. L'algoritmo SPA genera l'angolo  $\gamma$  che è visibile all'interno della *figura 4.4* sotto forma di  $\gamma - \frac{\pi}{2}$ , il quale è definito rispetto allo zenith (asse y).

La convenzione adottata nella definizione delle rotazioni dei riflettori primari è quella di considerare come positivo, rispetto all'asse y, l'angolo che si genera in senso antiorario.

Da subito si può intuire come l'angolo  $\alpha$  sia funzione della posizione dello specchio rispetto al CPC. Allora  $\alpha$  sarà pari a:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \text{atan} \left( \frac{\text{DistanzaSpecchio}}{\text{AltezzaCPC}} \right) \quad (4.1)$$

Mentre l'angolo  $\beta$  risulterà essere:

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha \quad (4.2)$$

La definizione dell'angolo  $\xi$  non può essere definita in modo univoco, perché varierà in base alla posizione assunta dal Sole durante l'intera giornata. L'angolo  $\xi$  assumerà valori differenti per le ore del mattino e per quelle del pomeriggio.

Si può osservare dalla *figura 4.4* come nelle prime ore della giornata i raggi solari (linea blu) si trovino alla sinistra del raggio riflesso (linea rossa). Una tale condizione si verificherebbe anche se il modulo sperimentale fosse posto alla destra del CPC.

Nella configurazione individuata per le prime ore della giornata, l'angolo  $\xi$  può essere così fissato:

$$\phi = \frac{\gamma - \frac{\pi}{2} - \beta}{2} \quad (4.3)$$

e quindi

$$\xi = \phi + \beta = \beta + \frac{\gamma - \frac{\pi}{2} - \beta}{2} \quad (4.4)$$

Durante le ore pomeridiane il posizionamento degli specchi sarà quello riportata in *figura 4.5* e l'angolo  $\xi$  sarà definito nel seguente modo:

$$\phi = \frac{\beta - \left(\gamma - \frac{\pi}{2}\right)}{2} \quad (4.5)$$

e quindi

$$\xi = \beta - \phi = \beta - \frac{\beta - \left(\gamma - \frac{\pi}{2}\right)}{2} \quad (4.6)$$

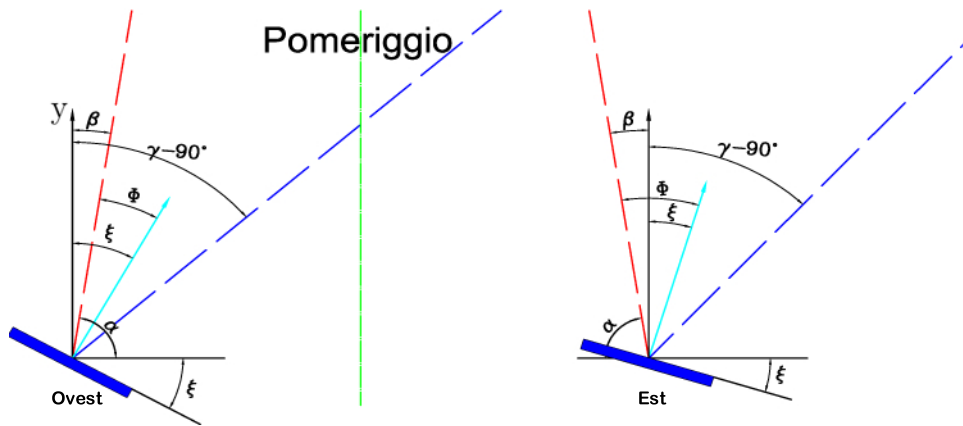


Figura 4.5: Angoli caratteristici del riflettore primario al pomeriggio

Un'altra peculiarità che si può nuovamente estrapolare dalla *figura 4.4* è che nelle prime ore della giornata risulta essere valida la seguente relazione:

$$\gamma - \frac{\pi}{2} - \beta > 0 \quad (4.7)$$

L'angolo  $\xi$ , individuato per diversi periodi della giornata, determina la rotazione dello specchio nel caso in cui lo specchio stesso fosse di tipo baricentrico.

Dal momento che gli specchi in esame risultano essere non baricentrici, l'angolo di rotazione corrispondente sarà l'angolo  $\sigma$  di *figura 4.6*.

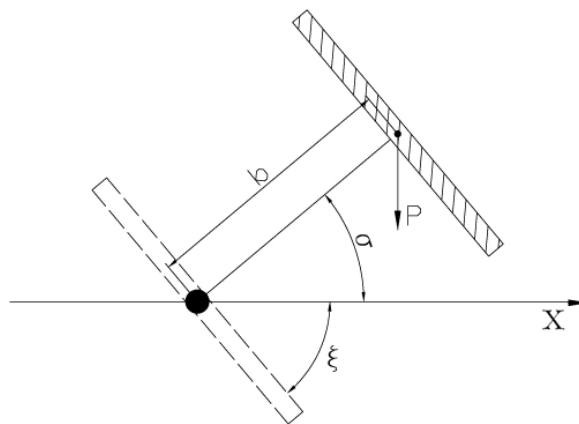


Figura 4.6: Angolo di rotazione dello specchio non baricentrico

Si rileva da tale figura che l'angolo  $\sigma$  sarà pari a  $\frac{\pi}{2} - \xi$ .

Sommando l'output dell'algoritmo "SunPosition" all'offset iniziale dello specchio si ottiene la posizione assoluta dello specchio rispetto all'asse x.

Come ampiamente discusso in questo paragrafo il valore di  $\xi$  viene condizionato dalla distanza dello specchio dal CPC. Risulta evidente che per lo specchio  $i$ -esimo esisterà un certo valore di  $\xi_i$  proprio come riportato nella schema qualitativo di *figura 4.3*.

La seguente figura mostra la vista laterale del modulo sperimentale e chiarisce le distanze che vi sono fra i vari riflettori primari.

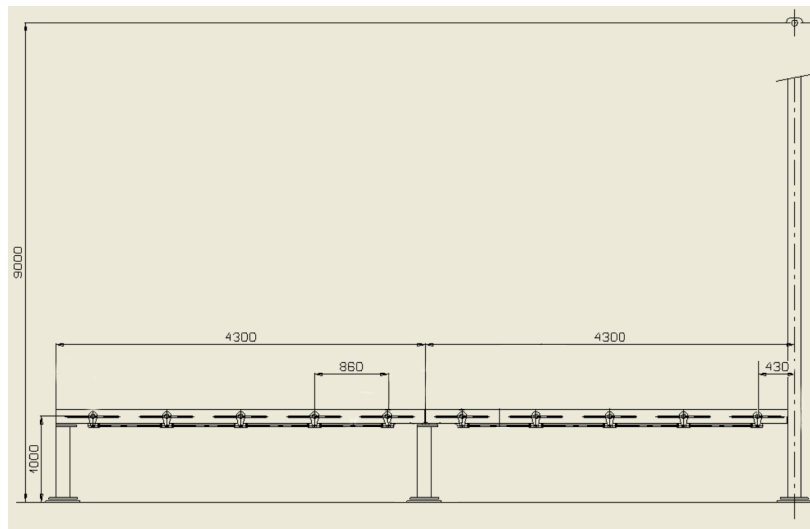


Figura 4.7: *Vista frontale del modulo sperimentale di Fresnel: disegno tecnico*

La *figura 4.7* delinea che il passo tra due specchi consecutivi è di 860[mm], mentre lo specchio N°10 ovvero quello posto in prossimità del CPC, dista da quest'ultimo solo 430[mm].

## 4.2 Il blocco “Specchio”

Lo schema di principio di un singolo riflettore primario, comprensivo di parametri caratteristici quali inerzia, angolo di rotazione e coppie introdotte, è riportato nella seguente figura.

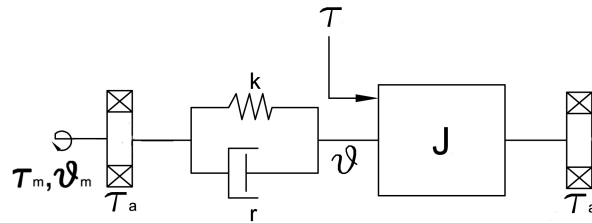


Figura 4.8: Schematizzazione del blocco “Specchio”

Partendo dalla schematizzazione di *figura 4.8* si è proceduto con la creazione del blocco “Specchio” all’interno dell’ambiente Dymola.

Il risultato ottenuto dalla modellizzazione è riportato nella seguente figura:

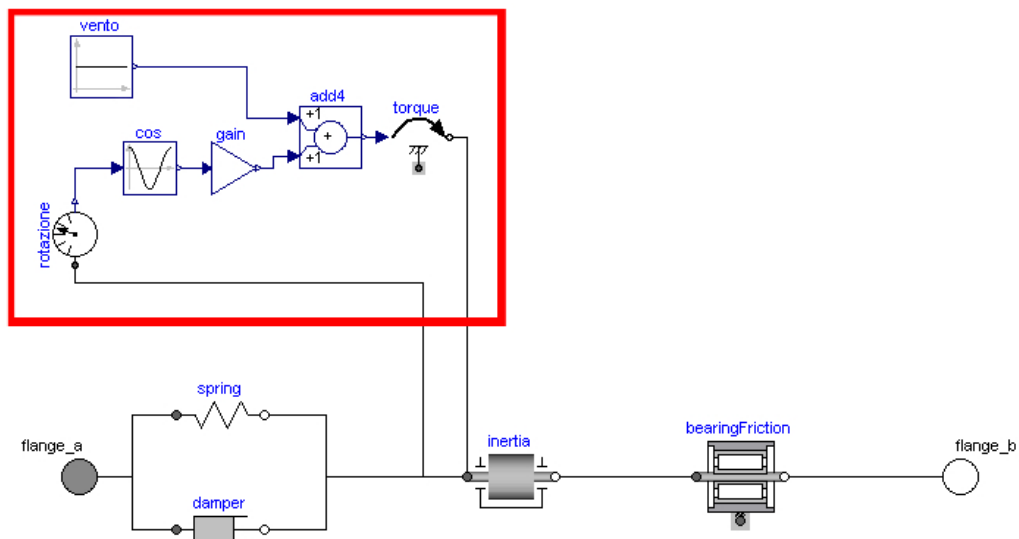


Figura 4.9: Blocco “Specchio”

Ogni elemento “Specchio” è composto dai seguenti blocchi:

- inertia: che rappresenta l’inerzia dello specchio, rispetto all’asse attorno a cui si verifica la rotazione;
- spring e Damper: tali blocchi introducono la cedevolezza e lo smorzamento torsionale dello specchio;
- bearingFriction: che introduce la coppia resistente dovuta all’attrito dei cuscinetti;
- un insieme di blocchi che permettono di generare una coppia sullo specchio pari alla somma della coppia del vento e della gravità.

E' necessario chiarire il motivo per cui in *figura 4.9* è riportato un solo cuscinetto che modella l'effetto di due cuscinetti per ogni singolo riflettore primario.

La coppia a regime generata dal cuscinetto a sfera, ed implementata all'interno del blocco BearingFriction, viene espressa dalla seguente relazione:

$$\tau_{a} = M \cdot 9.81 \cdot \mu \cdot d \quad (4.8)$$

All'interno della relazione della coppia a regime generata dal cuscinetto si è già tenuto conto del fatto che i cuscinetti da rappresentare sono due, e quindi il valore ricavato è pari a due volte la coppia a regime di un singolo cuscinetto. Inoltre all'interno del blocco BearingFriction è possibile impostare il valore della coppia di spunto pari al doppio della coppia a regime ricavata dalla (4.8).

A causa del lieve disassamento dello specchio, il quale fa sì che l'asse di rotazione non passi per il relativo baricentro, si genera una coppia gravitazionale la quale si somma algebricamente a quella generata dal vento che colpisce lo specchio.

Questi due effetti vengono introdotti nel modello per mezzo dei blocchi evidenziati nel riquadro rosso di *figura 4.9*.

La coppia gravitazionale risulta avere un determinato valore in funzione del posizionamento dello specchio; ecco allora che tale coppia verrà descritta dalla seguente relazione:

$$\tau_G = P \cdot \cos(\sigma) \cdot b \quad (4.9)$$

In cui  $P$  è la forza peso,  $b$  è il braccio e  $\sigma = \frac{\pi}{2} - \xi$  è la rotazione dello specchio. La seguente figura illustra quanto appena esposto.

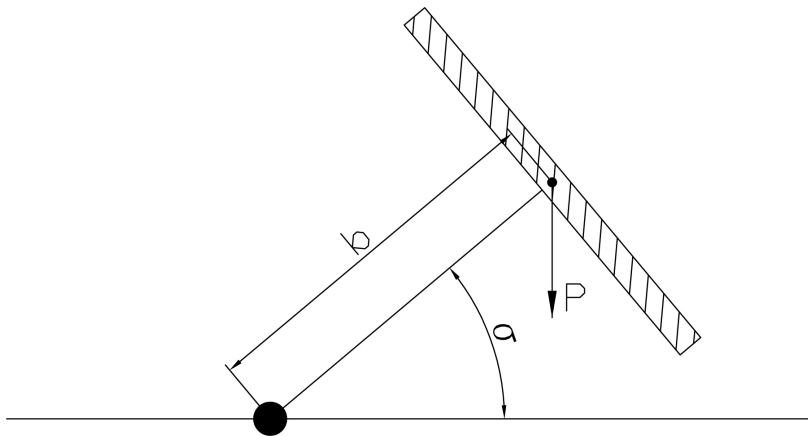


Figura 4.10: Specchio non baricentrico

Il fatto di avere a che fare con dei riflettori primari non baricentrici viene preso in considerazione, all'interno del modello, esclusivamente nel momento in cui viene valutata la coppia gravitazionale.

Come già detto nel precedente capitolo, contenendo il braccio è possibile movimentare l'intero modulo con un solo attuatore.

Gli studi fatti in merito a questo problema di inseguimento di traiettoria [20] hanno dimostrato che con un braccio di 15[cm] non è possibile rimanere all'interno delle specifiche richieste dal progetto.

La filosofia adottata nel modello dei riflettori primari è stata quella di modellizzare la rotazione dei riflettori primari come rotazione assoluta in modo tale da determinare ad ogni istante, durante l'arco della simulazione, il posizionamento reale di ogni specchio. Infatti, se si fosse adottato di implementare per i riflettori primari la rotazione relativa, all'istante iniziale tutti gli specchi presenterebbero una posizione iniziale pari a zero, non conforme al reale posizionamento degli specchi.

Per concludere, l'aver modellizzato la rotazione degli specchi come assoluta, permette in ogni istante di conoscere il reale posizionamento di un qualsiasi riflettore primario.

Dopo aver discusso la modellizzazione dei riflettori primari, tratteremo ora le caratteristiche del modello Dymola del leverismo atto alla movimentazione dei dieci specchi.

### 4.3 Cinematismo per la movimentazione dei riflettori primari

La movimentazione dei riflettori primari è realizzata per mezzo di un sistema di manovelle. All'ingresso della catena cinematica, cioè all'uscita del riduttore, esiste una connessione alla leva di azionamento che a sua volta è collegata a un'asta rigida. L'asta rigida (trave IPE 5398), muovendosi longitudinalmente, trasmette il moto ad una serie di leve, agganciate ad essa, le quali sono collegate dall'altro lato ai relativi specchi e ne trasmettono il moto rotazionale. L'introduzione della trasmissione del moto, all'interno del modello Dymola del modulo sperimentale è stata oggetto di diverse valutazioni le quali hanno portato a ricreare esattamente il sistema di leve mediante componenti della libreria *MultiBody*.

All'interno del blocco "ModuloSperimentale" riportato in *figura 4.2*, è presente il manovellismo che determina la movimentazione dei riflettori primari. Nel modello del manovellismo, come descritto in precedenza, sono presenti tre diverse tipologie di blocchi leva atti a modellare il sistema di trasmissione del moto agli specchi. La differenza fra le varie tipologie nasce dal posizionamento

di tali blocchi lungo la catena cinematica.

La filosofia con cui sono state realizzate le tre diverse tipologie di blocchi leva ha origine dal “quadrilatero articolato” qui di seguito schematizzato.

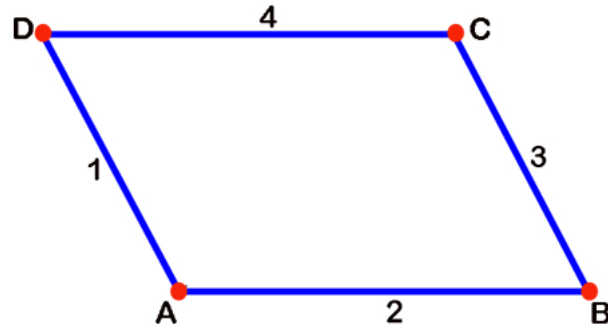


Figura 4.11: Esempio di “quadrilatero articolato”

Esso si compone di quattro principali elementi, che nel nostro caso, seguendo la numerazione riportata in *figura 4.11* risultano essere:

1. manovella: a cui verrà collegato un riflettore primario;
2. biella che trasmette il moto: che determina la movimentazione delle leve;
3. manovella: a cui verrà collegato lo specchio successivo;
4. telaio: che ha il compito di vincolare alla struttura il meccanismo in questione.

Viene qui di seguito proposta un’analisi di come è stato modellato il sistema di trasmissione del moto, ponendo particolare attenzione alle varie tipologie di blocchi leva.

### 4.3.1 Il blocco “Leva Iniziale”

Il modello meccanico del blocco “Leva Iniziale” risulta essere composto da:

- un blocco `actuatedRevolute`;
- tre blocchi `revolute`;
- un blocco `fixedTranslation`;
- tre blocchi `bodyShape`.

Nelle seguenti figure vengono rispettivamente mostrati il disegno tecnico della leva di azionamento e il modello Dymola dell’elemento “Leva Iniziale”, il quale rappresenta il primo blocco della catena cinematica in questione.

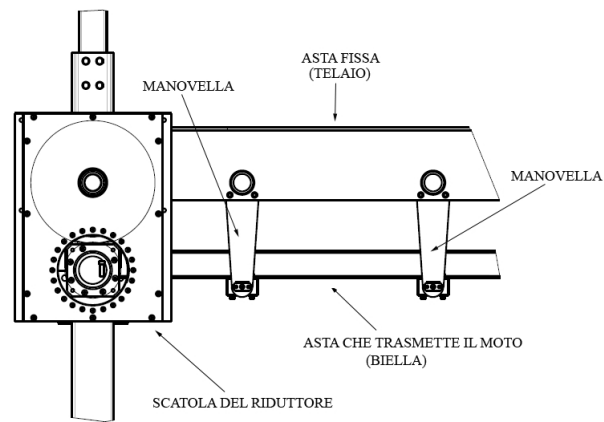


Figura 4.12: *Disegno tecnico della leva di azionamento*

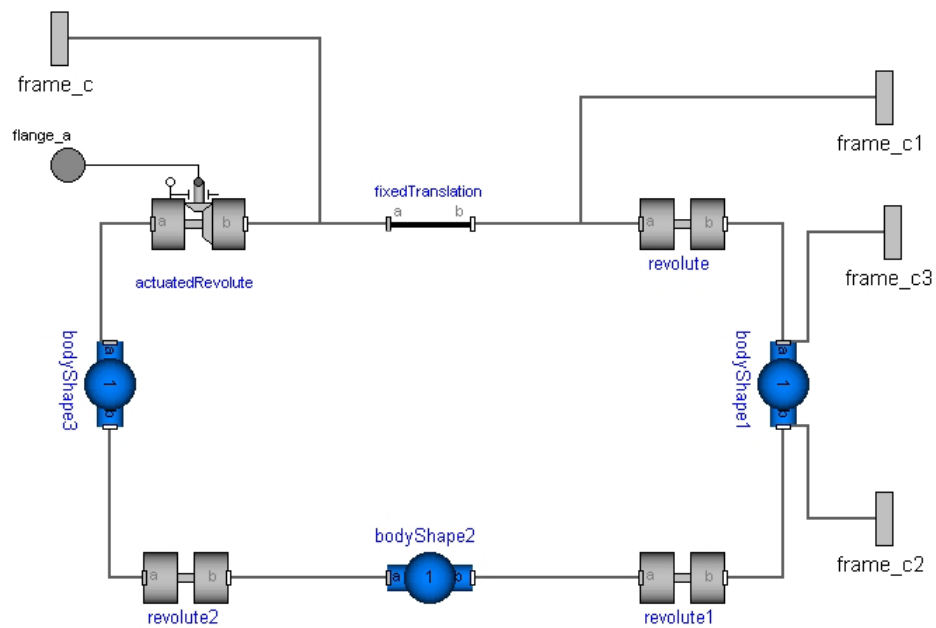


Figura 4.13: *Blocco "Leva Iniziale"*



Il sistema di riferimento, valevole per ogni tipologia di blocco leva, è stato scelto in modo che l'asse  $x$  sia orientato nella direzione dell'asse di rotazione degli specchi, l'asse  $y$  nella direzione parallela alla superficie terrestre e l'asse  $z$ , perpendicolare alla superficie terrestre, in modo tale da formare una terna levogira (con la direzione della gravità verso il basso nella direzione  $-z$ ). Tale sistema di riferimento comprensivo della forza di gravità è rappresentato dal blocco World.

Il primo elemento in ingresso alla catena cinematica è rappresentato dall'attuatore `actuatedRevolute`, che consente il passaggio dal "dominio rotazionale" al "dominio meccanico multicorpo (*Multibody*)", dove la *flange\_a* rappresenta il collegamento fra l'uscita del riduttore e l'ingresso del sistema di leve. Nella finestra di dialogo del componente vengono settati i parametri in modo tale da ottenere una rotazione attorno all'asse  $x$ , dove tale rotazione sarà la medesima per qualsiasi altro blocco `actuatedRevolute` e `revolute` che incontreremo durante la trattazione. Inoltre tutti i blocchi `actuatedRevolute` e `revolute` trattati presentano alle loro estremità due connettori denominati *frame\_a* e *frame\_b* posti rispettivamente alla sinistra ed alla destra dell'elemento in esame.

