



REGIONE: <b>SICILIA</b>	PROVINCIA: <b>PALERMO</b>
----------------------------	------------------------------

COMUNI: <b>MEZZOJUSO, CAMPOFELICE DI FITALIA, CIMINNA</b>	LOCALITA': <b>C/da Farra, C/da Fondacazzo, C/da Pizzo Mezzaluna. C/da Porrazzi</b>
--	--

TIPO PROGETTO: <b>PD</b>	OGGETTO: <b>Progetto per la realizzazione di un impianto agrovoltaico denominato 'Agrovoltaico Mezzojuso' per la produzione di energia elettrica con una potenza installata di 57,56 MW, potenza di immissione di 50,00 MW e potenza del sistema di accumulo di 10 MW, per la produzione agricola di beni e servizi oltre alle opere connesse e alle infrastrutture indispensabili nelle aree identificate nei comuni di Mezzojuso (PA), Campofelice di Fitalia (PA) e Ciminna (PA).</b>
-----------------------------	--



TAVOLA N.: <b>RE02.013</b>	IMPIANTO: <b>AGROFOTOVOLTAICO MEZZOJUSO</b>	SCALA
	ELABORATO: <b>RELAZIONE PRELIMINARE STRUTTURE</b>	COD. DOC.   REV.

PROPONENTE: <b>FRI-ELSUN</b>	RESPONSABILE:  <i>Timbro e Firma</i>	APPROVATO DA:  <i>Timbro e Firma</i>
---------------------------------	--	--

PROGETTISTA 	DIRETTORE TECNICO: ARCH: FRANCESCO LAUDICINA  <i>Timbro e Firma</i>	REDATTO DA: 
-----------------	---	-----------------

REV.	DATA	REDATTO	DESCRIZIONE
0			
1			
2			
3			

Ordine Nazionale dei Biologi  
 Sez. A - N. AA\_083791  
 Dott. Salvatore Cambria

## Indice

Premessa.....	2
1. Studio degli effetti del vento .....	3
1.1 Strutture ad inseguimento - PANORAMICA DI DY-WIND .....	4
1.2 Strutture ad inseguimento - il metodo di studio .....	4
1.2.1 Vibrazione di risonanza .....	5
1.2.2 Flutter torsionale .....	5
1.2.2 Galoppo torsionale .....	6
1.2.3 Pressione del vento in galleria e test di velocità (modelli rigidi + DAF) .....	7
1.2.4 Test dinamici della galleria del vento .....	7
2. Strutture fisse .....	11
3. Ancoraggio al terreno di fondazione .....	12
Conclusioni.....	13

## Premessa

La presente relazione illustra i criteri di verifica delle strutture costituenti i sistemi ad inseguimento solare monoassiali e le strutture a sistema fisso individuate per il presente progetto. Per i sistemi monoassiali la trattazione delle argomentazioni e delle verifiche segue i criteri utilizzati dalla tecnologia Soltec Renewable Energies (o azienda similare), tra i principali produttori e fornitori di inseguitori solari monoassiali, dotata di certificazione UL 3703, testata agli standard di sicurezza, meccanici ed elettrici dei sistemi di inseguimento solare. A completamento di test rigorosi in varie condizioni ambientali, Underwriters Laboratories (UL) ha certificato la sicurezza e l'affidabilità del sistema ad inseguimento solare. Per le strutture fisse si è fatto riferimento alle strutture prodotte dall'azienda Alusistemi, leader nel settore.

Resta inteso che le effettive strutture saranno opportunamente verificate in sede di progettazione esecutiva e che le tipologie individuate potranno essere sostituite con altra similare sempre nel rispetto di dimensioni, sistema di inseguimento solare e tipologia.

Le strutture ad inseguimento utilizzate sono quindi rappresentate da inseguitori solari monoassiali con sopra debitamente ancorati i moduli fotovoltaici le cui caratteristiche metriche e geometriche sono meglio rappresentate nelle allegate tavole grafiche. Tali strutture vengono infisse nel terreno mediante battitura dei montanti e senza utilizzo di calcestruzzo o altro materiale.