Il *frame\_c* del blocco "Leva Iniziale" permette l'inserimento del blocco World fondamentale per il funzionamento dei blocchi della libreria Multibody.

Proseguendo nell'analisi della *figura 4.13*, partendo dal *frame\_a* dell'attuatore `actuatedRevolute` e muovendosi in senso antiorario, si incontra il blocco denominato `bodyShape3` che rappresenta la manovella di azionamento del cinematicismo. All'interno della finestra di dialogo del componente `bodyShape3`, come riportato in *figura 4.14*, vengono definiti i parametri specifici di tale manovella quali la lunghezza ( $r$ ) definita lungo l'asse  $z$ , il posizionamento del suo baricentro ( $r\_CM$ ), la massa ( $m$ ) e il valore dei momenti d'inerzia ( $L_{11}, L_{22}, L_{33}$  e  $L_{31}$ ). Gli elementi che compongono il tensore d'inerzia sono stati ottenuti tramite l'uso di un modellatore solido[25].

Parameters		
animation	true	= true, if animation shall be enabled (show shape between frame_a and frame_b and optionally a sphere at the center of mass)
animateSphere	true	= true, if mass shall be animated as sphere provided animation=true
r	{0,0,-0.3}	m Vector from frame_a to frame_b resolved in frame_a
r_CM	{0,0,-0.15}	m Vector from frame_a to center of mass, resolved in frame_a
m	3.9893	kg Mass of rigid body
Inertia tensor (resolved in center of mass, parallel to frame_a)		
L_11	0.065267	kg.m2 (1,1) element of inertia tensor
L_22	0.06542	kg.m2 (2,2) element of inertia tensor
L_33	0.005293	kg.m2 (3,3) element of inertia tensor
L_21	0	kg.m2 (2,1) element of inertia tensor
L_31	0.007117	kg.m2 (3,1) element of inertia tensor
L_32	0	kg.m2 (3,2) element of inertia tensor

Figura 4.14: Finestra di dialogo del componente `bodyShape3`

Proseguendo nell'analisi troviamo il componente *revolute2*, dove il *frame\_a*, di tale blocco, preleva la rotazione derivante dalla manovella di azionamento del cinematismo e la trasmette all'asta rigida che ha la funzione di trasmettere il moto (biella).

Come accennato il *frame\_b*, del blocco *revolute2*, è collegato con il *bodyShape2* che modella la biella, posta fra la manovella di azionamento del cinematismo e la manovella a cui è collegato lo specchio più prossimo al CPC. Come per il *bodyShape3*, anche nella finestra di dialogo del *bodyShape2* sono contenute le informazioni relative ai parametri specifici del pezzo di asta considerato. Tali parametri sono riportati in *figura 4.15*.

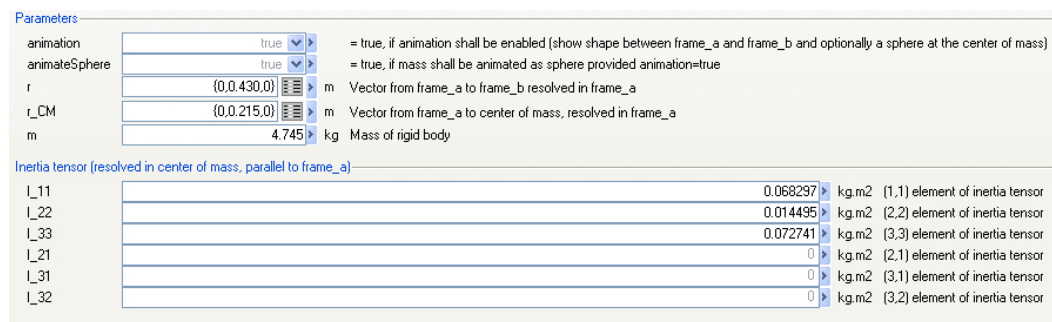


Figura 4.15: Finestra di dialogo del componente *bodyShape2*

A sua volta *bodyShape2* è collegato al blocco *revolute1* che presenta la medesima configurazione di parametri dell'elemento *revolute2* definito in precedenza. Il blocco *revolute1* è collegato per mezzo del *frame\_b* al *bodyShape1*, che rappresenta la seconda manovella del quadrilatero. Questo blocco presenta, nella finestra di dialogo, i medesimi parametri riportati nella *figura 4.14*. L'elemento *bodyShape1* ha alle sue estremità delle connessioni a *frame*, dove *frame\_c3* è il collegamento verso il blocco “3d- >1d”, mentre *frame\_c2* trasmette il moto al successivo blocco “Leva Centrale”.

Il *bodyShape1* si interfaccia con il blocco *revolute*. Tale elemento a prima vista non sembra necessario nel modello, ma risulta di fondamentale importanza per la chiusura e il funzionamento del “quadrilatero articolato”. Il *frame\_c1* collegato al blocco *revolute* definisce il secondo allacciamento con il successivo blocco “Leva Centrale”, cioè determina l'aggancio al telaio.

Il *frame\_a* del *revolute* e il *frame\_b* dell'attuatore *actuatedRevolute* sono collegati ad un elemento *fixedTranslation*, il quale rappresenta un'asta fissa con il sistema di riferimento globale (blocco *World*). Tale blocco oltre a fissare a terra i blocchi *actuatedRevolute* e *revolute* ai quali è collegato, consente di porli ad una certa distanza l'uno dall'altro. All'interno di questo blocco è stata settata la distanza che è presente fra l'uscita del riduttore e lo specchio

più vicino ad esso.

A questo punto risulta interessante indagare sul perché il cinematismo non è stato realizzato da soli blocchi “Leva Iniziale”, dato che il successivo blocco è denominato “Leva Centrale”.

Nella modellizzazione del cinematismo solo il blocco “Leva Iniziale” presenta, al suo interno il meccanismo sopra citato, mentre il successivo elemento “Leva Centrale” crea il “quadrilatero articolato” sfruttando l’elemento `bodyShape1` del blocco precedente. In altre parole è come se la manovella, rappresentata dall’elemento `bodyShape1`, fosse in condivisione fra due blocchi adiacenti. Ecco che ciò ha comportato una diversa modellizzazione degli elementi leva lungo la catena cinematica. Considerazioni simili, qui trattate, sono estendibili anche alla differenza che esiste fra il blocco “Leva Centrale” ed il blocco “Leva Finale”.

In definitiva le peculiarità del blocco “Leva Iniziale” risultano essere la presenza di un ingresso e tre uscite, la presenza di elementi rotazionali, aventi un unico grado di libertà rotazionale e il posizionamento di ogni `bodyShape` fra due blocchi revolute, dove le ultime due considerazioni sono esattamente replicabili ai successivi elementi della trasmissione.

### 4.3.2 Il blocco “Leva Centrale”

Il modello meccanico del blocco “Leva Centrale” risulta essere composto da:

- tre blocchi revolute;
- un blocco `fixedTranslation`;
- due blocchi `bodyShape`.

Nelle seguenti figure vengono riportati il disegno tecnico della leva centrale e il modello Dymola dell’elemento “Leva Centrale”, che rappresenta i blocchi centrali della catena cinematica.

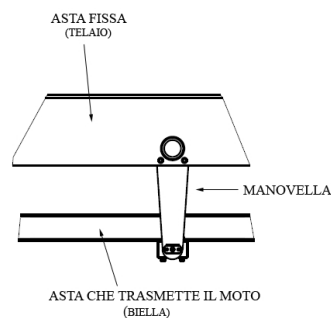


Figura 4.16: *Disegno tecnico della leva centrale*

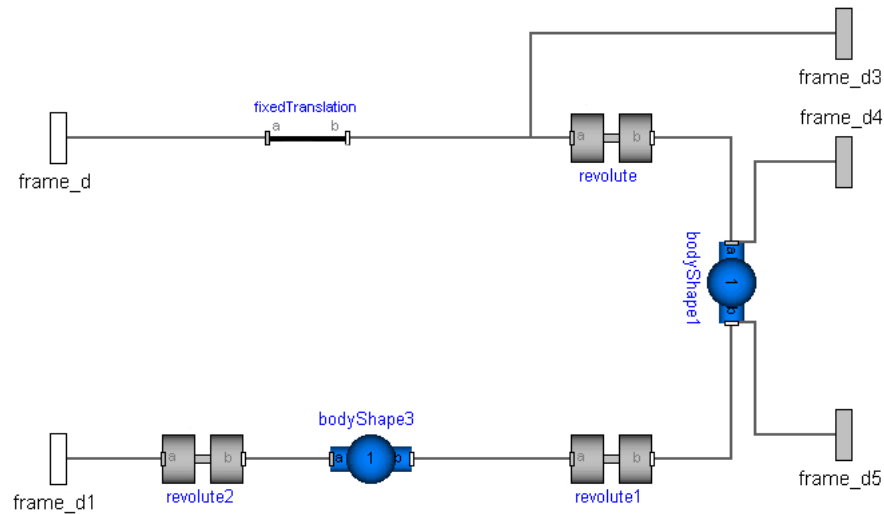


Figura 4.17: Blocco “Leva Centrale”

I tre elementi revolute presentano lo stesso principio di funzionamento analizzato in precedenza per il blocco “Leva Iniziale”. Anche l’elemento fixedTranslation ha lo stesso ruolo descritto in precedenza, con una lieve differenza nella finestra di dialogo del componente, dove viene variata la distanza fra i suoi due frame e viene settata pari al valore della distanza presente tra due specchi paralleli.

I componenti bodyShape3 e bodyShape1 rappresentano rispettivamente la biella che trasmette il moto e la manovella alla quale si aggancia lo specchio. Il bodyShape1 presenta una finestra di dialogo uguale a quella riportata in *figura 4.14*, mentre la finestra di dialogo del componente bodyShape3, riportata in *figura 4.18*, è simile a quella del blocco bodyShape2 dell’elemento “LevaIniziale”, con alcune varianti relative ai suoi parametri.

Parameters		
animation	<input type="checkbox"/> true	= true, if animation shall be enabled (show shape between frame_a and frame_b and optionally a sphere at the center of mass)
animateSphere	<input type="checkbox"/> true	= true, if mass shall be animated as sphere provided animation=true
r	{0,0.860,0}	m Vector from frame_a to frame_b resolved in frame_a
r_CM	{0,0.430,0}	m Vector from frame_a to center of mass, resolved in frame_a
m	9.49	kg Mass of rigid body
Inertia tensor (resolved in center of mass, parallel to frame_a)		
I_11	0.516222	kg.m <sup>2</sup> (1,1) element of inertia tensor
I_22	0.028991	kg.m <sup>2</sup> (2,2) element of inertia tensor
I_33	0.525111	kg.m <sup>2</sup> (3,3) element of inertia tensor
I_21	0	kg.m <sup>2</sup> (2,1) element of inertia tensor
I_31	0	kg.m <sup>2</sup> (3,1) element of inertia tensor
I_32	0	kg.m <sup>2</sup> (3,2) element of inertia tensor

Figura 4.18: Finestra di dialogo del componente bodyShape3

Dalla *figura 4.18*, si evidenziano delle differenze rispetto al blocco `bodyShape2` dell'elemento "Leva Iniziale", che riguardano la lunghezza ( $r$ ) (differenza visibile anche nel disegno tecnico di *figura 4.7*), il posizionamento del suo baricentro ( $r_{CM}$ ) e la massa ( $m$ ) del pezzo di asta rigida considerato. Tali parametri influenzano ovviamente il calcolo dei tensori d'inerzia ( $L_{11}, L_{22}$  e  $L_{33}$ ). In definitiva il blocco "Leva Centrale" presenta due ingressi, `frame_d` e `frame_d1`, dove il primo blocco rappresenta il collegamento con l'asta fissa del "quadri-latero articolato" dell'elemento precedente, mentre il secondo riceve la trasmissione del moto dal blocco precedente. Le tre uscite `frame_d5`, `frame_d4` e `frame_d3`, permettono rispettivamente di trasmettere il moto allo stadio successivo, di determinare il collegamento con con l'asta fissa successiva e di effettuare una connessione ad un blocco "3d- >1d".

### 4.3.3 Il blocco "Leva Finale"

Il modello meccanico dell'ultimo blocco della catena cinematica, "Leva Finale", risulta essere composto da:

- tre blocchi `revolute`;
- un blocco `fixedTranslation`;
- due blocchi `bodyShape`.

Nelle seguenti figure vengono riportati il disegno tecnico e il modello Dymola dell'elemento "Leva Finale" che rappresenta il terminale della catena cinematica.

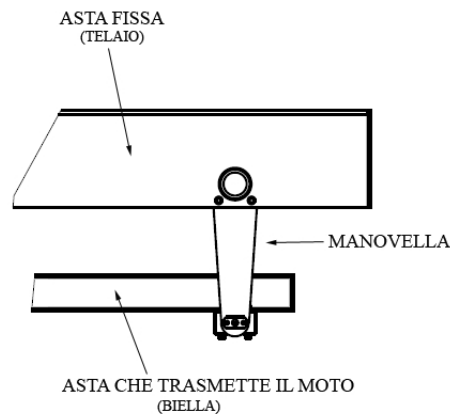


Figura 4.19: *Disegno tecnico della leva finale*

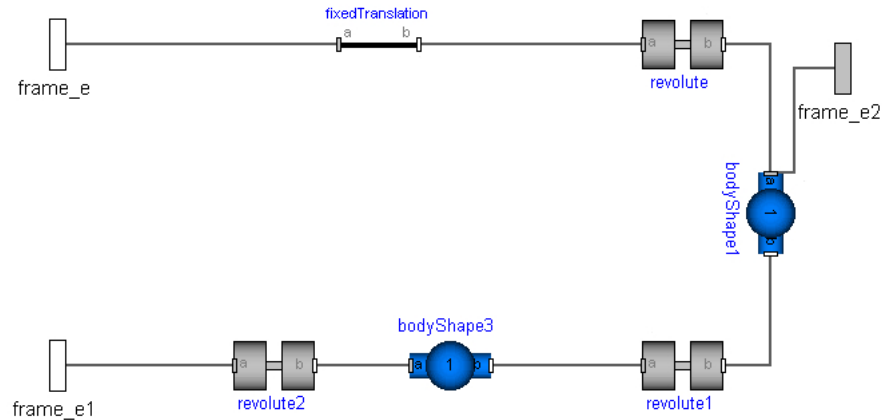


Figura 4.20: Blocco “LevaFinale”

Gli elementi `revolute` e `fixedTranslation` presentano il medesimo principio di funzionamento descritto in precedenza per gli altri due blocchi.

I componenti `bodyShape3` e `bodyShape1` rappresentano, come nel precedente blocco “Leva Centrale”, l’asta che trasmette il moto e l’ultima manovella del cinematismo, con finestre di dialogo rispettivamente riportate in *figura 4.18* e *figura 4.14*.

La principale peculiarità del blocco “Leva Finale” non è tanto la presenza dei due ingressi, rappresentati da `frame_e` e `frame_e1`, dove rispettivamente il primo risulta collegato con l’asta fissa del “quadrilatero articolato” del blocco precedente ed il secondo riceve la trasmissione del moto dal precedente blocco “Leva Centrale”, ma la presenza di una sola uscita che consente la trasmissione del moto all’ultimo riflettore del modulo sperimentale.

#### 4.3.4 Il blocco “3d- >1d”

L’ultimo elemento che resta da analizzare nel modello Dymola del cinematismo risulta essere il blocco denominato “3d- >1d”, il quale permette di trasformare il moto dal “dominio meccanico multicorpo (*Multibody*)” in quello del “dominio rotazionale” (rotational 1D), cioè di passare da un modello 3D a un modello 1D.

All’interno del blocco non sono presenti componenti delle librerie Dymola, ma un listato, riportato in *appendice A*, creato per realizzare la connessione fra i frame citati in precedenza dei vari blocchi leva ed i rispettivi specchi.

È stato necessario creare tale blocco dato che risulta praticamente impossi-

bile modellare in modo dettagliato la trasmissione per mezzo della libreria Rotational 1D, libreria impiegata invece per modellare i riflettori primari.

## 4.4 Conclusioni

In questo capitolo è stata affrontata la modellizzazione del modulo sperimentale di Fresnel e del cinematismo che permette la movimentazione dei riflettori primari.

Dalla modellizzazione del prototipo è stato evidenziato come la diversa distanza dei riflettori primari dal CPC comporti un determinato sfasamento angolare per ognuno di essi.

Dopo aver affrontato il problema dello sfasamento degli specchi, è stato creato il modello del riflettore primario. Le principali componenti di tale modello sono la rigidità torsionale, la coppia d'attrito dei cuscinetti, la coppia del vento e la coppia gravitazionale, quest'ultima dovuta al disassamento dello specchio.

Inoltre, per descrivere accuratamente il problema del cinematismo, è stato realizzato un modello nel "dominio meccanico multicorpo (Multibody)" in grado di evidenziare il funzionamento di ogni singolo pezzo della trasmissione e di permettere una migliore comprensione delle dinamiche che vengono a crearsi.

È stato poi necessario realizzare, nel modello del modulo sperimentale, un blocco che permettesse l'interazione fra il "dominio meccanico multicorpo" e il "dominio rotazionale" (rotational 1D).

Ora che il modello è stato realizzato è possibile mostrare i risultati prodotti dalle simulazioni.





# Capitolo 5

## Simulazioni del modulo sperimentale

Dopo aver analizzato il modello Dymola dell'impianto è possibile presentare i risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate sul modulo sperimentale.

Nella prima parte del capitolo dopo aver determinato lo smorzamento torsionale del riduttore, sono state presentate le caratteristiche fisiche di due riflettori primari e in seguito si è proceduto con l'individuazione dello smorzamento torsionale dello specchio.

Nella seconda parte del capitolo verrà effettuata un'analisi delle coppie che agiscono sul modulo sperimentale.

Nella terza parte del capitolo verranno presentate delle simulazioni sul posizionamento dei riflettori primari e di conseguenza verrà presentato il modello matematico il quale permette di comprendere le differenze fra i due riflettori primari.

Al termine del capitolo si è discusso del funzionamento dell'impianto in condizioni di sventamento.

### 5.1 Lo smorzamento torsionale del riduttore

Come già accennato, lo smorzamento torsionale del riduttore, non viene riportato all'interno del suo datasheet. Ecco allora che ci viene in aiuto il modello Dymola per comprendere quale sia l'influenza di tale parametro sulla risposta del sistema, in modo tale da potergli assegnare un valore.

La valutazione dell'influenza di tale parametro è stata ottenuta osservando la risposta in termini di posizione all'uscita del riduttore all'aumentare dello smorzamento. Per effettuare tale valutazione sono state eseguite delle simulazioni, nella configurazione di *figura 3.6*, dove all'uscita del riduttore è stata posta un'inerzia fittizia pari a quella di dieci specchi e su cui agiva una coppia

pari alla somma delle coppie in gioco. Ad ogni prova è stato variato il valore di smorzamento torsionale del riduttore ottenendo i risultati qui di seguito riportati:

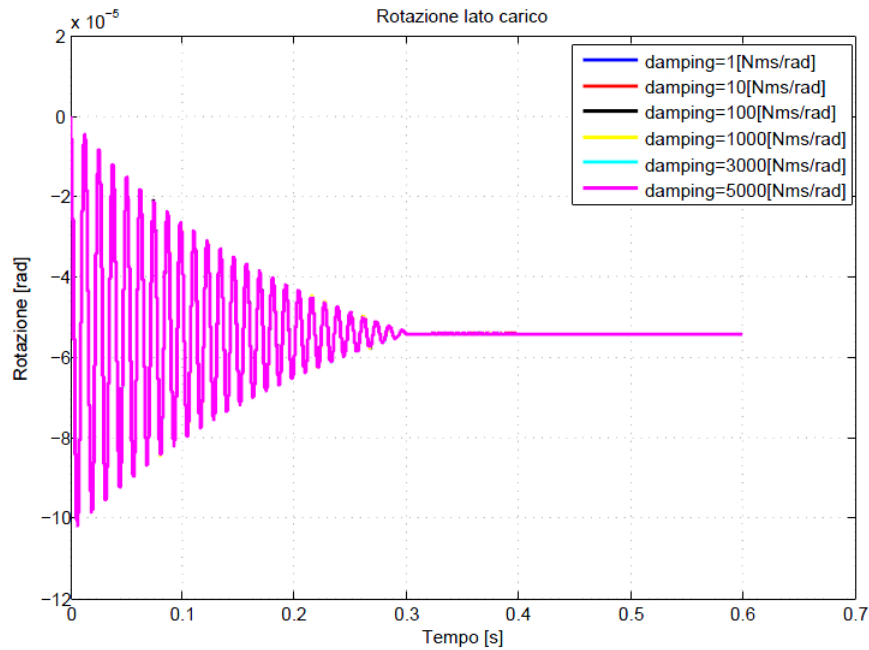


Figura 5.1: *Rotazione lato carico*

Come si può notare dalla *figura 5.1* lo smorzamento torsionale del riduttore non influisce sull'entità della rotazione all'uscita dell'albero lento. Inoltre, è stato valutato l'errore massimo tra le risposte ottenute per differenti valori di smorzamento. Tale valore è molto basso e corrisponde allo 0.000278%.

## 5.2 Le due tipologie di riflettori primari

Nel precedente capitolo è stato spiegato il modello Dymola del riflettore primario che appartiene al modulo sperimentale, ma non sono state definite le caratteristiche strutturali di questi specchi.

Per quanto riguarda il progetto due sono le tipologie di specchi che sono stati proposti.