**Figura 1 - Esempio struttura ad inseguimento solare monoassiale tipo tracker**



Le strutture fisse sono invece rappresentate da strutture in acciaio composte da profili di varie sezioni, tagliati e preforati a misura e successivamente zincati a caldo.



Figura 2 - Esempio struttura fissa

## 1. Studio degli effetti del vento

Il progetto di inseguitore solare monoassiale deve rispettare una serie di parametri che tengono conto degli effetti aeroelastici causati dal vento. Il miglioramento dell'elettronica è necessario anche per affrontare fenomeni meteorologici come cicloni, venti forti o tempeste elettriche.

In questo documento, vengono presentati i risultati dello studio del vento condotto da RWDI in collaborazione con Soltec per il tracker a singolo asse SF7, insieme con le caratteristiche per affrontare in sicurezza gli eventi meteorologici.



## 1.1 Strutture ad inseguimento - PANORAMICA DI DY-WIND

*L'approccio ibrido sperimentale-numerico sviluppato attraverso il lavoro con Soltec valuta accuratamente il comportamento del tracker sotto l'azione del vento in array multi-fila e consente flessibilità nel processo di progettazione che generalmente non è pratico attraverso il test completo del modello aeroelastico. (Matthew TL Browne, M.Eng., P.Eng., M.ASCE Project Manager / Direttore tecnico / Associato presso RWDI)*

Diversi studi hanno dimostrato che alcuni standard del codice di progettazione del vento applicati agli inseguitori solari non sono sufficienti per progettare queste strutture in modo affidabile, in quanto non considerano gli effetti del secondo ordine prodotti dall'azione del vento sul localizzatore. Al fine di prevenire i relativi problemi di instabilità strutturale, è necessario trovare nuove metodologie di analisi che migliorino la progettazione di strutture tracker affidabili quantificando la loro risposta agli effetti del vento del secondo ordine. Il capo dei consulenti eolici RWDI in collaborazione con Soltec ha sviluppato un metodo innovativo, Dy-WIND per un'analisi dinamica completa nel design del vento del tracker array. Con 15 anni di esperienza specialistica, Soltec ha incorporato questo metodo nella progettazione di inseguitori Soltec.

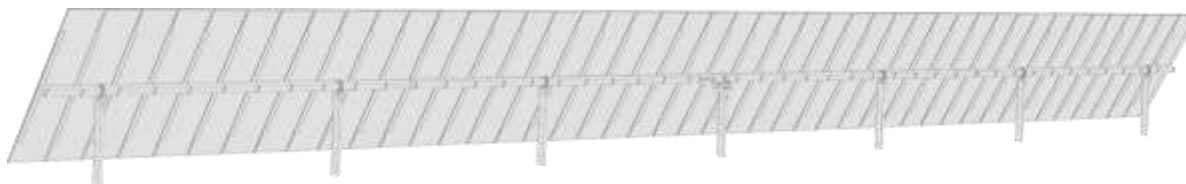


Figura 3 – modello di progetto inseguitore tipo tracker

## 1.2 Strutture ad inseguimento - il metodo di studio

Nella progettazione di inseguitori solari diversi sono i fattori che influenzano la loro risposta agli effetti dinamici del vento. L'equazione del moto presenta la seguente forma:

$$I \cdot \ddot{\alpha} + k \cdot \alpha + c \cdot \dot{\alpha} = M_{SE} + M_{BUFF}$$

Al fine di studiare gli effetti del vento sulla struttura del tracker devono essere considerati diversi fenomeni come la fluttuazione del vento e la turbolenza. La parte di fluttuazione dei carichi del vento è dovuta alla

turbolenza del vento e alla risposta dinamica della struttura. I carichi inerziali dovuti alla vibrazione risonante possono aumentare in modo significativo i carichi fluttuanti del vento.

L'approccio sviluppato insieme a EWDI combina i risultati dei test in galleria del vento con l'analisi numerica per studiare l'influenza dei principali meccanismi che causano vibrazioni o instabilità nel tracker.

**1.2.1 Vibrazione di risonanza**

La vibrazione di risonanza è causata dal generatore wind buffer o dall'effetto di risonanza della scia causato dalla turbolenza generata dalle file sopravvento di un campo tracker. Questo meccanismo è studiato con i dati sulla pressione in galleria del vento e l'amplificazione del carico è rappresentata da un metodo ibrido di dinamici fattori di amplificazione (DAF) e metodo di analisi del buffer (BAM) utilizzando i dati della galleria del vento come input.

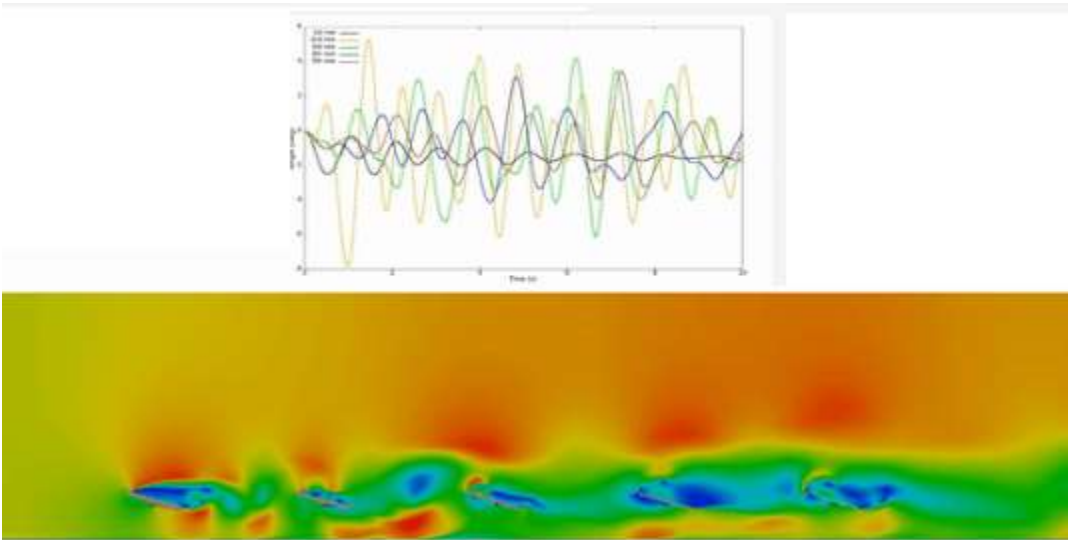


Figura 4 Simulazioni CFD eseguite da Soltec in collaborazione con Lynx basate sulla metodologia Dy-Wind

**1.2.2 Flutter torsionale**

Flutter è un'instabilità aerodinamica autoeccitata in cui le forze aerodinamiche dipendono dalla rotazione della velocità angolare della struttura stessa, e può portare ad ampiezze molto ampie in moto torsionale o movimento torsionale e verticale accoppiato. Per inseguitori che fanno affidamento su un tubo di torsione centrale guidato da una singola posizione, viene creata una modalità di vibrazione a torsione da una forma di vibrazione generalmente iniziata alle estremità della fila. Flutter torsionale caratterizza l'elevato angolo di inclinazione.