Il primo riflettore preso in esame è il Pannello Vegaflex 0803WR10-43, mentre il secondo è il Pannello Vegaflex 0803WR10-28. Di entrambi questi oggetti vengono riportate le caratteristiche strutturali nelle seguenti tabelle:

Parametro	Simbolo	Valore numerico
Lunghezza specchio	L	4000[mm]
Larghezza specchio	W	600[mm]
Spessore specchio	$\Delta$	43[mm]
Massa	M	29[Kg]
Inerzia	$J_m$	0.87[Kg · m <sup>2</sup> ]
Rigidezza Torsionale	K	32.73[kNm/rad]
Smorzamento Torsionale	d	20.47[Nms/rad]
Braccio	b	0.0215[m]

Tabella 5.1: Tabella riassuntiva *PannelloVegaflex0803WR10* – 43

Parametro	Simbolo	Valore numerico
Lunghezza specchio	L	4000[mm]
Larghezza specchio	W	600[mm]
Spessore specchio	$\Delta$	28[mm]
Massa	M	26[Kg]
Inerzia	$J_m$	0.78[Kg · m <sup>2</sup> ]
Rigidezza Torsionale	K	5.46[kNm/rad]
Smorzamento Torsionale	d	8.36[Nms/rad]
Braccio	b	0.014[m]

Tabella 5.2: Tabella riassuntiva *PannelloVegaflex0803WR10* – 28

Date le caratteristiche strutturali dei due diversi riflettori primari la prima cosa che si può notare è la geometria molto simile dei due riflettori eccetto che per lo spessore, il quale comporta valori di rigidità torsionale molto diversi fra i due oggetti.

Inoltre i due riflettori proposti presentano un valore di massa circa uguale fra loro.

### 5.2.1 Lo smorzamento torsionale dei riflettori primari

All'interno delle precedenti tabelle è stato riportato il valore di smorzamento torsionale dello riflettore primario individuato a partire dalle caratteristiche strutturali dello specchio.

Per fare ciò si impone che lo smorzamento  $\xi$  sia pari a 0.02. Tale valore di smorzamento risulta essere altamente restrittivo (caso peggiore) e corrisponde a valori richiesti, ad esempio, per l'acciaio saldato o per il cemento armato precompresso[30].

Dato che il sistema in esame è ad un grado di libertà, per determinare il valore di smorzamento torsionale si riconduce il singolo specchio ad un sistema inerzia-molla-smorzatore.

Per determinare tale parametro è stata adottata un'inerzia di  $8[kg \cdot m^2]$ , in quanto questo valore racchiude sia la componente dovuta allo specchio che quella relativa agli elementi di supporto che lo collegano alla trasmissione.

Dato tale valore è possibile ottenere la pulsazione propria del sistema:

-Pannello Vegaflex 0803WR10-43

$$\omega_{0-43} = \sqrt{\frac{K_{43}}{J_{m-43}}} = \sqrt{\frac{32730}{8}} = 63.96 \left[ \frac{rad}{s} \right] \quad (5.1)$$

-Pannello Vegaflex 0803WR10-28

$$\omega_{0-28} = \sqrt{\frac{K_{28}}{J_{m-28}}} = \sqrt{\frac{5460}{8}} = 26.12 \left[ \frac{rad}{s} \right] \quad (5.2)$$

A questo punto lo smorzamento sarà pari a:

-Pannello Vegaflex 0803WR10-43

$$\xi_{43} = \frac{d}{2 \cdot J_{m-43} \cdot \omega_{0-43}} = 0.02 \implies d = 0.02 \cdot 2 \cdot J_{m-43} \cdot \omega_{0-43} = 20.47 \left[ \frac{N \cdot m \cdot s}{rad} \right] \quad (5.3)$$

-Pannello Vegaflex 0803WR10-28

$$\xi_{28} = \frac{d}{2 \cdot J_{m-28} \cdot \omega_{0-28}} = 0.02 \implies d = 0.02 \cdot 2 \cdot J_{m-28} \cdot \omega_{0-28} = 8.36 \left[ \frac{N \cdot m \cdot s}{rad} \right] \quad (5.4)$$

dove il primo valore di smorzamento torsionale si riferisce al Pannello Vegaflex 0803WR10-43 ed il secondo valore al Pannello Vegaflex 0803WR10-28. Tali parametri sono stati qui calcolati e poi riportati nelle precedenti *tabelle 5.1 e 5.2*.

### 5.3 Le coppie lato carico

Ora che sono stati definiti tutti i parametri da inserire all'interno del modello, è possibile analizzare quali sono le coppie in gioco. A tale scopo è stato scelto d'impiegare il Pannello Vegaflex 0803WR10-43 in quanto risulta avere una massa maggiore e quindi introduce coppie gravitazionali più elevate. Analizzando il prototipo è possibile scoprire cinque diverse tipologie di coppie, le quali sono riassumibili in:

- coppie gravitazionali dei riflettori;
- coppie dovute al vento;
- coppie dovute all'attrito dei cuscinetti;
- coppie d'inerzia dei riflettori;
- coppia della trasmissione.

Di seguito verrà proposta un'analisi approfondita di ognuna di esse.

#### 5.3.1 La coppia gravitazionale dei riflettori

Il primo termine di coppia che verrà presentata è la coppia gravitazionale la quale, come discusso nel *paragrafo 4.2*, viene a generarsi come conseguenza del disassamento dello specchio.

La prima peculiarità di tale coppia è determinata dal fatto che il suo contributo è variabile nel corso della giornata. Partendo dalle caratteristiche del pannello riflettente, riportate nella *tabella 5.1*, è possibile determinare a quale ora della giornata si verifica il valore massimo di tale coppia.

Per far ciò si è simulato, con moto rotativo continuo, il prototipo per un arco di tempo pari a quattro giorni partendo dalle ore 00 : 01 del giorno 21 giugno. Si è adottato un moto rotativo continuo per poter snellire i tempi delle

simulazioni. In questo modo si è supposto di porre la velocità degli specchi ad un valore pari a  $0.000036361[\text{rad}/\text{s}]$ , il quale risulta essere la velocità media del sole durante l'arco di un intero anno.

Il risultato che si ottiene risulta essere il seguente:

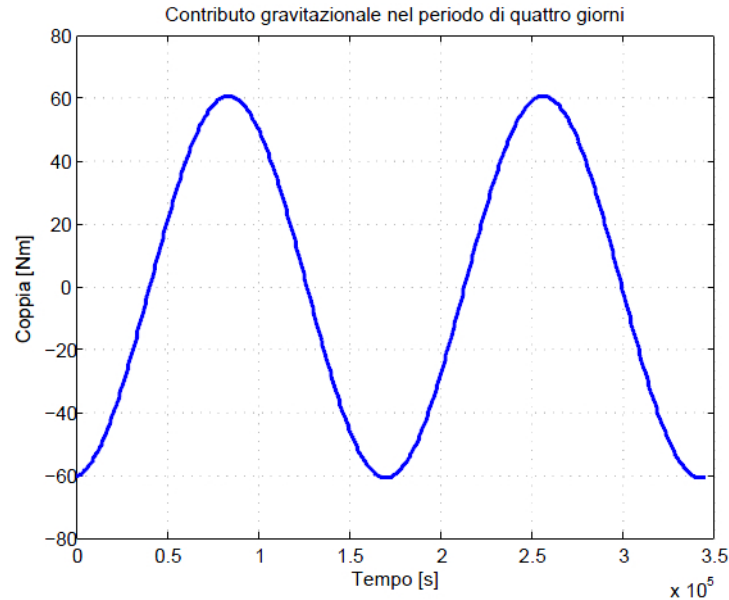


Figura 5.2: Coppia gravitazionale nell'arco di quattro giorni di funzionamento dell'impianto

Dalla *figura 5.2* si evince che nel periodo simulato i riflettori primari compiono circa due giri completi. Allora risulta possibile supporre che la rotazione angolare eseguita dagli specchi in una giornata è circa pari ad un quarto del risultato ottenuto dalla *figura 5.2*, cioè circa pari a  $180^\circ$ . Ne consegue che nelle ore di sole la rotazione massima degli specchi sarà di  $90^\circ$ .

Un'altra caratteristica ricavabile dalla *figura 5.2* è dettata dal fatto che dopo  $83635[\text{s}]$  di simulazione, l'andamento della coppia gravitazionale presenta il suo massimo.

In altre parole dato che la simulazione ha inizio alle ore 00 : 01 del 21 giugno, trasformando il valore di  $83635[\text{s}]$  in ore, si ottiene che il valore massimo della coppia si presenta circa alle ore 23 : 30 del medesimo giorno ed assume la quota di  $60.73[\text{Nm}]$ .

Il valore del massimo contributo gravitazionale non risulta importante ai fini del posizionamento dei riflettori primari, dato che all'ora determinata il prototipo risulterà non funzionante, ma è di particolare importanza per le operazioni di riposizionamento degli specchi o per lo sventamento di tali ele-

menti in caso di intemperie.

Individuato il massimo contributo della coppia gravitazionale, resta da determinare il peso che ha questo effetto sul posizionamento dei riflettori primari durante le ore di funzionamento del prototipo.

Si è parlato di coppia che influenza il posizionamento in quanto essendo lo specchio cedevole, ad un aumento della coppia applicata si avrà un aumento dei cedimenti.

Innanzitutto è importante evidenziare come esista un limite temporale sul funzionamento dell'impianto. Tale limite temporale determina una fascia di funzionamento del prototipo che garantisce un determinato valore di rendimento globale del modulo sperimentale. Infatti ad un certo istante i raggi solari riflessi saranno così deboli da rendere insoddisfacente il rendimento del prototipo.

A priori è stato stabilito per il giorno in esame il pieno funzionamento del prototipo dalle ore 6 : 30 alle ore 20 : 00. Risulta necessario individuare all'interno di tale fascia di funzionamento il valore temporale in cui l'effetto gravitazionale presenterà il suo picco.

Allora, riprendendo l'immagine di *figura 5.2* e andando ad eseguire uno zoom sulla parte interessata, come riportato in *figura 5.3*, si stabilisce che il picco della coppia gravitazionale lo si ottiene alle ore 20 : 00.

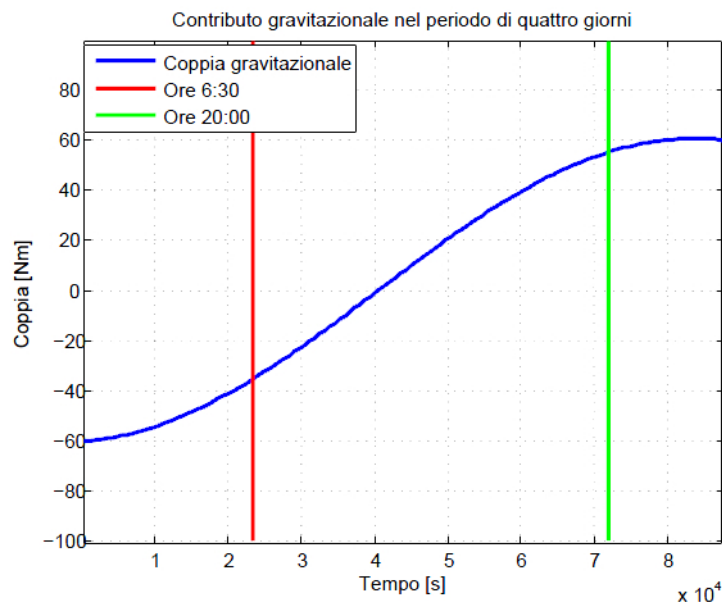


Figura 5.3: Coppia gravitazionale nel corso delle ore di funzionamento dell'impianto

Essendo giunti alla conclusione che il picco della coppia gravitazionale risulta essere nel tardo pomeriggio, prima di presentare i risultati ottenuti, viene qui di seguito riportata una rappresentazione qualitativa del posizionamento degli specchi alle ore 20 : 00, in modo tale da chiarire quale specchio sarà maggiormente sollecitato dall'azione della coppia gravitazionale.

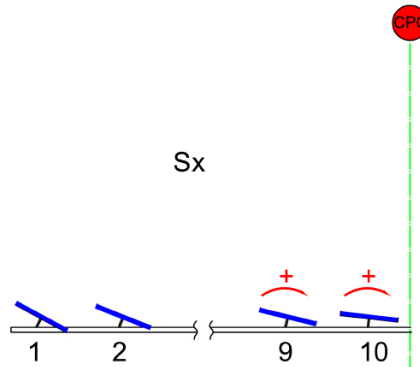


Figura 5.4: Posizionamento qualitativo degli specchi alle ore 20 : 00

Dalla *figura 5.4* si evince che lo specchio maggiormente sollecitato risulta essere il N°1.

Tale considerazione viene rafforzata dai risultati di coppia gravitazionale sui singoli riflettori primari riportati qui di seguito.

Specchio	Coppia gravitazionale [Nm]
N°1	5.64
N°2	5.57
N°3	5.48
N°4	5.39
N°5	5.28
N°6	5.14
N°7	4.98
N°8	4.81
N°9	4.61
N°10	4.38

Tabella 5.3: Coppie gravitazionali sugli specchi alle ore 20 : 00

Anche i risultati ottenuti dalle simulazioni confermano che lo specchio maggiormente sollecitato risulta essere il N°1.



### 5.3.2 La coppia generata dal vento

Un'altra coppia agente sul prototipo risulta essere quella causata dall'effetto del vento determinata per mezzo di analisi fluido dinamiche con pacchetto software agli elementi finiti (CFD).

Il progetto dell'impianto e di conseguenza il dimensionamento della struttura portante degli specchi è stata effettuata secondo la normativa vigente, mentre per quanto riguarda le specifiche di funzionamento del prototipo esse sono più restrittive. Infatti, le specifiche richieste, sono state valutate con simulazioni CFD in cui la velocità del vento risulta essere supposta pari a  $10[m/s]$ .

Questo valore rappresenta il valore massimo di velocità del vento entro il quale deve essere garantito il posizionamento dei riflettori primari rispettando le tolleranze di progetto.

La seguente tabella ha lo scopo di presentare i valori di coppia generati dal vento sul singolo riflettore primario calcolati nel modo detto.

Specchio	Effeto del vento [Nm]
$N^{\circ}1$	5.2
$N^{\circ}2$	0.3
$N^{\circ}3$	-2
$N^{\circ}4$	-2.8
$N^{\circ}5$	-3.3
$N^{\circ}6$	-1.4
$N^{\circ}7$	-1.4
$N^{\circ}8$	-2.7
$N^{\circ}9$	-0.6
$N^{\circ}10$	-0.8

Tabella 5.4: Coppie generate dal vento

Come si intuisce dalla *tabella 5.4* si è supposto che il vento soffi da Ovest verso Est, quindi lo specchio maggiormente sollecitato risulta essere il  $N^{\circ}1$ . Inoltre la *tabella 5.4* mostra valori di coppie del vento positivi e negativi che si ripercuotono anche sugli altri specchi e non solo su quello maggiormente esposto. Dal momento che le componenti di coppia verranno generate anche da fenomeni vorticosi e di distacco, si avranno valori di coppia sia positivi che negativi che si ripercuotono non solo sullo specchio più esposto al fenomeno ventoso.

Tali coppie generano un contributo molto significativo anche sugli specchi  $N^{\circ}4$  e  $N^{\circ}5$ .

### 5.3.3 La coppia generata dall'attrito dei cuscinetti

Per determinare la coppia totale necessaria a movimentare i riflettori primari si deve prendere in esame la coppia d'attrito generata dai cuscinetti (due per ogni specchio) che sorreggono i dieci specchi.

La funzione dei cuscinetti è quella di interporsi tra due organi in rotazione reciproca, permettendone la rotazione con il minimo attrito possibile.

Due sono le diverse tipologie di cuscinetti implementate all'interno del modulo sperimentale:

- cuscinetti a strisciamento: realizzati con metalli bianchi, leghe a base di rame/alluminio o resine plastiche in modo tale da garantire un basso coefficiente d'attrito;
- cuscinetti volventi (a sfere o a rulli): nei quali il rotolamento viene ottenuto con l'interposizione fra perno e supporto di una corona di corpi rotanti. Questi cuscinetti vengono anche denominati cuscinetti a rotolamento.

I vantaggi della prima categoria sono determinati dal fatto che sono più silenziosi, assorbono meglio vibrazioni ed urti, hanno minor ingombro radiale, presentano una maggiore facilità di montaggio e sono meno costosi.

La seconda categoria presentata ha un minore ingombro assiale ed è svincolata dal materiale con cui è realizzato l'albero.

Un'ulteriore vantaggio presentato dai cuscinetti volventi è determinato dal basso coefficiente d'attrito. Tale parametro fa in modo che anche l'attrito di primo distacco sia molto contenuto, circa pari a due volte quello che si osserva in condizione di regime. Inoltre anche gli effetti del carico, della velocità e della temperatura sull'attrito sono trascurabili al contrario di quanto avviene nei cuscinetti a strisciamento.

La seguente relazione, già presentata nel *paragrafo 4.2*, esprime la coppia generata a regime da due generici cuscinetti.

$$tau_a = M \cdot 9.81 \cdot \mu \cdot d \quad (5.5)$$

in cui  $d$  è il diametro del cuscinetto ed è pari a  $50[mm]$ .

Le principali differenze fra le due tipologie di cuscinetti vengono riassunte nella seguente tabella:

Cuscinetto	Attrito statico	Rapp.coeff.statico-dinamico
Strisciamento	$\mu_s = 0.24$	$\mu_{peak_s} = 1$
Rotolamento	$\mu_r = 0.0015$	$\mu_{peak_r} = 2$

Tabella 5.5: Parametri dei cuscinetti

Dai dati riportati nella precedente tabella, ed utilizzando la formula (5.5) è possibile calcolare la coppia generata dalle due differenti tipologie di cuscinetti. I risultati di coppia totale per venti cuscinetti sono riportati nella seguente tabella:

Cuscinetto	Coppia Tot a regime [Nm]	Coppia Tot di spunto [Nm]
Strisciamento	34.14	34.14
Rotolamento	0.21	0.42

Tabella 5.6: Coppie d'attrito generate dai cuscinetti

I risultati ottenuti consentono di concludere che il cuscinetto a rotolamento pur presentando un valore doppio di rapporto fra coefficiente statico e dinamico, presenta una coppia totale sia allo spunto che a regime molto minore di quella di un cuscinetto a strisciamento. Se si vuole salvaguardare l'aspetto economico è necessario puntare sui cuscinetti a strisciamento, al contrario però, vista l'elevata coppia che introducono, potrebbero verificarsi fenomeni d'impuntamento (stick slip).

### 5.3.4 La coppia d'inerzia dei riflettori

Dopo aver analizzato il contributo dovuto all'attrito è possibile prendere in esame il contributo della coppia d'inerzia che è ovviamente determinata dall'accelerazione che viene inflitta agli specchi durante la movimentazione. Nel caso di normale funzionamento dell'impianto è stato possibile determinare la velocità di un riflettore primario partendo dalla sua posizione e derivandola. Per mezzo di un'ulteriore derivazione si ottiene quindi l'accelerazione. Le figure che seguono mostrano la posizione, la velocità e l'accelerazione di uno specchio ad un singolo step del motore.

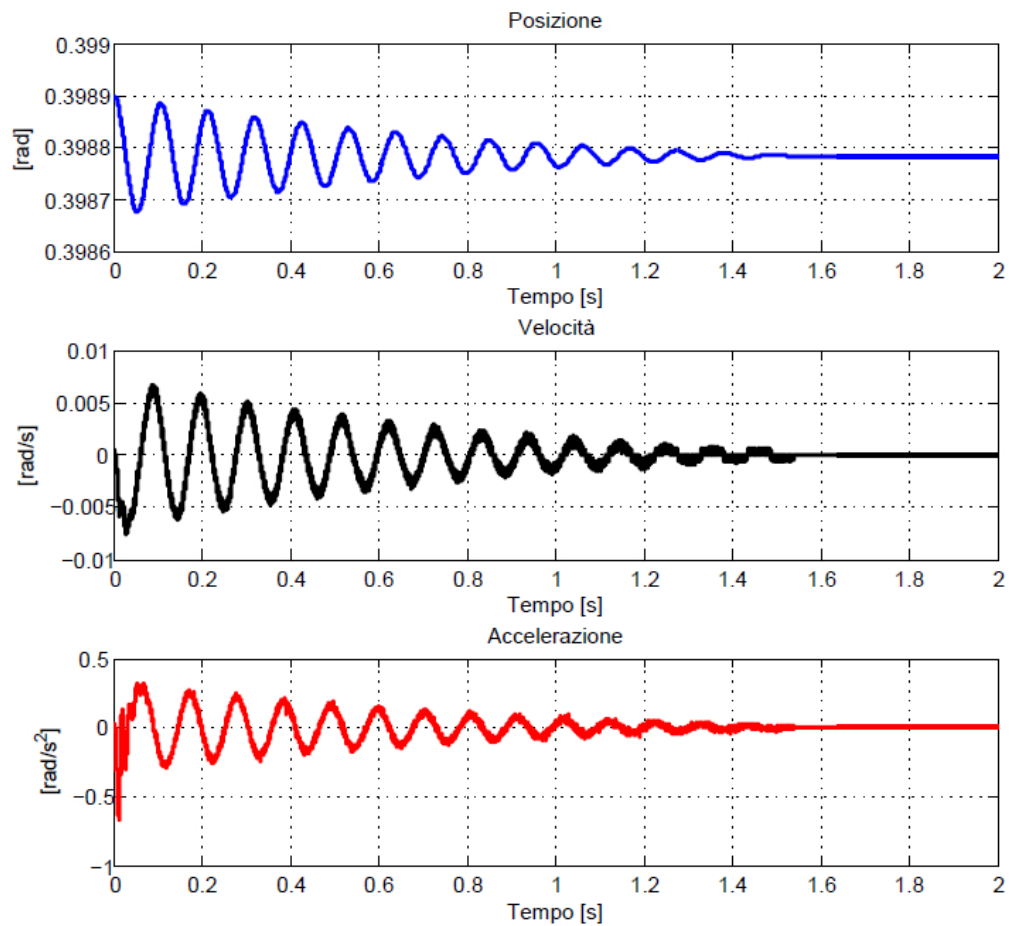


Figura 5.5: *Posizione, velocità e accelerazione di uno specchio per uno step lato motore*

Dal grafico della posizione di *figura 5.5* è possibile notare delle oscillazioni proprie del sistema. Tali oscillazioni sono determinate dalla natura del moto, perché ogni step del motore corrisponde ad un gradino di posizione il quale determina la risposta del sistema visibile in *figura 5.5*. La pulsazione di queste oscillazioni è riconducibile al valore determinato nella (5.1) per il Pannello Vegaflex 0803WR10-43. Conseguentemente le oscillazioni si ritrovano anche nella velocità e nell'accelerazione.