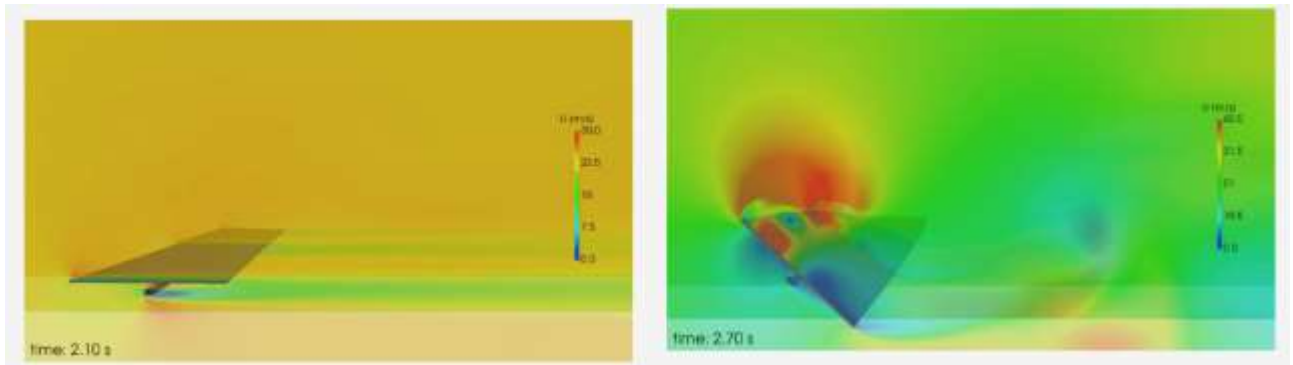


Figura 2 Simulazioni CFD eseguite da Soltec in collaborazione con Lynx basate sulla metodologia Dy-Wind

### 1.2.2 Galoppo torsionale

Questa instabilità dipende dalla rotazione della struttura e può portare a grandi risposte nella stessa a causa delle vibrazioni nel momento di beccaggio aerodinamico. All’inizio, il crescente movimento di beccaggio riduce la rigidità strutturale complessiva, determinando torsioni unidirezionali della struttura o movimenti oscillatori a seconda della rigidità residua della struttura. Con l’aumentare della velocità del vento è probabile che questa instabilità causerà un guasto una volta superata la resistenza. Questa instabilità è indicata come “Torsional Galloping”, che caratterizza il comportamento dell’angolo di inclinazione basso.

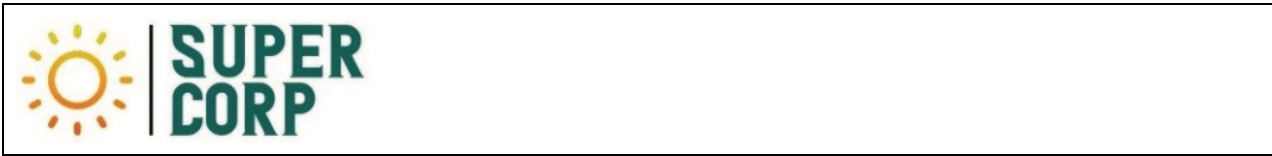
Due analisi numeriche sono implementate per affrontare i meccanismi 2 e 3:

- Fluttering Analysis Method (FAM): predice la massima velocità del vento consentita prima che si verifichi l’instabilità;
- Buffeting Analysis Method (BAM): predice la risposta del tracker (carico a deflessione) a causa dell’azione del vento per gli array a più righe nel dominio del tempo.

Per eseguire queste analisi numeriche è fondamentale condurre due tipi di test in galleria del vento. I dati sperimentali ottenuti nella galleria del vento sono combinati con metodi numerici per ottenere ciascun metodo (DAF-BAM, FAM e BAM).

Il test convenzionale della pressione in galleria del vento utilizza modelli rigidi e può prevedere la forza del vento su ciascuna fila tenendo conto della scia del flusso d’aria dietro ogni fila. Questo funziona per determinare i fattori di amplificazione dinamica (DAF) per coprire l’intervallo di velocità del vento di progetto





e tutte le direzioni del vento. Anche le misurazioni della velocità del vento con questo modello sono necessarie come input in FAM e BAM per gli array a più righe.

Il test dinamico della galleria del vento utilizza modelli aeroelastici per catturare la risposta e inoltre prevedere il comportamento della struttura in funzione della velocità del vento e del tempo. Questo funziona per determinare i coefficienti FAM e BAM.

### **1.2.3 Pressione del vento in galleria e test di velocità (modelli rigidi + DAF)**

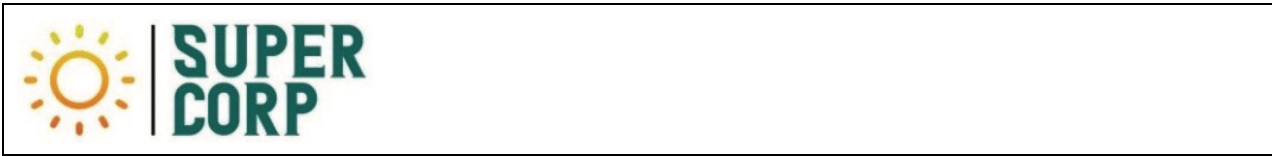
I coefficienti di carico statico del vento sono ottenuti dalle prove di pressione nella galleria del vento. Questi coefficienti non includono una tolleranza per il caricamento risonante causato da vibrazioni risonanti o buffeting indotto dal risveglio. I fattori dinamici di amplificazione (DAF) rappresentano l'amplificazione del circuito dovuta a questi effetti, in base alla frequenza naturale di vibrazione del sistema strutturale, alla velocità del vento, alla lunghezza della corda e allo smorzamento nel sistema. Sono inoltre necessarie misurazioni della velocità del vento che forniscono il relativo cambiamento di velocità attraverso un array utilizzando il modello rigido come input in FAM e BAM.

È importante notare che questi coefficienti si basano su test in galleria del vento utilizzando modelli rigidi e, pertanto, non includono effetti di interazione fluido-struttura (o effetti aeroelastici). Questi effetti sono calcolati utilizzando i dati della pressione del tunnel del vento misurati come input per l'analisi del budder del dominio del tempo. Questo approccio ibrido di Dynamic Amplification Factors e Buffeting Analysis Method consente un previsione completa del carico su array multi-fila su tutte le velocità del vento e le direzioni del vento. Questo metodo mostra che le prime due righe esterne in un campo di tracker sono le più colpite. Oltre la seconda fila, le file di inseguitori hanno un effetto di riparo e le forze del vento sulle file interne sono notevolmente ridotte.

### **1.2.4 Test dinamici della galleria del vento**

Per studiare gli effetti aeroelastici associati alle instabilità, devono essere affrontati FAM e BAM. Il primo passo per eseguire questi due metodi è quello di ottenere i derivati aerodinamici dai test dinamici della galleria del vento e quindi implementare metodi e simulazioni numerici.

Per fare ciò, una sezione del tracker viene modellata su una scala appropriata, quindi viene esaminata nella galleria del vento progettata per questo scopo. Implementando un sistema di sospensione a molla e



utilizzando lo smorzamento a correnti parassite, la rigidità torsionale, l'inerzia e il coefficiente di smorzamento vengono replicati, consentendo la rotazione del modello.

Una volta ottenuti i derivati aerodinamici (per la rigidità e lo smorzamento) nella galleria del vento, vengono sviluppati due diversi modelli numerici per implementare gli studi FAM e BAM:

- FAM: utilizza un modello numerico, misurazioni della velocità del vento da matrici a più righe e i derivati aerodinamici per prevedere la velocità massima del vento a posizioni di angolo di inclinazione variabile prima che il localizzatore diventi instabile e si verifichi il galoppo/flutter torsionale.
- BAM: utilizza un modello numerico, misurazioni della velocità del vento e della pressione da matrici multiple, i derivati aerodinamici e le fluttuazioni del vento per prevedere la deflessione torsionale del localizzatore. Questo modello numerico può anche essere utilizzato per estrarre le forze autoeccitate, le forze inerziali e le forze del vento che agiscono sul tracker per la progettazione.

#### **1.2.4.1 Flutter Analysis Method (FAM)**

La stabilità del tracker viene analizzata per valutare la sua risposta alle azioni dinamiche del vento. È importante che i fenomeni di instabilità, come il galoppo torsionale e il flutter torsionale, siano presi in considerazione quando si progettano i tracker e si predice il loro comportamento.