A questo punto è possibile valutare la coppia d'inerzia di uno specchio moltiplicando il valore di accelerazione precedentemente ricavato per il momento d'inerzia. La seguente figura mostra il risultato ottenuto:

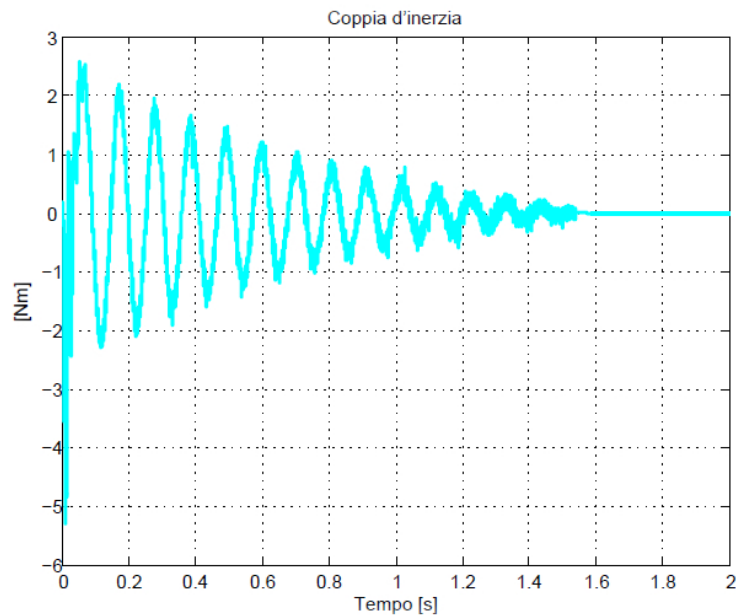


Figura 5.6: *Coppia d'inerzia generata nel normale funzionamento*

Escludendo i primi istanti in cui la variabile viene inizializzata, si evince dalla *figura 5.6* che il valore della coppia d'inerzia risulta essere pari a  $2.44[Nm]$  e confrontabile con i valori determinati per gli altri contributi di coppia.

### 5.3.5 La coppia della trasmissione

L'ultimo contributo da vagliare risulta essere la coppia della trasmissione. Tale coppia viene a generarsi durante il funzionamento del prototipo a causa della forza gravitazionale che agisce sulla trasmissione.

Come accadeva per la coppia gravitazionale, anche tale coppia presenta la peculiarità di aver un contributo variabile nel corso della giornata a seconda dell'angolo di posizionamento della trasmissione (bielle e manovelle). Per determinare il valore massimo di tale coppia si è supposto di simulare la trasmissione per un arco di tempo che va dalle ore 6 : 30 alle ore 20 : 00.

La simulazione è stata eseguita come in precedenza descritto per la coppia gravitazionale, cioè facendo eseguire alla trasmissione un moto rotativo continuo il quale ha permesso di snellire le tempistiche legate alle simulazioni.

Il risultato ottenuto viene qui di seguito riportato:

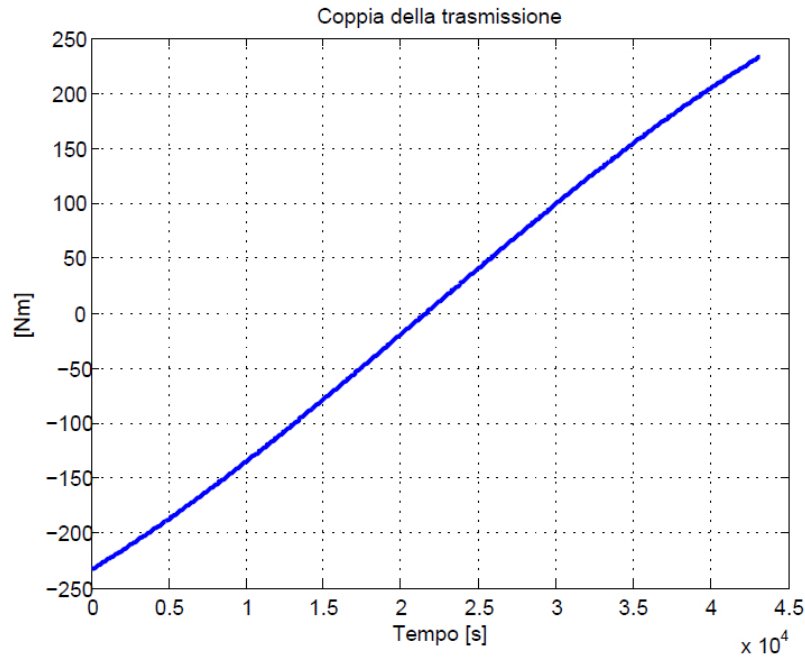


Figura 5.7: *Andamento della coppia della trasmissione*

Dalla *figura 5.7* è possibile notare che la coppia della trasmissione presenta un massimo ed un minimo uguali in modulo ( $233.28[Nm]$ ) ma di segno opposto. Tali valori corrispondono rispettivamente alle ore finali ed a quelle iniziali della giornata. Quanto ottenuto era plausibile dato che circa a mezzogiorno il contributo di coppia sarà pressoché nullo e le manovelle della trasmissione saranno perfettamente perpendicolari al terreno.

Il valore di coppia della trasmissione ricavato risulta essere maggiore del valore di coppia gravitazionale degli specchi.

Questa situazione è determinata dal fatto che la trasmissione abbina ad un proprio valore di massa piuttosto elevato (circa la metà di quella corrispondente a dieci specchi) un braccio consistente (circa quattordici volte più grande di quello dello specchio).

### 5.3.6 Incidenza dei contributi di coppia analizzati

Noti tutti i contributi di coppia agenti sul modulo sperimentale è interessante valutare il peso percentuale di ognuno di essi rispetto alla coppia totale.

Per poter eseguire tale analisi ci si avvale della tabella riassuntiva delle coppie qui di seguito riportata.

Specchio	Gravità [Nm]	Vento [Nm]	Cuscinetti strisciamento [Nm]	Cuscinetti a rotolamento [Nm]	Coppia d'inerzia [Nm]	Coppia della trasmissione [Nm]
N°1	5,64	5,2	3,41	0,021	2,44	23,32
N°2	5,57	0,3	3,41	0,021	2,44	23,32
N°3	5,48	-2	3,41	0,021	2,44	23,32
N°4	5,39	-2,8	3,41	0,021	2,44	23,32
N°5	5,28	-3,3	3,41	0,021	2,44	23,32
N°6	5,14	-1,4	3,41	0,021	2,44	23,32
N°7	4,98	-1,4	3,41	0,021	2,44	23,32
N°8	4,81	-2,7	3,41	0,021	2,44	23,32
N°9	4,61	-0,6	3,41	0,021	2,44	23,32
N°10	4,38	-0,8	3,41	0,021	2,44	23,32
<b>Totale colonna [Nm]</b>	<b>51,28</b>	<b>20,5</b>	<b>34,1</b>	<b>0,21</b>	<b>24,4</b>	<b>233,2</b>

Figura 5.8: Tabella riassuntiva delle varie tipologie di coppie

Supponendo di impiegare i cuscinetti a strisciamento, quindi di porci nella situazione più critica, è possibile sommare i contributi dell'ultima riga di figura 5.8 per ottenere il valore della coppia massima lato carico.

$$C_{massima} = 51.28 + 20.5 + 34.1 + 24.4 + 233.2 = 363.48[Nm] \quad (5.6)$$

Come già detto in precedenza, tale valore di coppia è quello che si ottiene alle ore 20 : 00, il quale risulta così distribuito in termini percentuali:

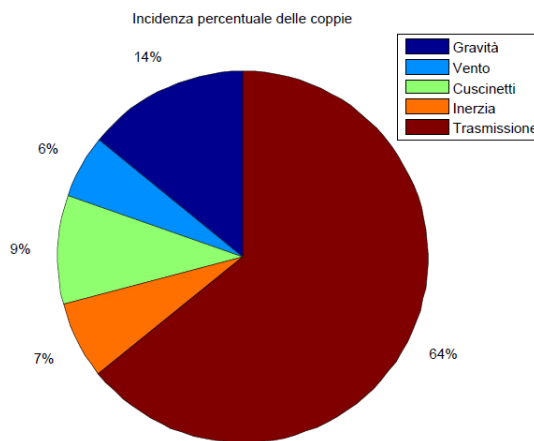


Figura 5.9: Incidenza percentuale delle varie coppie

Dal grafico di figura 5.9 si nota che il valore di coppia della trasmissione risulta essere poco più di quattro volte superiore alla coppia gravitazionale degli specchi.

Inoltre i contributi di coppia del vento, coppia d'inerzia ed attrito dei cuscinetti risultano essere trascurabili se paragonati alla coppia della trasmissione. Essendo il modulo sperimentale un esempio dimostrativo di un parco specchi composto da 80 o 160 specchi, è possibile estendere quanto qui ricavato all'intero parco specchi. In altre parole si determina che la coppia totale assume un valore pari a  $1275.44[Nm]$  e  $2317,68[Nm]$  rispettivamente per 80 e 160 specchi.

Ottenuto il valore di coppia massima è possibile ricavare il valore della coppia motrice dividendo il valore di coppia massimo per il rapporto di riduzione che, come descritto in precedenza, risulta essere pari a 220. Tale valore è stato ottenuto trascurando l'efficienza del riduttore che è elevata e pari al 92%.

La coppia motrice risulta essere pari a  $1.65[Nm]$  nel caso del modulo sperimentale, quindi il motore adottato permetterà la movimentazione dei riflettori primari.

Nel caso di 80 o 160 specchi, la coppia motrice sarà rispettivamente pari a  $5.79[Nm]$  e  $10.53[Nm]$  e quindi il motore scelto movimenterà il parco da 80 specchi, ma non sarà in grado di movimentare il parco da 160 specchi, il quale richiederà un motore di diversa taglia.

Come citato più volte, la coppia gravitazionale dei riflettori e la coppia della trasmissione sono due contributi variabili nell'arco della giornata, quindi il loro contributo, in alcuni periodi della giornata, potrebbe essere inferiore a quello di altri contributi di coppia.

Supponiamo di effettuare le valutazioni di incidenza percentuale delle coppie a mezzogiorno, il risultato che si ottiene è quello qui di seguito riportato:

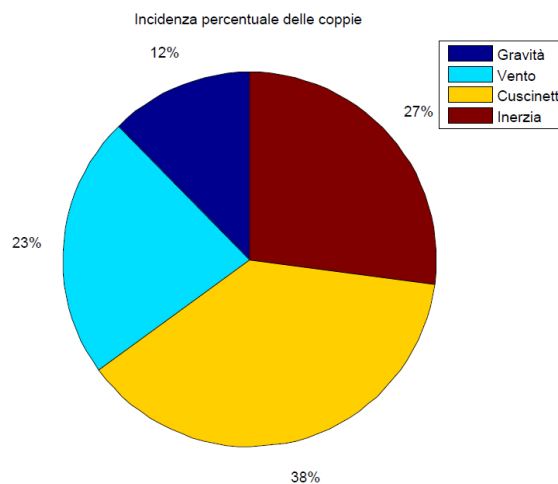


Figura 5.10: Incidenza percentuale delle varie coppie a mezzogiorno



Dalla figura è possibile osservare come sia sparito il contributo della coppia della trasmissione e come si sia leggermente attenuato quello della coppia gravitazionale rispetto a quanto ricavato in *figura 5.9*. Il fatto che il contributo gravitazionale degli specchi non scompaia completamente è dovuto all'angolo di sfasamento che esiste fra uno specchio e l'altro. Tale situazione comporta l'introduzione da parte di alcuni specchi di un lieve effetto dovuto alla gravità, mentre da parte di altri un contributo nullo.

Ecco allora che a metà giornata il contributo di coppia dominante sarebbe quello dei cuscinetti a strisciamento, ma nel caso si utilizzassero cuscinetti a rotolamento diverrebbe predominante il contributo della coppia d'inerzia e della coppia del vento se effettivamente questi fosse presente alla velocità di  $10[m/s]$ .

Inoltre, a differenza di quanto ottenuto alle ore 20 : 00, il valore di coppia totale risulta essere pari a  $90.15[Nm]$ .

I risultati proposti in questo paragrafo hanno mostrato una certa variabilità in alcune delle componenti della coppia totale. Tali analisi hanno quindi permesso di individuare quali sono i momenti della giornata più critici dal punto di vista della coppia e conseguentemente di definire il valore massimo di coppia richiesta dal carico.

Sulla base di questo valore sarà quindi possibile selezionare l'attuatore che movimenterà i riflettori dell'impianto definitivo.

### 5.3.7 Determinazione del contributo di coppia durante la movimentazione degli specchi

Dopo aver determinato il valore di coppia totale agente sul modulo sperimentale nella condizione più critica della giornata, resta da effettuare una distinzione fra le coppie agenti durante il transitorio di movimentazione e le coppie agenti sul modulo in condizioni di moto a regime.

Come detto precedentemente, ad ogni step del motore corrisponde un gradino di posizione che si ripercuote sul carico. La risposta del carico è composta da una prima fase oscillante legata al transitorio ed una seconda fase in cui il carico giunge a regime.

Durante il transitorio, in modo particolare alle ore 20 : 00 della giornata, l'uscita del riduttore equilibrerà la somma delle coppie prima elencate, il cui valore è dato dalla (5.6). Nel precedente paragrafo, partendo dal valore di coppia totale, è stata determinata la coppia motrice la quale rappresenta la coppia che il motore dovrà vincere per poter eseguire il moto, cioè per effettuare un passo. Va sottolineato che il valore di coppia determinato in precedenza rappresenta il valore di picco della coppia del motore. In altre parole la coppia agente sul modulo sperimentale risulterà avere valori molto diversi durante

l'arco della giornata, ma il valore di picco della coppia risulta di fondamentale importanza per la scelta della taglia dell'attuatore atto a movimentare dieci o più riflettori primari.

In condizioni di regime del moto, cioè nella condizione di mantenimento della posizione degli specchi, la coppia richiesta dal carico è molto inferiore a quella definita dalla (5.6). In questa situazione il valore della coppia d'inerzia, essendo il carico fermo, sarà nullo mentre l'attrito dei cuscinetti determinerà un'azione di aiuto al mantenimento del carico in una data posizione. Infatti la coppia generata dall'attrito dei cuscinetti si oppone al moto e deve essere vinta solo se si desidera movimentare il carico. Quindi per mantenere la posizione degli specchi, questa coppia agisce in modo vantaggioso nell'impedire al carico di ruotare. Per quanto riguarda la coppia del vento e le coppie gravitazionali, il loro contributo risulta essere il medesimo visto in precedenza. In altre parole il valore di coppia totale agente sul modulo sperimentale alle ore 20 : 00 è pari a:

$$C_{nominale} = 51.28 + 20.5 - 34.1 + 233.2 = 270.88[Nm] \quad (5.7)$$

Il valore di coppia determinato risulta essere il valore di coppia nominale del motore cioè quella coppia che il motore dovrà erogare per mantenere il carico bloccato in quella situazione. Va sottolineato come in questa situazione l'utilizzo di un cuscinetto a strisciamento favorisca notevolmente il posizionamento del riflettore primario all'impiego di un cuscinetto volvente.

## 5.4 Prestazioni dei pannelli Vegaflex

Dopo aver mostrato le caratteristiche strutturali dei pannelli in esame e dopo aver individuato tutte le coppie in gioco, è possibile effettuare delle simulazioni per comprendere quali sono le prestazioni in termini di posizionamento dei due pannelli.

Lo scopo delle simulazioni eseguite riguarda il corretto posizionamento dei riflettori primari. In altre parole si tratta di verificare che il posizionamento dello specchio rimanga all'interno della banda di tolleranza di  $1.5[mrad]$  definita dalle specifiche di progetto.

È stato possibile eseguire solo ora queste simulazioni in quanto i risultati ottenuti all'interno del *paragrafo 5.3* hanno permesso di concludere che l'orario più critico di funzionamento è attorno alle ore 20 : 00.

Questa è un'operazione necessaria in quanto, essendo i riflettori cedevoli, tenderanno a deformarsi per effetto del proprio peso e dell'attrito, compromettendo il corretto posizionamento.

Qui di seguito vengono riportati i grafici riguardanti il posizionamento del

primo e del decimo riflettore primario di ognuna delle due tipologie di pannello alle ore 20 : 00 del giorno 21 giugno 2010.

Le simulazioni sono state eseguite supponendo un vento da Ovest verso Est alla velocità di  $10[m/s]$  e supponendo di impiegare dei cuscinetti volventi.

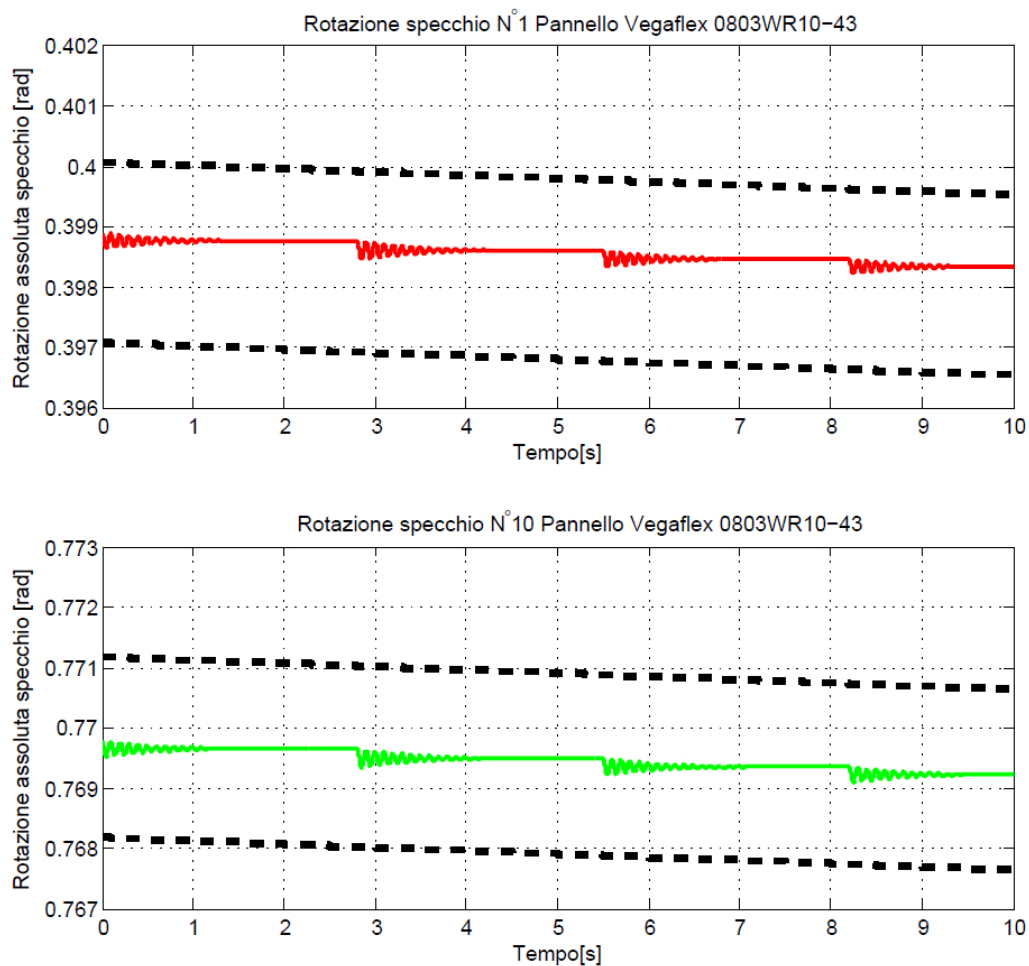


Figura 5.11: Rotazione assoluta del primo e decimo Pannello Vegaflex 0803WR10-43

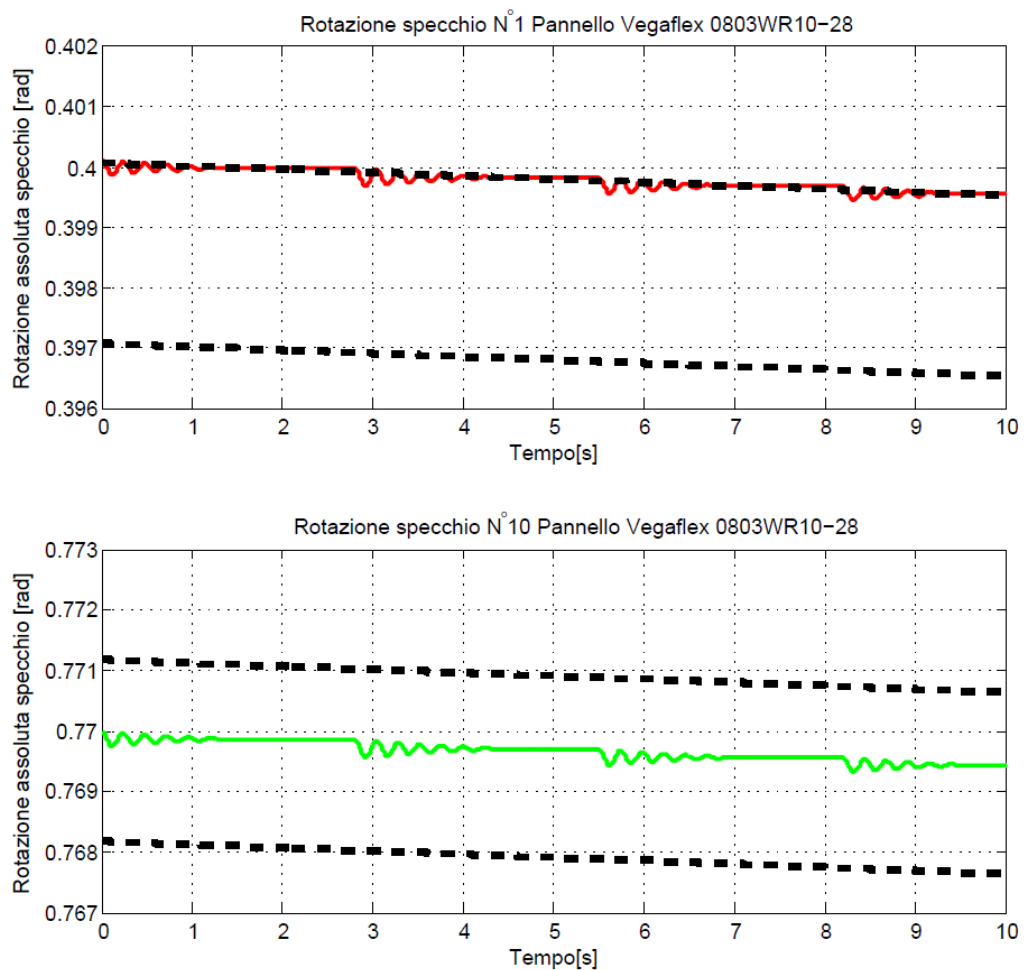


Figura 5.12: Rotazione assoluta del primo e decimo Pannello Vegaflex 0803WR10-28

Le due linee nere tratteggiate, riportate nelle varie figure precedenti, individuano la banda di tolleranza assoluta riferita al posizionamento del riflettore primario considerato.