I risultati di questa analisi forniscono la variazione dello smorzamento totale (strutturale + aerodinamico) in funzione della velocità del vento. L'instabilità è definita come il punto in cui lo smorzamento totale è inferiore a 0. Questo studio è molto rilevante in quanto contrassegna la velocità del vento critico prima che il tracker vada in un'instabilità.

Questo metodo può essere applicato a matrici a più file mediante l'applicazione di misurazioni della velocità del vento a diversi angoli di inclinazione del localizzatore e mostra come la rigidità torsionale del sistema (strutturale + aerodinamica) diminuisca con l'aumentare della velocità del vento. Questa influenza ha associato ad essa una perdita di frequenza naturale, quindi il tracker tende ad essere più suscettibile alle azioni di buffeting del vento quando la velocità del vento aumenta per gli angoli di inclinazione bassi.

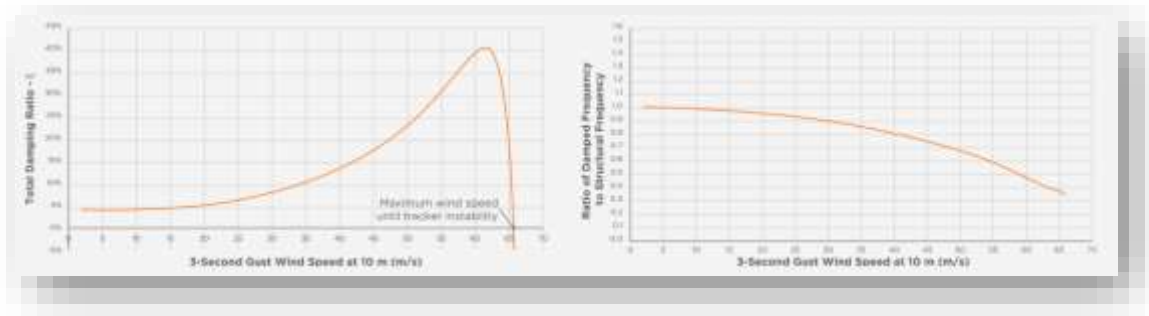


Figura 3 a sinistra FAM: rapporto di smorzamento/velocità del vento - a destra: rapporto di frequenza/velocità del vento

#### 1.2.4.2 Metodo di analisi del buffer (BAM)

L'applicazione di questo metodo predice meglio il comportamento di un array tracker multi-fila sotto l'azione del vento, fornendo al contempo flessibilità nel processo di progettazione generalmente non pratico attraverso il test completo del modello aeroelastico. Questo metodo può simulare sia l'intero spettro delle fluttuazioni della turbolenza del vento sia la risposta del tracker a causa di forze auto-eccitazione e di buffeting. La forzatura dinamica è amplificata dal movimento strutturale e potrebbe produrre problemi strutturali con velocità del vento al di sotto della velocità di insorgenza critica per un'instabilità aerodinamica. BAM è il metodo raccomandato per tenere conto dell'intero spettro delle fluttuazioni del picco del vento. Ciò significa che il momento massimo o la massima rotazione del tracker saranno calcolati dalla velocità massima del vento di picco, che rappresenta il carico del caso peggiore. Questo è fondamentale nelle regioni prossime alla massima velocità del vento consentita prima che si verifichi instabilità.

Con questo metodo, i momenti massimi e la forza dovuta alle azioni del vento possono essere analizzati in ogni membro del tracker, quindi la progettazione di ciascuna di queste parti è più affidabile rispetto a qualsiasi altro metodo.

I risultati dell'analisi del buffer nelle serie temporali della rotazione del tracker e queste risposte possono essere utilizzate per prevedere la risposta massima del momento indotta dal vento, i picchi di fluttuazione del vento, i carichi inerziali e le forze autoeccitate. Se lo smorzamento complessivo nel sistema è negativo, la soluzione numerica per il localizzatore sarà instabile (oltre la velocità massima consentita del vento indicata nell'analisi del flutter).