Si può notare che tale banda ha un'ampiezza di  $1.5[mrad]$  ed è stata costruita attorno alla posizione esatta che dovrebbe assumere lo specchio (quella generata dall'algoritmo di tracking solare).

Dai risultati ottenuti si evidenzia che con il Pannello Vegaflex 0803WR10-43 tutti e dieci i riflettori primari rispetteranno le specifiche d'errore sul posizionamento. Infatti, come descritto in precedenza, lo specchio N°1 risulta essere quello più sollecitato dalle coppie in gioco, ma dato che questi si posiziona all'interno della banda di tolleranza è possibile considerare anche gli altri nove

specchi all'interno di tale intervallo d'errore.

Per quanto riguarda il Pannello Vegaflex 0803WR10-28 è possibile notare che lo specchio  $N^{\circ}1$  si posiziona proprio al limite della banda di tolleranza mentre tutti gli altri specchi rispetteranno in pieno le specifiche richieste.

Le principali motivazioni che portano a questa differenza fra i due pannelli sono l'elevata massa del Pannello Vegaflex 0803WR10-28 (paragonabile a quella del Pannello Vegaflex 0803WR10-43) a cui si aggiunge una bassa rigidità torsionale.

Risulta chiaro che essendo lo specchio cedevole più coppia gli si applica, maggiore sarà l'entità del suo cedimento. Quindi, a parità di coppia applicata, lo specchio più rigido è quello che introduce l'errore minore. Tale situazione è ben visibile nelle *figure 5.11 e 5.12*.

Per poter meglio comprendere quanto è stato appena affermato è possibile scrivere l'equazione di moto dello specchio. Come definito più volte in precedenza è possibile non considerare il contributo inerziale e quello smorzante del riflettore primario a causa della bassissima velocità e accelerazione, con cui viene eseguita la movimentazione degli specchi. Tutto ciò permette di scrivere le equazioni del sistema specchio esclusivamente a regime.

Rifacendoci alla schematizzazione del blocco "Specchio", qui di seguito riportata, è possibile impostare il seguente equilibrio meccanico:

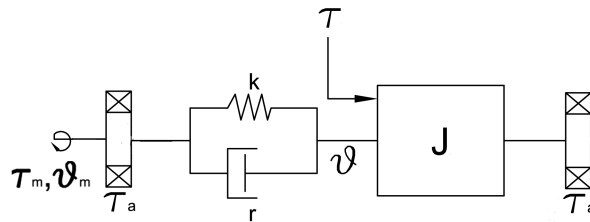


Figura 5.13: Schematizzazione del blocco "Specchio"

$$k \cdot (\theta_1 - \theta_m) = \tau_1 \tag{5.8}$$

da cui si ottiene:

$$\theta_1 = \theta_m + \frac{\tau_1}{k} \tag{5.9}$$

Ripetendo quanto appena illustrato, considerando la presenza della coppia d'attrito generata dai cuscinetti, si ottiene che:

$$\theta_1 - \theta_m = \frac{\tau_1 - 2 \cdot \tau_A}{k} \tag{5.10}$$

La (5.10) conferma quanto sostenuto in precedenza, ovvero che aumentando la rigidità dello specchio si ottiene la riduzione dell'errore di posizionamento

espresso da  $\theta_1 - \theta_m$ .

Inoltre la (5.10) permette di comprendere come l'uso del cuscinetto volvente rappresenti il caso peggiore per quanto riguarda l'errore di posizionamento dei riflettori, ma tuttavia tali cuscinetti sono meno propensi a fenomeni d'impuntamento.

## 5.5 L'azione di sventamento

Come accennato in precedenza lo sventamento viene eseguito nel caso di condizioni atmosferiche critiche (ad esempio in caso di neve, grandine o vento con velocità superiore ai  $15[m/s]$ ) o al termine di ogni giornata per proteggere gli specchi durante la notte.

Dalle specifiche di progetto la velocità che il carico deve assumere nella condizione di sventamento risulta essere pari a  $0.5[^\circ/s]$ , che trasformato in radianti risulta essere pari a  $0.0087[rad/s]$ .

Data la velocità a cui il carico si deve muovere, è necessario determinare la velocità lato motore che quest'ultimo deve rispettare. Tale valore viene determinato partendo dalla velocità del carico e moltiplicando quest'ultima per il fattore di riduzione applicato dal riduttore. In definitiva, la velocità che si ottiene lato motore risulta essere pari a  $1.914[rad/s]$ .

Il parametro appena determinato è di fondamentale importanza per individuare la frequenza con cui debbono essere eseguiti gli step da parte del motore. Dato che il motore utilizzato per l'applicazione è un motore da  $200[passi/giro]$ , si avrà che:

$$\theta_m = \frac{2\pi}{200} = 0.031415[rad] \quad (5.11)$$

in cui  $\theta$  è l'angolo che l'attuatore compie ogni qual volta che esegue un passo. Fissata l'ampiezza del passo, per ottenere la velocità  $\omega_m$  lato motore precedentemente calcolata, i passi devono presentare la seguente durata:

$$T_{step} = \frac{\theta_m}{\omega_m} = \frac{0.031415[rad]}{1.914 \frac{[rad]}{[sec]}} = 0.0164[sec] \quad (5.12)$$

che corrisponde al seguente stepping rate:

$$f_{step} = \frac{1}{T_{step}} = \frac{1}{0.0164} = 60.92[Hz] \quad (5.13)$$

A questo punto è interessante valutare cosa succede alla coppia totale lato carico in caso di sventamento. Risulta chiaro che le uniche due componenti di coppia che non subiranno variazioni, rispetto alla situazione di normale

funzionamento, sono: l'azione del vento e l'attrito dei cuscinetti. Eseguendo la procedura precedentemente descritta per la fase di normale funzionamento dell'impianto ed applicandola all'azione di sventamento, si è giunti ai seguenti risultati qui di seguito rappresentati:

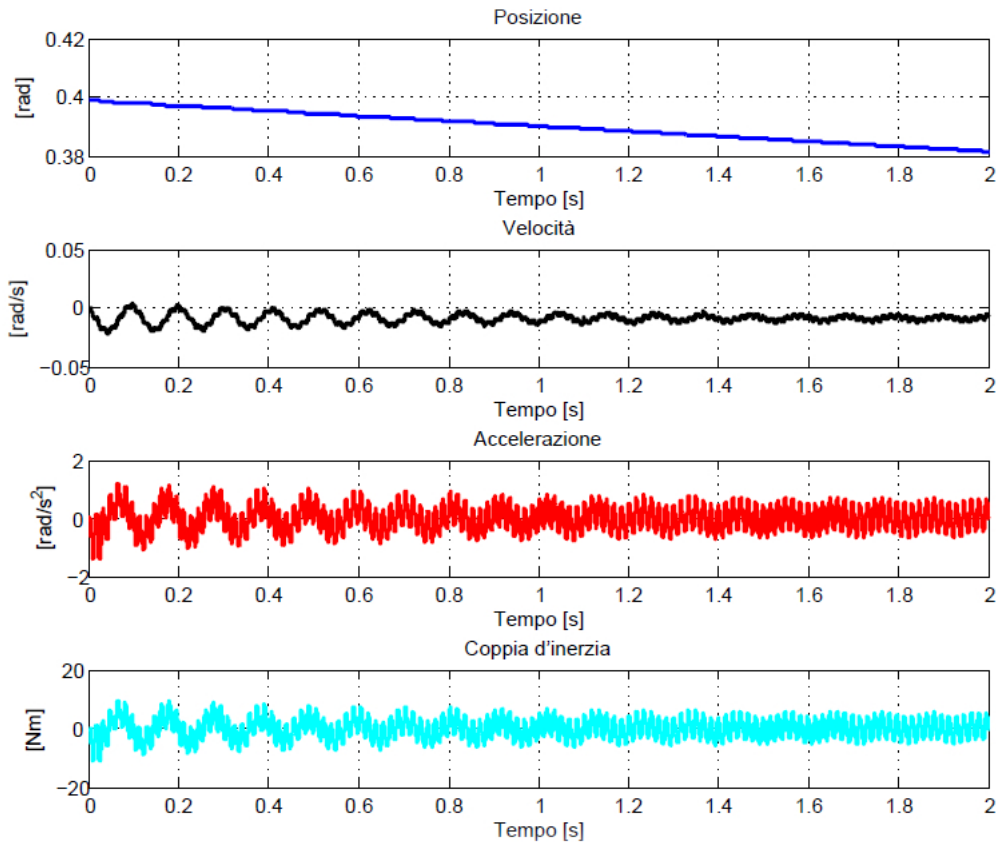


Figura 5.14: *Posizione, velocità, accelerazione e coppia d'inerzia nel caso di sventamento*

Confrontando i risultati di *figura 5.14* con quelli di *figura 5.5*, si notano sostanziali differenze sul posizionamento del riflettore primario nel caso di sventamento rispetto al normale funzionamento.

Ciò che risulta più evidente è un'incremento dell'accelerazione e quindi della coppia d'inerzia.

Rispetto al caso in cui i gli specchi venivano movimentati alla velocità di  $0.000036361[\text{rad}/\text{s}]$ , la coppia d'inerzia è quindi aumentata di circa tre volte. Va sottolineato che le stime effettuate in entrambe le situazioni di funzionamento si riferiscono al valore di picco della coppia d'inerzia, cioè sono state

valutate prendendo il massimo valore di accelerazione raggiunto dai riflettori primari e di conseguenza il massimo valore di coppia d'inerzia.

Oltre alla coppia d'inerzia è possibile stimare anche una variazione che riguarda la coppia della trasmissione.

Infatti, in questa situazione, la trasmissione deve compiere un angolo giro per consentire lo sventamento dei riflettori primari. L'aumento della rotazione angolare da eseguire ha come diretta conseguenza un aumento della coppia. Questa situazione è ben visibile nella seguente figura che rappresenta la coppia d'inerzia della trasmissione durante l'azione di sventamento.

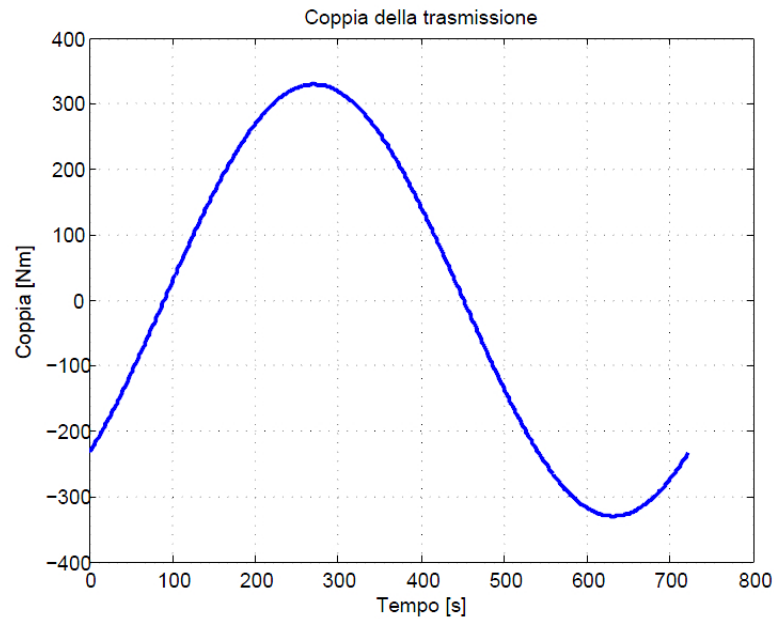


Figura 5.15: *Coppia della trasmissione durante lo sventamento*

Si può notare che il valore massimo risulta esser pari a  $330[Nm]$  e corrisponde alla situazione in cui le manovelle della trasmissione si presentano parallele al terreno.

Anche la coppia di gravità degli specchi subirà delle variazioni durante l'azione di sventamento. Infatti, durante la presentazione dei vari contributi di coppia è stato scelto come limite al funzionamento dell'impianto un certo orario e quindi una determinata posizione dei riflettori primari a cui corrisponde una certa angolazione del braccio.

Ma, durante l'azione di sventamento, la posizione dei riflettori più critica non risulta essere quella qui sopra citata. Infatti, rifacendoci alla *figura 5.2*, è possibile notare come la situazione più critica per tale coppia risulti essere quando la manovella è parallela al terreno.



A questo punto risulta interessante valutare l'incidenza delle varie coppie. Per far questo ci si avvale del grafico qui di seguito riportato.

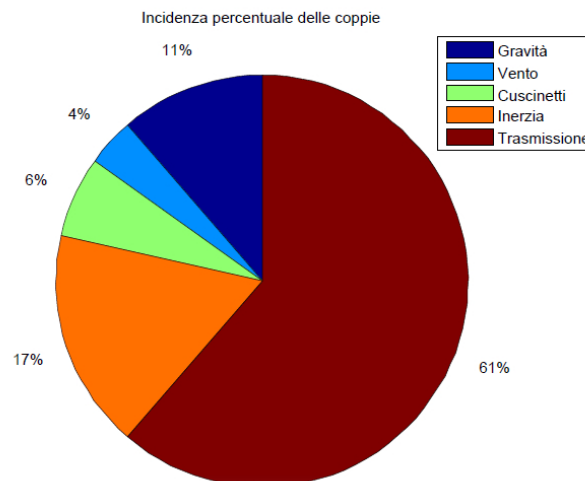


Figura 5.16: *Incidenza percentuale delle varie coppie durante lo sventamento*

Anche in questo caso risulta predominante il contributo di coppia della trasmissione, mentre risulta trascurabile l'incidenza percentuale di tutti gli altri contributi di coppia.

In questa situazione di funzionamento la coppia massima che viene a generarsi sul modulo sperimentale risulta essere pari a  $537.94[Nm]$ . Per quanto riguarda la realizzazione dell'impianto dimostrativo da  $1[MWe]$  è possibile stimare una coppia massima pari a  $1993.44[Nm]$  e  $3656.88[Nm]$  rispettivamente per 80 e 160 riflettori primari.

La variazione della coppia massima comporta una variazione della coppia motrice la quale risulta essere pari a  $2.45[Nm]$ . Con tale valore di coppia motrice è possibile riconfermare la bontà dell'attuatore scelto. Nel caso di 80 e 160 riflettori primari le coppie motrici che si ricavano risultano essere rispettivamente pari a  $9.06[Nm]$  e  $16.6[Nm]$ . In entrambi i casi bisognerà scegliere un attuatore che fornisca una coppia d'uscita più elevata in modo tale da garantire un certo margine di sicurezza. Se non si è intenzionati a cambiare attuatore è possibile utilizzare un martinetto il quale potrebbe supportare il motore durante la fase di sventamento o assolvere interamente tale compito, disabilitando il motore.

## 5.6 Il rapporto delle inerzie

Uno dei parametri di particolare importanza nell'individuazione di un attuatore elettrico è il rapporto tra l'inerzia del carico e quella del motore ( $\rho$ ). Questo parametro viene identificato in letteratura [31] dalla seguente relazione:

$$\rho = \frac{J_l}{\tau^2 J_m} \quad (5.14)$$

dove  $J_l$  rappresenta l'inerzia del carico,  $\tau$  il rapporto di trasmissione e  $J_m$  l'inerzia del rotore.

Generalmente durante il progetto di un servomeccanismo si utilizza la filosofia dell'“Inertia Matching” che consiste nel porre il valore di  $\rho$  pari ad uno.

Alla base di questa filosofia esistono principalmente due motivazioni:

- se l'inerzia del carico è maggiore rispetto a quella del rotore si accentua la tendenza oscillante del carico anche per buone regolazioni di posizione del motore;
- se l'inerzia del rotore è maggiore rispetto a quella del carico l'attuatore risulta essere sovradimensionato e una buona parte della potenza viene utilizzata per accelerare/decelerare il rotore piuttosto che il carico.

Quindi risulta di particolare interesse effettuare delle valutazioni nel momento in cui si considerano diversi valori d'inerzia del carico, mantenendo costante l'inerzia del rotore.

Per limitare i tempi di simulazione si è scelto di sostituire il modello modulo sperimentale con dei valori equivalenti di coppia d'inerzia.

Con la configurazione in esame sono state eseguite due simulazioni, una con un'inerzia doppia rispetto a quella introdotta dai dieci riflettori primari ed una con un'inerzia quattro volte maggiore.

La seguente figura mostra i risultati ottenuti:

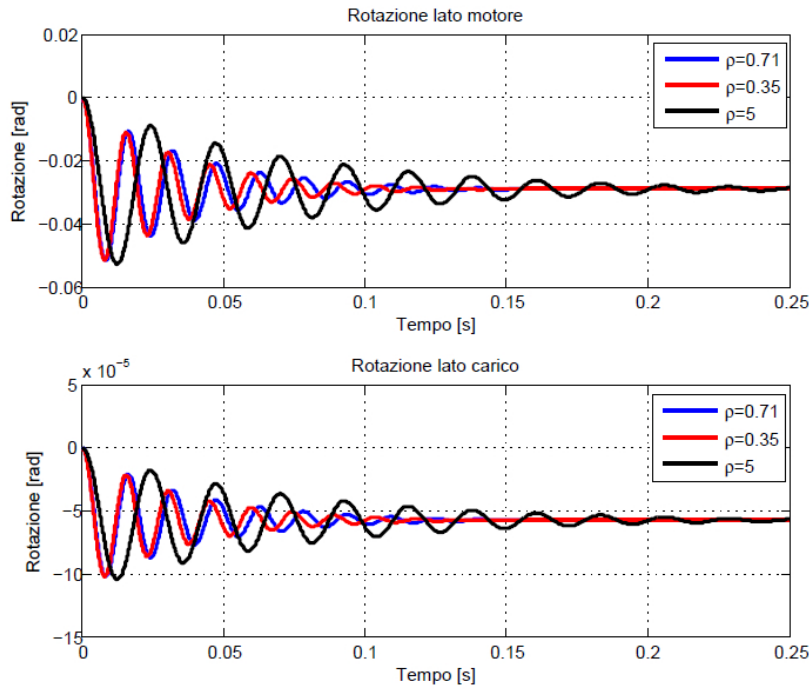


Figura 5.17: Rotazione lato motore e carico al variare dell'inerzia del carico

Si nota come aumentando l'inerzia si verifica un aumento del settling time. Quanto appena individuato è stato osservato anche in [32]. Sempre in [32] viene definita la seguente relazione che approssima il settling time per gli attuatori elettrici aventi inerzia del rotore  $J_m$  e carico con inerzia pari a  $J_l$ .

$$t_a = t_{r1} + J_l \cdot t_{r2} + \omega_c \cdot t_{s1} + \omega_c \cdot J_l \cdot t_{s2} \quad (5.15)$$

dove:

- $t_a$  è il settling time totale;
- $t_{r1}$  è il dynamic settling time dovuto all'inerzia del rotore;
- $t_{r2}$  è il dynamic settling time dovuto all'inerzia del carico;
- $t_{s1}$  è il Saturated settling time dovuto all'inerzia del rotore per una variazione di velocità unitaria;
- $t_{s2}$  è il Saturated settling time dovuto all'inerzia del carico per una variazione di velocità unitaria;
- $\omega_c$  è la variazione di velocità.

Il significato dei parametri qui sopra riportati risulta più chiaro dalla seguente immagine:

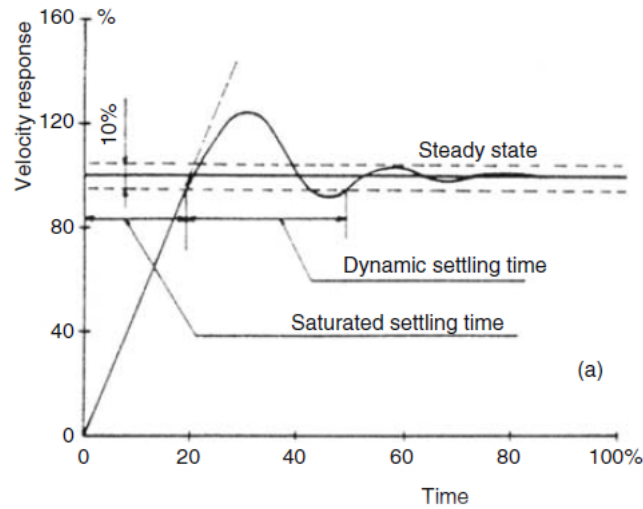


Figura 5.18: *Risposta allo scalino del motore stepper*

Ecco allora che la (5.15) descrive esattamente quanto ricavato dalle simulazioni. Infatti, in entrambi i casi, si è osservato che incrementando l'inerzia del carico si ottiene un aumento del settling time.

## 5.7 Conclusioni

In questo capitolo sono stati analizzati tutti i contributi di coppia agenti sul modulo sperimentale. La valutazione dell'entità di tali contributi risulta molto importante ai fini del posizionamento dei riflettori primari.

In condizione di normale funzionamento si è giunti alla conclusione che il contributo maggiore è determinato dalle coppie gravitazionali di specchi e trasmissione. È stato poi evidenziato come il contributo di alcune coppie sia molto variabile durante il periodo operativo dell'impianto.

Determinata la situazione più sfavorevole, per quanto riguarda le coppie in gioco, è stato analizzato il posizionamento di due diversi riflettori primari evidenziando l'importanza del cuscinetto scelto e del parametro rigidità torsionale ai fini del posizionamento dello specchio.

In seguito è stata affrontata la situazione di sventamento degli specchi, nella quale si è evidenziato un aumento del contributo relativo ad alcune tipologie di coppie. L'analisi eseguita per questa situazione ha nuovamente sottolineato che il contributo maggiore alla coppia totale è determinato dalla gravità.

In conclusione si è osservato che l'attuatore impiegato nel modulo sperimen-

tale funziona correttamente sia nel caso di normale funzionamento che nella situazione di sventamento, ma tale scelta deve essere rivista per quanto riguarda l'impianto dimostrativo da 80 o 160 riflettori primari.



# Capitolo 6

## Strumentazione e prove sperimentali

Lo scopo del seguente capitolo risulta essere quello di descrivere l'apparato di misura e le prove sperimentali eseguite sul modulo sperimentale.

Nella prima parte del capitolo, dopo aver brevemente descritto l'apparato sperimentale, verrà dedicata una particolare attenzione alla sensoristica scelta per effettuare le misure lato motore e lato carico.

In seguito saranno presentate le varie prove sperimentali eseguite sul modulo sperimentale le quali hanno posto particolare attenzione sulla determinazione dei cedimenti e dei giochi dei componenti meccanici della catena cinematica i quali influiscono negativamente sul corretto posizionamento dei riflettori primari.

Nell'ultima parte del capitolo verrà presentato un confronto fra i risultati ottenuti dalle prove sperimentali ed i risultati ottenuti dalle simulazioni eseguite con il software Dymola, il cui scopo risulta essere quello di validare il modello Dymola di riduttore e catena cinematica.

### 6.1 Descrizione dell'apparato sperimentale

Dopo aver analizzato il modello Dymola del modulo sperimentale è giunto il momento di presentare i risultati ottenuti nella prima fase di test.

Il modulo sperimentale realizzato, come descritto ampiamente nel *capitolo 4*, è costituito da un cinematismo la cui idea di funzionamento si basa sul quadrilatero articolato il quale è costituito principalmente da tre parti meccaniche: l'asta che trasmette il moto (trave IPE 5398), un'asta fissa o telaio e da delle manovelle a cui vengono fissati i riflettori primari. Ad un estremo della struttura è presente il riduttore, il cui albero veloce viene movimentato da un motore stepper, mentre all'albero lento del riduttore viene fissata la

manovella primaria. Quest'ultima viene poi collegata all'asta che ha il compito di trasmettere il moto alle manovelle alle quali verranno agganciati gli specchi.

Sul modulo sperimentale, che è stato realizzato presso un'azienda di carpenteria meccanica, sono stati installati i seguenti componenti:

- motore stepper SanyoDenki SM2863-5225;
- encoder Lika Ax58 ISI;
- driver RTA HGD 03;
- riduttore Wittenstein  $TP^+100$ ;
- inclinometro Seika NG3i.

La *figura 6.1* illustra il modulo sperimentale e dove sono stati posizionati gli elementi sopra elencati i quali hanno permesso di svolgere l'attività sperimentale descritta nelle pagine che seguono.



Figura 6.1: *Apparato sperimentale del prototipo: (a) motore e riduttore, (b) foro per inserimento del riflettore, (c) cinematico del prototipo*



Il motore utilizzato, come citato in precedenza, è uno stepper ibrido bipolare a due fasi, il quale eroga una coppia massima di  $9.2[Nm]$  quando alimentato con corrente nominale di  $6[A]$ .

Il motore in questione viene pilotato dal driver RTA HGD 03 il quale presenta due ponti ad H e la circuiteria che permette di controllare i due ponti. Il controllo della corrente negli avvolgimenti del motore è effettuato con la tecnica del PWM la cui frequenza di funzionamento è pari a  $20[KHz]$ . Inoltre il driver implementa un controllo di tipo current-feedback in cui la corrente che circola nelle diverse fasi del motore viene prima misurata e poi confrontata con un valore di riferimento, proprio come illustrato all'interno del modello Dymola di tale attuatore (*capitolo 3*).

Il driver in questione offre anche la possibilità di scegliere tra tre diverse modalità di pilotaggio, full-step ( $200passi/giro$ ), half-step ( $400passi/giro$ ) e 1/4-step ( $800passi/giro$ ) e fra sei possibili valori di corrente 2.25, 3, 3.75, 4.5, 5.25 e  $6[A]$ .

L'invio dei comandi all'attuatore avviene per mezzo di una scheda integrata nel driver e progettata dall'azienda S&H, la quale si interfaccia attraverso CAN-Bus con qualsiasi computer. L'azienda S.d.i Automazione ha realizzato l'interfaccia grafica "S&H Motor-Driver" che permette l'invio dei dati dal CAN-Bus al driver.

Continuando nella descrizione, si può notare la presenza del riduttore Wittenstein  $TP^+100$  all'albero motore, il quale presenta un rapporto di riduzione pari a 220. Tale riduttore, il cui datasheet è riportato in *appendice C*, è reversibile, cioè il flusso di potenza può percorrere il riduttore dall'albero veloce verso quello lento e viceversa.

Nel paragrafo seguente verrà analizzata la sensoristica impiegata per l'esecuzione dei test.

## 6.2 I sensori impiegati sul modulo sperimentale

I sensori impiegati sul prototipo sono dei sensori di posizione e sono un encoder ed un inclinometro. L'encoder ha il compito di valutare il corretto posizionamento del motore passo-passo mentre l'inclinometro determina il posizionamento di manovelle e cinematismo e quindi viene posto lato carico.

L'encoder utilizzato nell'attività sperimentale opera correttamente con tensioni comprese fra  $+10[V] \div +30[V]$ , dunque è in grado di essere alimentato ed acquisito direttamente dal driver RTA HGD 03 del motore passo-passo. Inoltre tale driver, grazie all'elettronica interna, permette di acquisire i segnali dell'encoder e di renderli disponibili per le valutazioni sul posizionamento.

Per quanto riguarda l'inclinometro, quest'ultimo è stato acquisito con una scheda d'acquisizione, progettata e realizzata dal partner di lavoro S.d.i, la quale campiona ad  $1[Hz]$ .

### 6.2.1 L'encoder assoluto

Per quanto riguarda le misure sul corretto posizionamento del motore passo-passo è stato scelto di utilizzare un encoder di tipo assoluto posizionato sul retro del motore passo-passo. È stato preferito ad un encoder incrementale in quanto è più semplice azzerare il sistema, cosa che potrebbe essere molto utile nell'esecuzione delle prove sperimentali. Questo sensore è stato scelto pensando di misurare un errore di posizionamento massimo lato carico di  $0.1[mrad]$ , che riportato lato motore, cioè moltiplicato per il fattore di riduzione, risulta essere pari a  $22[mrad]$ .

A questo punto è possibile determinare il minimo numero di settori angolari  $N$  del nostro encoder assoluto nel seguente modo:

$$N = \frac{2\pi}{0.022} = 286 \quad (6.1)$$

Ottenuto il minimo numero di settori angolari  $N$  da utilizzare, si è proceduto scegliendo per l'attività sperimentale un encoder da 1024 impulsi a giro a cui corrisponde una risoluzione di  $6.1[mrad]$ .

L'encoder utilizzato, Ax58 ISI di Lika, può funzionare in modalità "Real time mode" o in modalità "Burst mode". Nel primo caso la frequenza del segnale d'uscita è proporzionale alla velocità dell'encoder e la frequenza degli impulsi varia rispetto alla velocità dell'encoder, mentre nel secondo caso l'encoder attiva questa funzione se la frequenza di conteggio è maggiore rispetto alla frequenza in real time. Per poter accelerare tutti i funzionamenti di conteggio il microprocessore produce tutti gli impulsi ad una frequenza costante. In questo caso la posizione del dispositivo non coincide con la reale posizione, ma l'encoder immagazzinerà tale differenza in un registro e la compenserà (recuperando la differenza fra la posizione reale e quella dell'encoder) non appena commuterà di nuovo alla modalità "Real time mode". Ovviamente il tempo legato al recupero della differenza è proporzionale al tempo in cui si è operato in modalità "Burst mode".

Nel momento in cui l'encoder viene abilitato, viene inviato alla scheda d'acquisizione un treno di impulsi che specifica la posizione assoluta del dispositivo. Da quel momento in poi le uscite A e B dell'encoder genereranno delle onde quadre di tensione sfasate di  $90^\circ$ , proprio come avviene in un encoder incrementale. Tutto ciò permette di effettuare una misura assoluta di posizione pur avendo a disposizione un'elettronica per soli encoder incrementali. Il tempo

che intercorre fra l'attivazione e il segnale d'uscita è pari a 400[msec].

L'encoder scelto presenta ulteriori segnali che permettono rispettivamente di:

- posizionare la quota attuale dell'encoder a zero;
- invertire il senso di conteggio dell'encoder;
- indicare se sono presenti errori durante la processione dei dati.

L'encoder qui descritto è stato posizionato dietro al motore passo-passo per poter valutare il corretto posizionamento di quest'ultimo durante l'esecuzione di uno o più step.

### 6.2.2 L'inclinometro Seika NG3i

L'inclinometro impiegato per le misure lato carico è costituito da un fluido non tossico che lavora come se fosse il dielettrico di un condensatore. Nel seguente modo l'inclinazione angolare percepita dal sensore provoca una variazione proporzionale della capacità. Tale variazione angolare viene convertita dall'elettronica, integrata all'interno del sensore, in un segnale di tensione o di corrente.

Questo dispositivo risulta essere sigillato in una capsula metallica e rivestito in plastica per garantire un ottimo isolamento galvanico.

Il range di operatività del sensore risulta essere buono all'interno del campo di temperature che vanno da  $-40[^\circ C]$  a  $85[^\circ C]$ . Inoltre, presenta un valore molto basso di deriva dello zero e del guadagno per variazioni della temperatura.

Un'aspetto molto importante per le misure che verranno eseguite è determinato dal fatto che le vibrazioni non influenzano la misura e quindi la sensibilità trasversale risulta essere trascurabile.

Per quanto riguarda il condizionamento del segnale, il sensore presenta già integrato al suo interno il condizionatore di segnale.

Relativamente all'alimentazione, deve essere fornita una tensione che va da  $+8[V]$  a  $+30[V]$  mentre l'uscita condizionata può presentare valori pari a  $0[V] \div +5[V]$  oppure a  $4[mA] \div 20[mA]$ .

Il campo di misura dell'inclinometro utilizzato è pari a  $\pm \frac{\pi}{6}$  con una risoluzione di  $0.05[mrad]$ , mentre il rise-time di tale oggetto, cioè la velocità di risposta di tale sensore, è stimabile in  $0.3[s]$ .

Nelle seguenti figure vengono riportati rispettivamente il disegno tecnico del sensore e le connessioni da eseguire.

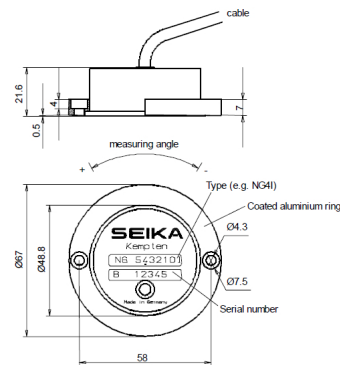


Figura 6.2: Disegno tecnico del sensore Seika NG3i

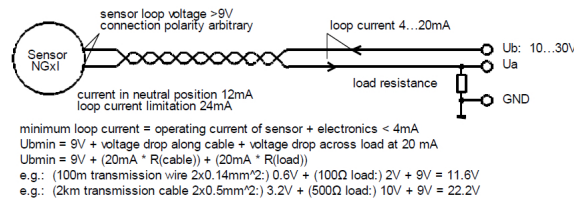


Figura 6.3: Connessioni del sensore Seika NG3i

Questo tipo di sensore è stato scelto perché facilmente montabile e più maneggevole rispetto ad un encoder che deve essere fissato sia sull'albero che sul disco esterno. Inoltre il segnale erogato dall'inclinometro risulta essere più facilmente acquisibile rispetto a quello di un qualsiasi encoder trattandosi di un segnale di tensione.

## 6.3 Prove sperimentali

Nei successivi paragrafi saranno presentate le prove sperimentali eseguite sul prototipo. Tali prove porranno l'attenzione sull'errore di posizionamento introdotto dal motoriduttore e dalla catena cinematica.

Per identificare il contributo totale dell'errore sono stati analizzati separatamente i vari blocchi che compongono il cinematismo, in modo tale da comprendere gli errori introdotti rispettivamente da motore più riduttore e dalla catena cinematica.

Nei paragrafi seguenti si parlerà spesso di errore di posizionamento, il quale è stato individuato facendo eseguire degli step al motore e misurando con l'inclinometro la variazione di posizione lato carico. Per effettuare un confronto

fra la posizione assunta dal motore e quella assunta dal carico, è necessario dividere il valore di posizione determinato dall'encoder per il rapporto di trasmissione pari a 220. La differenza che viene a generarsi tra la misura dell'encoder divisa per 220 e la misura dell'inclinometro risulta essere l'errore di posizionamento che verrà citato più e più volte nei seguenti paragrafi.

### 6.3.1 Errore introdotto dal gioco del riduttore

Il primo contributo d'errore analizzato riguarda il motoriduttore. Lo scopo del test eseguito è quello di analizzare il corretto posizionamento della manovella primaria dopo aver fatto eseguire al motore passo-passo alcuni step. In questo modo è possibile comprendere se esistono dei giochi dovuti al motore ed al riduttore.

Il test è stato eseguito sganciando dalla manovella primaria la trave IPE 5398 che permette la trasmissione del moto alle successive manovelle, mentre l'inclinometro è stato posto sul calettatore d'uscita del riduttore come visibile in *figura 6.4*.

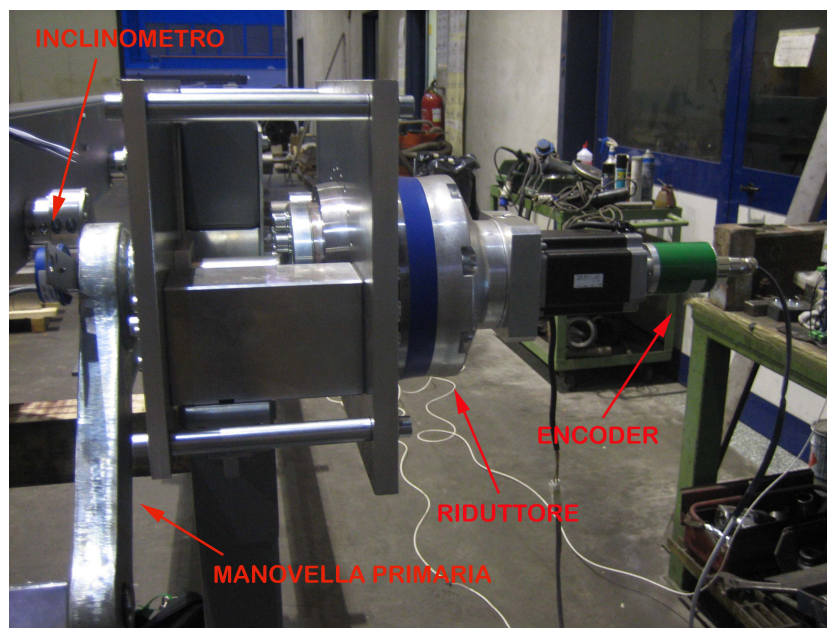


Figura 6.4: Posizionamento dell'inclinometro sul calettatore d'uscita del riduttore

Utilizzando la configurazione precedentemente descritta, sono stati fatti eseguire all'attuatore dieci passi in una direzione e successivamente quattro nel-

l'altra. Solo dopo il quinto passo lato motore si è potuto riscontrare una lieve rotazione dell'albero d'uscita del riduttore. Ne consegue che il valore del gioco riscontrato risulta essere pari a  $0.57[mrad]$ . Tale gioco risulta essere circa il doppio di quello riportato all'interno del datasheet del riduttore. È possibile supporre che una causa di tale differenza sia strettamente legata all'errore che si è compiuto nella misurazione.

### 6.3.2 Errore introdotto dai cedimenti del riduttore

Ora che il gioco dovuto all'ingranamento tra i denti è noto, è possibile passare ad identificare il legame esistente tra coppia e cedimenti. È chiaro che il riduttore avrà una certa rigidità torsionale che introdurrà dei cedimenti del sistema, i quali non dovranno superare il target di posizionamento.

L'attività svolta è stata eseguita staccando la trave IPE 5398 e posizionando la manovella primaria a  $-40^\circ$  eseguendo la rotazione riportata in *figura 6.5*.

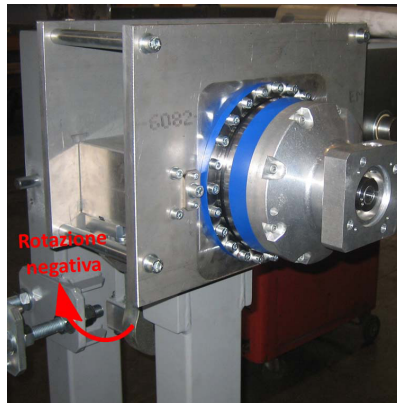


Figura 6.5: *Rotazione negativa*

Con la manovella primaria in suddetta posizione sono state aggiunte delle masse da  $17.2[Kg]$  in modo tale da valutare i cedimenti del blocco riduttore-manovella primaria. I risultati a cui si è giunti sono riportati nella seguente figura.

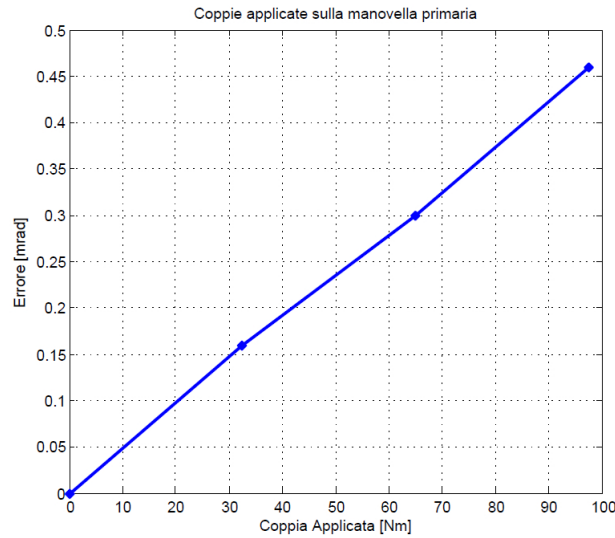


Figura 6.6: *Errore sul posizionamento del blocco riduttore-manovella primaria*

La prima cosa che viene evidenziata dal grafico in *figura 6.6* è la presenza di una legge lineare che lega il valore della coppia applicata alla manovella primaria rispetto all'errore ottenuto. Infatti, è possibile osservare che raddoppiando o triplicando il campione di massa applicato, anche l'errore segue circa tali aumenti.

Il fatto di avere un legame lineare tra sforzi e deformazioni fortifica l'ipotesi fatta, ovvero che gli errori sono principalmente dovuti ai cedimenti degli organi meccanici.

Quindi è possibile evidenziare come esista uno stretto legame fra la massa applicata e le cedevolezza del riduttore.

Dai risultati precedentemente ottenuti è possibile determinare il valore di rigidezza torsionale del riduttore, impiegando la seguente relazione:

$$\begin{aligned}
 K_{rid} &= \frac{Massa \cdot 9.81 \cdot L_{manovella} \cdot \sin(-40^\circ)}{errore} = \\
 &= \frac{17.2 \cdot 9.81 \cdot 0.3 \cdot \sin(-40^\circ)}{0.00016} [Nm/rad]
 \end{aligned}
 \tag{6.2}$$

il valore di rigidezza ricavato è pari a  $203360 [Nm/rad]$ . Tale valore risulta essere inferiore a quello riportato nel datasheet. In modo particolare i costruttori identificano un legame tra coppia e cedimento del riduttore come quello di *figura 6.7*.

Per valutare la rigidezza torsionale del riduttore che consegue dalla *figura 6.7*, i costruttori vanno a bloccare l'albero d'ingresso per poi caricare e scaricare il

riduttore in uscita in entrambe le direzioni con un valore di coppia crescente. Operando in questo modo si ottiene l'andamento dell'angolo di torsione in funzione della coppia applicata e quindi è possibile ottenere una curva chiusa dalla quale si ricava il gioco e la rigidezza torsionale del riduttore. Il fatto che le due curve di carico e scarico non si sovrappongono è dovuto alla presenza di giochi ed agli attriti degli organi in movimento[34].

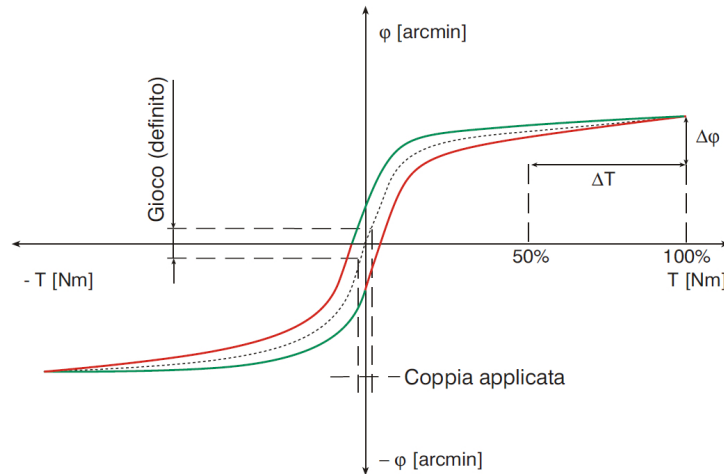


Figura 6.7: *Legame angolo di torsione coppia applicata*

Il valore di rigidezza torsionale che il datasheet riporta risulta essere quello corrispondente alla zona  $\Delta T$  visibile nella precedente figura. Al 100% di  $T$  corrisponde la coppia di accelerazione massima ammissibile che il riduttore è in grado di supportare per brevi periodi. Tale valore nel caso del riduttore scelto risulta essere pari a  $2600[Nm]$ .

Il valore di rigidezza precedentemente ricavato dalla prova sperimentale risulta essere un ordine di grandezza inferiore a quello riportato nel datasheet. Non essendo a conoscenza del valore di rigidezza compreso tra 0 ed il 50% di  $T$  riportato in *figura 6.7*, non è possibile affermare che quanto trovato risulti essere effettivamente corretto. Comunque, la presenza di una pendenza elevata nel grafico di *figura 6.7* certifica che la rigidezza torsionale del riduttore alle coppie più basse sarà molto minore di quella corrispondente al tratto 50%-100% $T$ .

### 6.3.3 Errore introdotto dalla catena cinematica

Chiarita l'entità del contributo d'errore introdotto dal riduttore, si può passare alla valutazione delle performance della catena cinematica. La prova che verrà mostrata in questo paragrafo ha lo scopo di valutare l'errore introdotto



dal cinematismo, il quale è dovuto ai giochi degli accoppiamenti meccanici ed alle cedevolezza della struttura meccanica.

Per determinare ciò è stata eseguita un'ulteriore prova sperimentale. In questo caso il test è stato realizzato agganciando alla prima manovella la trave IPE 5398, come visibile in *figura 6.1 (a)*, la quale permette la trasmissione del moto alle successive manovelle, mentre l'inclinometro è stato posto inizialmente sulla prima manovella e successivamente sulla decima manovella della catena cinematica.

La seguente figura mostra il posizionamento dell'inclinometro sulla decima manovella.



Figura 6.8: *Set-up della prova: posizionamento dell'inclinometro sulla decima manovella*

Anche questa seconda esperienza è stata suddivisa in due prove dove nel primo caso è stata fatta eseguire alla prima manovella una rotazione da  $0$  a  $40^\circ$ , mentre nel secondo caso la rotazione eseguita è stata eseguita da  $0$  a  $-40^\circ$ . In entrambe le prove, come avveniva anche nel caso precedente, la velocità di rotazione dell'albero motore è di  $60[\text{step}/\text{s}]$ . Le figure qui di seguito riportate mostrano i risultati ottenuti dall'inclinometro posto rispettivamente sulla prima e sulla decima manovella.

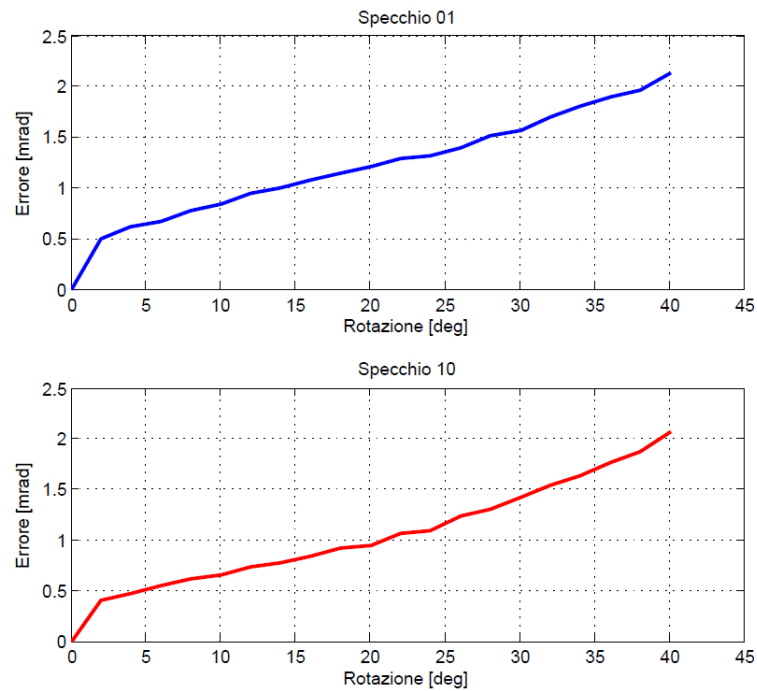


Figura 6.9: *Posizionamento della manovella primaria e dell'ultima*

Dai risultati ottenuti nei precedenti grafici è possibile individuare due differenti pendenze dell'errore. La prima pendenza, molto accentuata, si ha all'avviamento del moto e dopo una prima misurazione, cioè quella eseguita a  $2^\circ$ , insorge una pendenza meno accentuata.

All'avviamento del moto, l'elevato errore che si viene a generare è determinato dal gioco del riduttore come identificato precedentemente nel *paragrafo 6.3.1*. Tale errore è sempre rintracciabile ogni qual volta viene eseguita una misurazione su un sistema che ha appena eseguito un'inversione di moto. Nei risultati ottenuti in *figura 6.9* il gioco è presente fino a circa  $2^\circ$  perché la prima misurazione è stata effettuata a  $2^\circ$ .

Nella situazione analizzata, data la complessità del sistema, risulta difficile associare ad ogni singolo organo meccanico il corrispondente gioco introdotto.

Terminato il primo tratto in cui è dominante il gioco, si ha una variazione di pendenza della curva, il cui contributo d'errore è dipendente dalla cedevolezza dei vari componenti meccanici. Anche in questa situazione risulta complicato determinare quale parte del sistema meccanico risulti essere l'anello debole della catena cinematica. Tuttavia è facile ipotizzare che la manovella primaria e la trave possano essere gli elementi più sollecitati della struttura e quindi

gli indiziati ad inserire elevati errori nel sistema.

Resta comunque da sottolineare la bontà delle prove eseguite per quanto riguarda il corretto posizionamento della catena cinematica. Come detto in precedenza, l'errore di tale posizionamento deve essere contenuto in  $1.5[mrad]$  e dai risultati si osserva che eliminando i giochi tra i denti, la specifica risulta rispettata. Infatti, è plausibile supporre di eliminare questo contributo che si manifesta esclusivamente al momento in cui avviene l'inversione del moto, perché risulta essere una situazione che difficilmente rientrerà nel normale funzionamento dell'impianto.

A questo punto si è proceduto con il posizionare la manovella primaria a  $40^\circ$  e successivamente è stata caricata la trave IPE 5398 con delle masse in modo tale da valutare eventuali cedimenti della struttura.

Le masse utilizzate, tutte di valore pari a  $17.2[Kg]$ , sono state poste sulla trave del cinematismo in modo proporzionale fino a raggiungere il peso massimo di  $86[Kg]$ .

L'errore sul posizionamento ottenuto viene riportato nel seguente grafico.

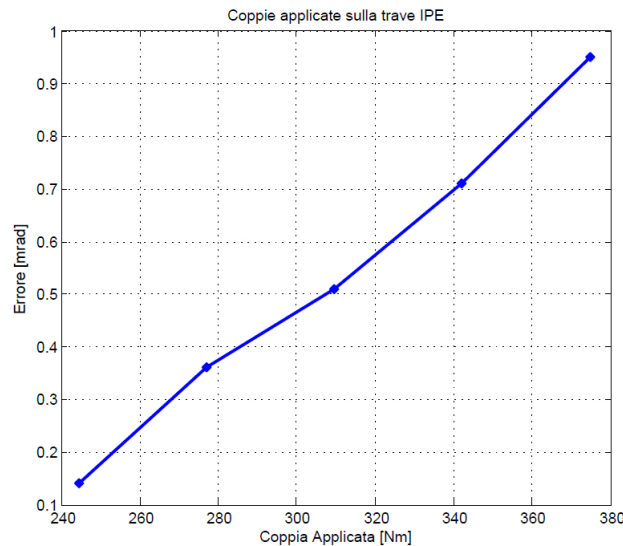


Figura 6.10: *Errore sul posizionamento dell'intero sistema*

Anche in questa situazione, dai risultati presentati in *figura 6.10*, è possibile stimare la presenza della retta che lega l'errore introdotto dalle cedevolezze al valore di coppia applicato.

Inoltre se si aumenta la coppia, possiamo notare che l'errore aumenta. Quindi quanto visto in *figura 6.9* potrebbe non essere più valido e quindi il target di progetto pari a  $1.5[mrad]$  non essere più rispettato. In questo caso, data la legge lineare che si ha fra errore e carico, è possibile correggere tale discre-

panza via software.

Da ultimo è possibile evidenziare come esista uno stretto legame fra la coppia applicata e le cedevolezza di riduttore e catena cinematica. Tuttavia, nella situazione analizzata, risulta difficile estrapolare quali siano i cedimenti dovuti al riduttore e quelli dovuti alla catena cinematica.

Nuovamente risulta possibile determinare il valore di rigidezza torsionale ottenuto nella suddetta situazione, riutilizzando la (6.2). In questa prova il valore di rigidezza torsionale ricavato risulta pari a  $164273[Nm/rad]$ . Tale valore risulta essere quello totale del sistema attuatore-cinematismo.

Questo valore può essere confrontato con quello che ne consegue dalla *figura 6.9*, in cui a  $40^\circ$  si avrà una coppia di valore pari a  $206.18[Nm]$ . Dal precedente dato fornito dal simulatore è possibile determinare in altro modo il valore di rigidezza torsionale dell'intero sistema. Tale valore si ottiene dividendo il valore di coppia per la media degli errori di *figura 6.9*, ottenendo una rigidezza torsionale di  $124960[Nm/rad]$ . Da quanto ottenuto, è possibile dire che risulta non esserci molta differenza fra i due valori di rigidezza torsionale dell'intero sistema ottenuti con due metodologie differenti. In modo empirico, è possibile determinare il contributo di rigidezza torsionale della catena cinematica utilizzando la seguente formula che esprime il valore di rigidezza torsionale totale di due molle poste in serie fra loro:

$$K_{serie} = \frac{1}{\frac{1}{K_{rid}} + \frac{1}{K_{cinematismo}}} \quad (6.3)$$

da cui invertendo la formula si ricava che:

$$K_{cinematismo} = -\frac{1}{\frac{1}{203360} - \frac{1}{164273}} \quad (6.4)$$

La rigidezza torsionale del cinematismo risulta uguale a  $854667[Nm/rad]$ .

Il valore di rigidezza torsionale determinato risulta molto importante perché permette di prevedere l'errore che si viene a generare per un qualsiasi valore di coppia applicata al sistema data la presenza di un andamento lineare fra queste due grandezze.

Come era auspicabile, il valore di rigidezza torsionale del cinematismo risulta essere molto maggiore rispetto a quello del riduttore.

## 6.4 Validazione del modello Dymola del cinematismo

Dopo aver descritto in precedenza le prove effettuate in simulazione e successivamente le prove sperimentali eseguite sul modulo sperimentale, in questo

paragrafo vengono analizzati e confrontati i risultati ottenuti in modo tale da permettere la validazione del modello Dymola della catena cinematica.

Lo scopo della validazione risulta necessario affinché le varie prove effettuate durante la fase di simulazione possano rappresentare con una certa approssimazione la realtà.

A tale proposito la validazione del modello presentata in questo paragrafo è inerente al modello Dymola del modulo sperimentale non comprensivo degli specchi, cioè formato dal solo sistema riduttore-cinematismo. La validazione del modello Dymola dell'attuatore per la movimentazione dei riflettori primari era già stata effettuata precedentemente[33].

La seguente figura ha lo scopo di chiarire quale sia la parte di modello che si intende validare.

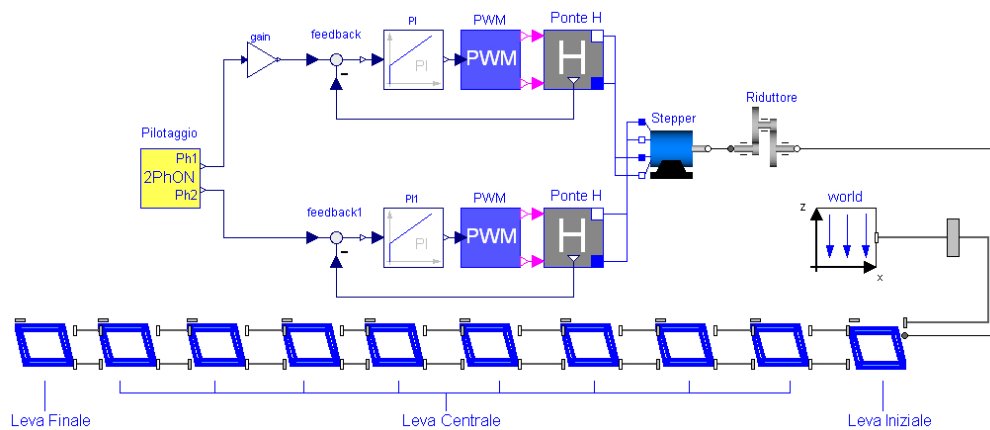


Figura 6.11: *Parte di modello da validare*

Il principale problema da affrontare per effettuare la validazione del modello Dymola risulta essere la modellizzazione della rigidità torsionale di ogni singolo elemento componente il sistema trasmissione. A tal proposito la libreria “MultiBody” del software Dymola non consente di inserire un valore di rigidità torsionale proprio di ogni singolo elemento costituente la catena cinematica. Per poter eseguire simulazioni di questo genere sarebbe necessario un software agli elementi finiti (FEM) in grado di attribuire ad ogni singolo elemento un proprio valore di rigidità ed effettuare in questo modo una stima puntuale dell'errore che viene a generarsi sul sistema.

Avendo nel modello Dymola descritto nei precedenti capitoli un solo elemento che possa tener conto di giochi ed accoppiamenti meccanici (il blocco Elasto-backlash presente nel modello del riduttore), si è pensato di sostituire il valore di rigidità torsionale del solo riduttore con il valore di rigidità torsionale dell'intero sistema. In altre parole, si è optato di concentrare in un unico punto

l'intero valore di rigidezza torsionale del sistema precedentemente calcolato. La bontà della scelta effettuata è possibile stimarla nel grafico qui di seguito riportato il quale pone a confronto i risultati della simulazione con quelli ottenuti sperimentalmente per quanto riguarda i cedimenti della catena cinematica.

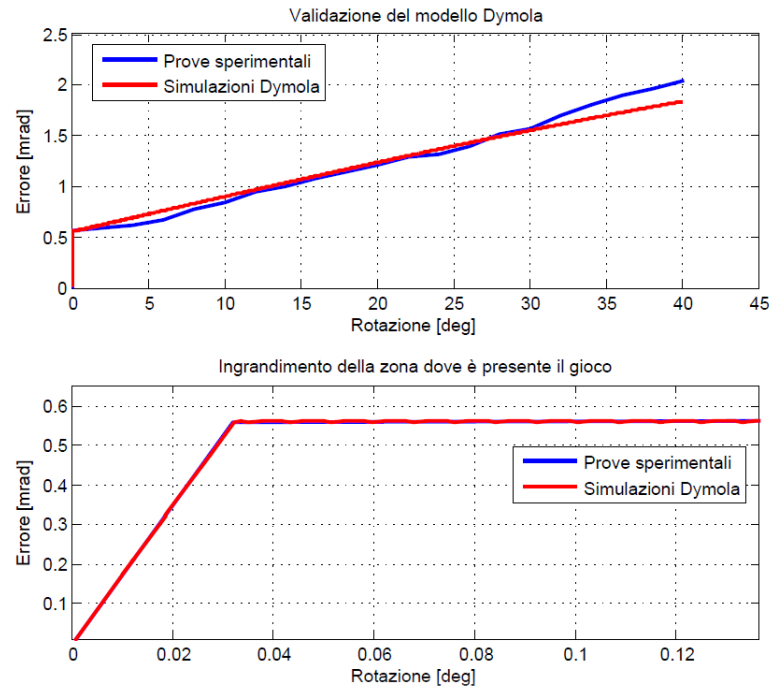


Figura 6.12: Confronto fra software *Dymola* e prove sperimentali

I grafici riportati in *figura 6.12* riportano sulle ascisse la rotazione della manovella primaria mentre sulle ordinate l'errore che è stato riscontrato in *Dymola* e nelle prove sperimentali. Come già detto in precedenza con errore si intende l'errore di posizionamento dato dalla differenza fra la misura dell'encoder divisa per 220 e la misura dell'inclinometro. Dai risultati ottenuti è possibile notare una buona sovrapposizione fra le simulazioni eseguite con il modello *Dymola* di riduttore e cinematismo ed i risultati ottenuti nelle prove sperimentali riportate in *figura 6.9*. Dalla *figura 6.12*, per quanto riguarda il gioco di riduttore ed accoppiamenti meccanici, l'errore massimo che si riscontra fra modello *Dymola* e prove sperimentali è pari a  $0.012[mrad]$ . Per quanto riguarda i cedimenti dell'intera trasmissione l'errore massimo che si riscontra risulta essere di  $0.21[mrad]$ . Tali valori evidenziano la bontà del modello *Dymola* realizzato.

## 6.5 Conclusioni

Il seguente capitolo ha posto in particolare risalto i risultati ottenuti dalle prove sperimentali eseguite sull'intero sistema. È stato deciso di scomporre il sistema riduttore-cinematismo in un sottosistema più semplice ed eseguire su di esso un'attività sperimentale in grado di mettere in luce le possibili problematiche inerenti al corretto posizionamento di ogni sottosistema.

Il primo sottosistema analizzato è stato quello composto dal solo riduttore. Su tale sottosistema è stata evidenziata la presenza di giochi di valore pari a circa il doppio di quelli riportati nel datasheet del riduttore medesimo. Le prove eseguite per mettere in luce i cedimenti del riduttore hanno mostrato che il valore di rigidezza torsionale ottenuto sperimentalmente risulta essere inferiore a quello del datasheet perché il valore di rigidezza torsionale da datasheet risulta essere il valore ottenuto con la coppia di accelerazione presente nel tratto  $\Delta T$  di *figura 6.7*, mentre nella nostra applicazione tale valore non viene mai raggiunto.

Dopo aver compreso le problematiche inerenti al riduttore si è passati ad eseguire dei test sull'intera catena cinematica dai quali è emerso che escludendo i giochi dovuti all'inversione del moto, situazione difficilmente presente nel normale funzionamento dell'impianto, l'errore di posizionamento rispetta le specifiche di progetto. Da qui, con due metodi distinti, è stato possibile determinare il valore di rigidezza torsionale dell'intero sistema, il quale permette di determinare a priori l'errore di posizionamento dato un qualsiasi valore di coppia in ingresso. Questa peculiarità risulta essere vera solo per il tratto compreso fra 0 e il 50% di T di *figura 6.7*, mentre se si aumenta il valore della coppia di accelerazione varierà la rigidezza torsionale.

A questo punto, si è proseguito con la validazione del modello Dymola di riduttore e cinematismo. Tale validazione risulta importante ai fini delle successive prove sperimentali che verranno eseguite. Per effettuare la validazione è stato necessario concentrare la rigidezza torsionale dell'intero sistema in un unico punto e dai risultati ottenuti è plausibile sottolineare la bontà della scelta fatta e la correttezza del modello Dymola.





# Capitolo 7

## Conclusioni

Questo scritto documenta il lavoro che ha condotto alla realizzazione ed alla verifica di un modello del modulo sperimentale di un impianto a collettori lineari di Fresnel, con il quale è stato possibile simulare le dinamiche di un sistema reale di questo genere.

Il primo risultato raggiunto in questo lavoro di tesi è stata la modellizzazione software di un modulo sperimentale in tecnologia Fresnel composto da dieci riflettori primari. La modellizzazione software è risultata essere un valido alleato da affiancare alla progettazione vera e propria in quanto ha permesso di comprendere e verificare la bontà delle scelte intraprese durante la fase di progetto. Con il modello Dymola del prototipo è stato possibile eseguire delle simulazioni che hanno posto in risalto le possibili problematiche di questo prototipo.

Ci si è accorti che movimentare questi riflettori risulta complicato a causa dei giochi e delle cedevolezze che si riscontrano nella catena cinematica e sugli specchi. A tale proposito si è compreso che la rigidità torsionale dei riflettori primari e della catena cinematica genera un cattivo posizionamento dei riflettori primari il quale comporta una diminuzione del rendimento dell'impianto. In altre parole, un valore non idoneo di rigidità torsionale di specchi e trasmissione, determina dei cedimenti nella struttura i quali vengono a generarsi a causa delle coppie che vanno ad agire sul prototipo. Un elevato valore di coppia unito ad un valore non idoneo di rigidità torsionale comporta un errato posizionamento degli specchi al di fuori dell'errore dato nelle specifiche di progetto.

Ecco che, tramite la modellizzazione e le simulazioni, è stato possibile determinare quali contributi di coppia agiscono sul modulo sperimentale e quanto numericamente questi contributi incidono sul prototipo da dieci specchi. L'analisi svolta ha permesso di identificare cinque diversi contributi di coppia, quella gravitazionale dovuta agli specchi ed alla trasmissione, quella del ven-

to, quella dei cuscinetti e quella d'inerzia, e di individuare quale delle coppie citate produce il contributo maggiore ed in quale momento della giornata. I risultati ottenuti hanno definito che il principale contributo alla coppia totale agente sui riflettori primaria, stimato in  $363.48[Nm]$ , è determinato dalla coppia gravitazionale della trasmissione e lo si riscontra nel tardo pomeriggio. Ottenuto il massimo valore di coppia agente sul modulo da dieci specchi è stato possibile in primo luogo determinare la coppia motrice del motore e verificare che questi sia idoneo per l'applicazione, in secondo luogo di verificare il posizionamento dei due pannelli proposti ed infine di estendere i risultati ottenuti al prototipo da  $1[MWe]$  composto da 160 specchi o da due moduli da 80 specchi. In questi due casi è stato individuato un valore di coppia totale rispettivamente pari a  $2317.68[Nm]$  e  $1275.44[Nm]$ . Tuttavia, per quanto riguarda il prototipo da  $1[MWe]$ , è lecito attendersi che il contributo dovuto alla coppia gravitazionale della trasmissione non sia più così imponente, dato che la trasmissione utilizzata per il prototipo sarà la medesima del modulo sperimentale. Nel prototipo è plausibile attendersi che il contributo di coppia gravitazionale dei riflettori primari risulti essere preponderante e per abbattere tale contributo potrebbe rendersi necessario lo studio di un nuovo supporto per i riflettori primari il quale renda possibile l'utilizzo di specchi baricentrici privi di braccio o con un valore di braccio ancora più contenuto in modo tale da limitare gli effetti della coppia gravitazionale. Inoltre risulterà necessario effettuare delle analisi più approfondite per quanto riguarda la movimentazione dei riflettori primari del prototipo da  $1[MWe]$ . In tal senso sarà necessario valutare economicamente se utilizzare un motore di taglia maggiore e movimentare 160 specchi o sfruttare la modularità di questi impianti e movimentare con due motori, identici a quello del modulo sperimentale, 80 riflettori ciascuno.

Sempre grazie alla modellizzazione ed alle simulazioni è stata studiata la situazione di sventamento degli specchi, la quale risulta necessaria per la protezione di quest'ultimi in caso di condizioni climatiche avverse. Anche in questo caso particolare attenzione è stata rivolta al determinare il massimo valore di coppia agente sul modulo sperimentale, il quale ha permesso di stabilire la coppia motrice che il motore dovrà erogare per sventare gli specchi. Nuovamente è stato riscontrato che l'attuatore scelto è in grado di assolvere il compito per quanto riguarda il modello da dieci specchi, mentre bisognerà effettuare una scelta differente, come visto in precedenza, per il prototipo da  $1[MWe]$ . In questo caso, a fianco dell'attuatore scelto, potrebbe essere utilizzato un martinetto in modo tale da agevolare il motore durante l'azione di sventamento.

Dopo aver analizzato al simulatore le problematiche inerenti alla movimentazione dei riflettori primari, è stata avviata una fase sperimentale la quale ha

permesso di verificare il reale errore di posizionamento introdotto da riduttore e catena cinematica del modulo sperimentale. Le verifiche eseguite hanno messo in luce che il riduttore, pur essendo uno dei più precisi e costosi sul mercato, presenta comunque dei cedimenti dovuti al fatto che questo oggetto non è infinitamente rigido ma presenta dei cedimenti. Va sottolineato che, dai risultati riscontrati nelle prove sperimentali, i cedimenti presentano un andamento lineare dell'errore di posizione rispetto alla coppia applicata. In questo modo è possibile prevedere, data la coppia applicata in ingresso, l'errore di posizionamento che si riscontra sulla trasmissione. Essendo tale errore lineare e sistematico, potrebbe essere interessante eseguire una correzione di tale errore via software per ovviare a tale problematica.

Tale tecnica potrebbe essere applicata anche per quanto riguarda il gioco, dato che è stata analizzata la presenza di un gioco del valore di  $0.5[mrad]$  ogni qual volta si inverte il moto di rotazione.

Al termine delle prove sperimentali è stata effettuata la validazione del modello Dymola di riduttore e cinematismo. Lo scopo della validazione è stato quello di valutare i risultati ottenuti con il simulatore e quelli determinati dalle prove sperimentali, in modo tale da comprendere la bontà del modello realizzato il quale potrebbe risultare utile per successivi studi inerenti al progetto. In particolare è stato possibile evidenziare una buona sovrapposizione fra i risultati ottenuti sperimentalmente e quelli ottenuti in simulazione per quanto riguarda i giochi ed i cedimenti.

Dato che la fase sperimentale è appena stata avviata, si possono prospettare ulteriori verifiche da eseguire sul modulo sperimentale. Un primo riscontro potrebbe riguardare la valutazione del corretto posizionamento dei riflettori primari durante il periodo di funzionamento di una giornata. Un ulteriore controllo potrebbe riguardare l'analisi del quantitativo di luce riflessa da dieci specchi e che effettivamente giunge sul CPC, al fine di verificare che gli specchi abbiano effettivamente il rendimento dichiarato. Un successivo accertamento da eseguire sul modulo sperimentale risulta essere la verifica del corretto funzionamento dell'attuatore una volta pilotato dall'algoritmo del Sole. Questo collaudo è mirato alla comprensione della precisione dell'algoritmo solare e per poter avere un'idea generale del funzionamento dell'impianto.

Il passo successivo sarà quello di industrializzare tutto il sistema. In altre parole, dato che le prove sperimentali fin qui svolte sono state eseguite sul posto, bisognerà studiare come disporre i cavi di alimentazione dei motori e quelli di comunicazione via CAN rispetto ad un controllore centrale, il quale potrebbe essere posto a centinaia di metri di distanza dal prototipo.

I contenuti esposti rappresentano, a modesto avviso, un valido aiuto nel prosieguo di una ricerca all'interno di questo settore.



# Appendice A

All'interno della seguente appendice viene mostrato e commentato il listato, presente nel blocco “3d- >1d”, creato per la realizzazione della connessione fra i frame citati in precedenza nei vari blocchi leva ed i rispettivi riflettori primari.

1. **model** Collegamento\_3d\_1d;
2. import Modelica.Constants; “richiamo delle costanti contenute in Dymola”;
3. parameter FREESUN.Dati\_impianto\_Di; “richiamo delle costanti del modello”;
4. Real s “variabile ausiliaria”;
5. Real seno\_flange\_b; “variabile ausiliaria”;
6. equation
7. frame\_a.f[2]=0;
8. frame\_a.f[3]=0;
9. frame\_a.f[1]=0;
10. frame\_a.t[1]+flange\_b.tau=0;
11. frame\_a.t[2]=0;
12. frame\_a.t[3]=0;
13. flange\_b.phi=s;
14. frame\_a.R.w[1]=der(s);
15. **end** Collegamento3d1d;

Nell'analisi del listato, partendo dalla dicitura equation, le prime tre equazioni che si incontrano rappresentano l'annullamento delle forze lungo le tre direzioni del sistema di riferimento. Sono necessarie sei equazioni perché ogni connettore di qualsiasi elemento 3D della libreria *Multibody* presenta tre forze e tre coppie disposte lungo le direzioni della terna di riferimento.

La 10 definisce l'annullamento della coppia ai capi del blocco “3d- >1d”, in altre parole viene definito che la coppia lungo la direzione  $x$  nel modello 3D è uguale ed opposta di segno alla coppia d'ingresso nel modello 1D.

Le equazioni 11 e 12 annullano la coppia lungo le altre due direzioni non

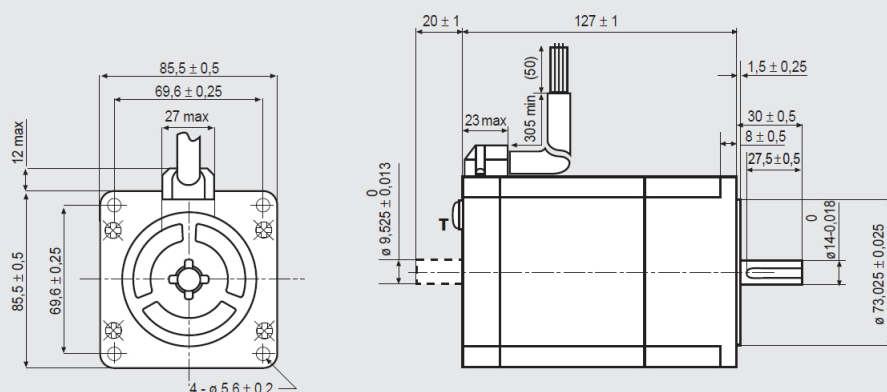
prese in considerazione.

L'equazione 13 assegna alla variabile ausiliaria  $s$  il valore della posizione dello specchio nel mondo 1D, mentre la successiva equazione pone la velocità angolare lungo la direzione  $x$  uguale alla derivata della posizione dello specchio del mondo 1D.

# Appendice B

SANYODENKI  
SANMOTION

## SERIE SM 2863



IL MOTORE E' DOTATO DELLA VITE  
DI TERRA T.

### CARATTERISTICHE

MODELLO	SM2863-5155 (SM2863-5125)	SM2863-5255 (SM2863-5225)
ANGOLO DI PASSO - TOLLERANZA	1,8° ± 0,09°	1,8° ± 0,09°
CORRENTE NOMINALE BIPOLARE (Amp)	4	6
RESISTENZA DI FASE A 25° (Ohm)	1	0,46
INDUTTANZA DI FASE (mH)	7,9	3,8
COPPIA DI TENUTA BIPOLARE (Ncm)	920	920
MOMENTO D'INERZIA ROTORE (Kg <sup>2</sup> x 10 <sup>-7</sup> )	4500	4500
ACCELERAZIONE TEORICA (rad x sec. <sup>-2</sup> )	20500	20500
FORZA CONTRO ELETTRO MOTRICE (V/Krpm)	241	161
PESO (Kg)	4	4
CERTIFICAZIONI INTERNAZIONALI	UL, CSA, CE, RoHS	UL, CSA, CE, RoHS
TENSIONE DI ISOLAMENTO (V)	250 Vac (350 Vdc)	250 Vac (350 Vdc)
GRADO DI PROTEZIONE-CLASSE DI ISOLAMENTO	IP43 - F	IP43 - F
CODICE TERMINALI	V	V





# Appendice C

## TP+ 110 HIGH TORQUE®

		2-stadi				3-stadi					
Rapporto di riduzione <sup>a)</sup>	<i>i</i>	22	27,5	38,5	55	66	88	110	154	220	
Coppia di accelerazione max. (max. 1000 cicli per ora)	$T_{a0}$ Nm	3100	3100	3100	2000	2600	2600	2600	2600	2600	
Coppia nominale in uscita (a $n_{10}$ )	$T_{n0}$ Nm	1570	1600	1650	1400	1600	1750	1750	1750	1750	
Coppia di emergenza (fino a 1000 volte durante la vita del riduttore)	$T_{a02}$ Nm	6500	6500	6500	6500	6500	6500	6500	6500	6500	
Velocità nominale media in ingresso (a $T_{02}$ e temperatura ambiente 20°C) <sup>b)</sup>	$n_{01}$ rpm	2500	2500	2500	2500	3000	3000	3000	3000	3000	
Velocità max. in ingresso	$n_{01max}$ rpm	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	4500	
Coppia senza carico (a $n_1 = 3000$ rpm e temperatura misurata sul riduttore di 20°C) <sup>c)</sup>	$T_{002}$ Nm	6,5	-	-	-	-	3,3	2,5	-	-	
Gioco torsionale max.	$j_t$ arcmin	≤ 1				≤ 1					
Rigidità torsionale <sup>d)</sup>	$C_{01}$ Nm/arcmin	730	725	715	670	650	650	650	650	650	
Rigidità di ribaltamento	$C_{02}$ Nm/arcmin	1452				1452					
Forza assiale max. <sup>e)</sup>	$F_{01max}$ N	10050				10050					
Coppia di ribaltamento max.	$M_{02max}$ Nm	3280				3280					
Rendimento a pieno carico	$\eta$ %	94				92					
Durata (previo ns. verifica con software di calcolo cyms® 3.2)	$L_h$ h	> 100 000				> 100 000					
Peso (incl. av. flangia di adattamento standard)	<i>m</i> kg	33,1				35,4					
Rumorosità (a $n_1 = 3000$ rpm, senza carico)	$L_{PA}$ dB(A)	≤ 66				≤ 66					
Temperatura max. ammissibile sulla carcassa	°C	+ 90									
Temperatura ambiente	°C	da 0 a +40									
Lubrificazione		a vita									
Verniciatura		Blü RAL 5002									
Senso di rotazione		concorde tra ingresso e uscita									
Grado di protezione		IP 65									
Momento d'inerzia (rispetto all'ingresso)	K 38	$J_i$ 10 <sup>-4</sup> kgm <sup>2</sup>	16,6	15,2	13,9	13,1	13,8	10,2	9,77	9,47	9,16
Ø interno montato calata (ore) [mm]	M 48	$J_i$ 10 <sup>-4</sup> kgm <sup>2</sup>	31,4	29,9	28,7	28,0	-	-	-	-	-



# Bibliografia

- [1] **Ali Naci Celik, Tariq Muneer, Peter Clarke**, “*A review of installed solar photovoltaic and thermal collector capacities in relation to solar potential for the EU-15*”, journal homepage: [www.elsevier.com/locate/renene](http://www.elsevier.com/locate/renene)
- [2] **Kalogirou, Soteris A.**, “*Solar thermal collectors and applications*”, Progress in Energy and Combustion Science, 2004.
- [3] **Silvi, Ing. Cesare**, “*Giovanni Francia*”, Scienza e Tecnica 2008, 449.
- [4] **Francesca Ferrazza**, “*Volume III/Nuovi sviluppi: energia, trasporti, sostenibilità*”, Generazione elettrica da fonti rinnovabili.
- [5] **Cesare Silvi**, “*The Pioneering work on linear Fresnel reflector concentrators (LFCs) in italy*”, journal homepage: [www.gses.it](http://www.gses.it).
- [6] **Cesare Silvi**, “*Cosa bolle in pentola*”, PAG. 40 SAPERE, FEBBRAIO 2009.
- [7] **Evert H. Marchie van Voorthuysen**, *Linear Fresnel Mirrors and the War Scenario for CSP-investments SOLAQ Solar Solutions*.
- [8] **David Mills, Graham L.Morrison**, “*Compat Linear Fresnel Reflector Solar Thermal Powerplants*”, journal homepage: [www.elsevier.com/locate/solener](http://www.elsevier.com/locate/solener).
- [9] **Chia-Yen Lee, Po-Cheng Chou, Che-Ming Chiang, Chiu-Feng Lin** “*Sun Tracking Systems: A Review*”, journal homepage: [www.mdpi.com/journal/sensors](http://www.mdpi.com/journal/sensors).
- [10] **Rolf Bernhard, H.-G. Laabs, Jacques de Lalaing, Markus Eck, Martin Eickhoff, Klaus Pottler, Gabriel Morin, Anna Heim-sath, Andreas Georg, Andreas Häberle**, “*Linear Fresnel collector demonstration on the PSA*”.

- 
- [11] **Christof Wittwer, Franz Trieb, Jürgen Dersch**, “*The Solarmundo line focussing Fresnel collector*”.
- [12] **D. Feuermann, J.M. Gordon**, “*Analysis of a Two-Stage Linear Fresnel Reflector Solar Concentrator*”, *Journal of Solar Energy Engineering*, NOVEMBER 1991, Vol. 113/279.
- [13] **S.S. Mathur, T. C. Kandpal, B.S. Negi**, “*Optical design and concentration characteristics of linear Fresnel reflector solar concentrators – I. mirror elements of varying width, energy convers. Mgmt*” Vol. 31, No. 3, pp. 205-219, 1991.
- [14] **FERA**, “*Design preliminare LFC*”, September 2009.
- [15] **G.D. Sootha, B.S. Negi**, “*A comparative study of optical designs and solar flux concentrating characteristics of a linear Fresnel reflector solar concentrator with tubular absorber*”, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 32 (1994), 169-186.
- [16] **David Burbidge, David R. Mills, Graham L. Morrison**, “*Stanwell solar thermal power project*”.
- [17] **Graham Ford**, “*CSP: bright future for linear Fresnel technology?*”, *Renewable energy focus*, September/October 2008.
- [18] **Max Mertins, Hansjörg Lerchenmüller, Andreas Häberle**, “*Geometry Optimization of Fresnel-Collectors with economic assessment*”.
- [19] **D. Mills**, “*Advances in solar thermal electricity technology*”, *Solar Energy* 76 (2004) 19-31.
- [20] **M. Pelagatti**, “*Valutazioni sugli specchi non baricentrati*”.
- [21] **I. Reda, A. Afshin**, “*Solar position algorithm for solar radiation applications*”, *Sol. Energ.* 2004. Vol. 76, 577-589.
- [22] **R. Grena**, “*An algorithm for the computation of the solar position*”, *Sol. Energy.* 2008. Vol. 82, 462-470.
- [23] <http://www.usno.navy.mil/> [Online].
- [24] **P. Fritzson**, “*Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 2.1*”, 2004.
- [25] **L. Scott Hansen**, “*Learning and applying solid edge V20 step by step*”, Industrial Press, 11/2007.

- [26] **J. Grimbleby**, *“Lectures on stepping motors”*, University of Reading, October 2007.
- [27] **C. Pelchen, C. Schweiger, M. Otter**, *Modeling and Simulating the Efficiency of Gearboxes and of Planetary Gearboxes*, Modelica Conference March, 2002.
- [28] **M. Frontini, E. Sormani**, *“Fondamenti di calcolo numerico. Problemi in laboratorio”*, Apogeo, 2005.
- [29] **G. Diana, F. Cheli**, *“Dinamica e vibrazioni dei sistemi meccanici vol.2”*, UTET, 1993.
- [30] **Anil K. Chopra**, *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, 2006.
- [31] **A. Hughes**, *Electric Motors and Drives*, Third edition, Elsevier Ltd, 2006.
- [32] **R. Firoozian**, *Servo Motors and Industrial Control Theory*, Springer, 2009.
- [33] **E. Kerenxhi**, *Modellistica e controllo dell’azionamento dei riflettori di una centrale solare a concentrazione*, Tesi di laurea, Politecnico di Milano, 2010.
- [34] Wittenstein, **Wittestein home page**, <http://www.wittenstein.it/>



# Ringraziamenti

Al termine del mio percorso universitario, è il momento di ringraziare ed esprimere la mia riconoscenza a tutte quelle persone che mi hanno sostenuto nel cammino formativo.

Desidero ringraziare innanzitutto il Prof. Gianantonio Magnani per la fiducia datami affidandomi questo lavoro di tesi e per l'aiuto ricevuto nello svolgimento del lavoro.

Desidero ringraziare tutte quelle persone che mi hanno affiancato, spronato ed aiutato durante il periodo universitario, i colleghi di laboratorio presso il Politecnico di Milano, Marco, Fede, Pierdavide, Elvis e i compagni di corso (Pleg, Visco, Veda, Chapeau, Vesco, Luca di Casale, Anna, Daniele). Uno speciale ringraziamento va a Manuele che con estrema pazienza e tenacia è riuscito incredibilmente a farmi imparare qualcosa di importante ed ai ragazzi del laboratorio di automatica che mi hanno sopportato in questo periodo.

Desidero ringraziare tutti i professori che ho incontrato durante il percorso formativo presso il Politecnico di Milano. Inoltre uno speciale ringraziamento va ai miei professori della scuola superiore ITIS Janello Torriani di Cremona che, credendo in me, mi hanno spronato ad iniziare quest'avventura. I risultati ottenuti dagli studi universitari non sono di certo ottimi come quelli delle superiori, ma gli insuccessi e le soddisfazioni di questi anni mi hanno aiutato a crescere e, spero, a migliorare. Un sentito grazie anche a tutti i miei compagni delle superiori in cui abbiamo condiviso delle bellissime esperienze.

Desidero ringraziare tutti gli amici della compagnia tra i quali il Brescio e la sposa Elisa, il Favo e la banchiera Daniela, Paolino e la studiosa d'arte Benedetta, il Maddy e la Laura, la bestia Gianni e la bella Francesca e Mach Rav IV, che mi hanno sempre sostenuto e con cui ho condiviso delle stupende ed indimenticabili esperienze.

Desidero ringraziare gli amici proprietari del bar i Masters, Ste, Max e Dami e le bariste del medesimo bar.

Desidero ringraziare tutti gli amici e gli abitanti di Cornaleto e Formigara che magari pur avendoli a volte snobbati hanno sempre un posto importante nel mio cuore.

Desidero ringraziare tutti i compagni di viaggio in treno che ho avuto il pia-

cere di incontrare e conoscere lungo questo periodo universitario.

Uno speciale ringraziamento va agli zii ed in particolare allo zio Piero, alla zia Pierina, al cugino Davide, alla cugina Stefania ed all'ultimo arrivato in famiglia il piccolo Valerio i quali mi son sempre stati vicino ed hanno creduto in me.

Desidero ringraziare tutte quelle persone che, a causa della mia scarsa memoria, ho dimenticato di citare.

Infine un doveroso ringraziamento ai miei genitori, Antonio e Noemi, che mi sono stati vicino e mi hanno sostenuto in tutti i modi possibili durante questi anni.