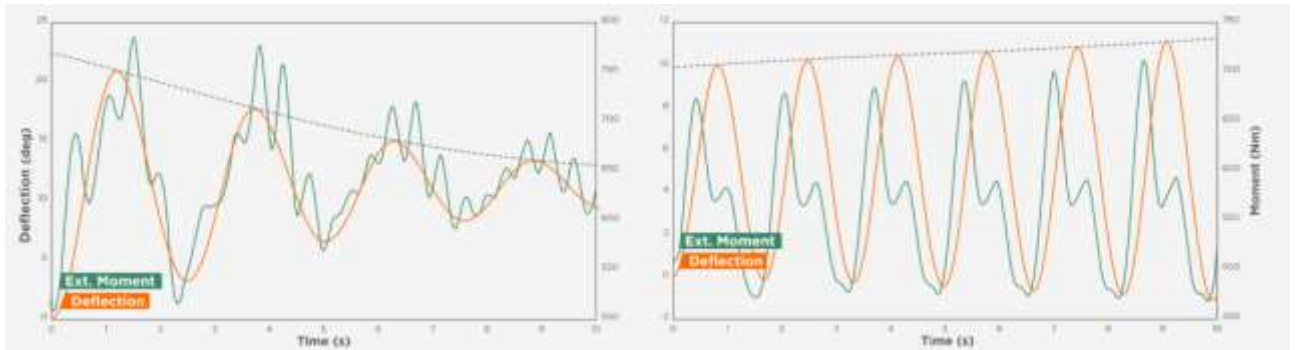


Figura 4 a sinistra FAM: risposta di stabilità (segnale smorzamento) - a destra: risposta all'impossibilità (aspetti strutturali previsti)

### 1.2.4.3 Confronto tra carichi di vento statici e dinamici

L'effetto maggiore prodotto dal vento è il momento torsionale. Questo momento di torsione influisce sul tubo di torsione e sul gruppo di supporto del motore. È notevolmente aumentato dagli effetti dinamici descritti in questo documento. Nelle tabelle seguenti c'è un confronto tra i momenti statici e quelli dinamici che influenzerebbero ciascuno dei componenti del tracker per diverse velocità del vento secondo ASCE 7 ed Eurocode.

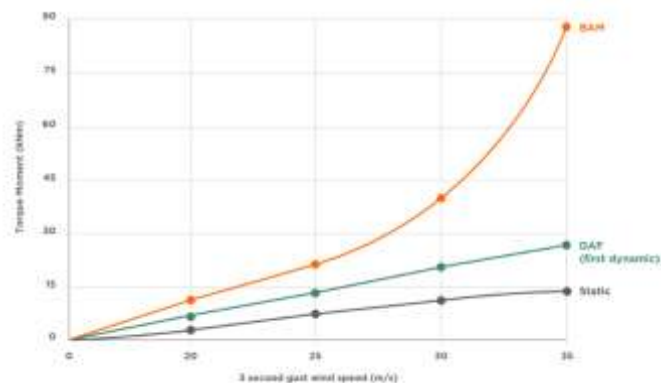


Figura 5 confronto tra carichi di vento statici e dinamici

Velocità del vento	Statico	DAF	Buffeting	$\Delta$ da statico
20 m/s	4,8 Nm	7,4 kNm	11,8 kNm	x 2,45
25 m/s	7,5 Nm	13,6 kNm	22,1 kNm	x 2,95
30 m/s	10,9 kNm	20,4 kNm	40,6 kNm	x 3,72
35 m/s	14,8 kNm	27,8 kNm	88,5 kNm	x 5,98

In conclusione, si osserva che gli effetti del vento dinamico amplificano considerevolmente il momento torsionale sulla struttura del tracker. Il design affidabile del localizzatore richiede tubi con pareti più spesse e un gruppo di supporto del motore di sezione maggiore rispetto a quelli indicati quando si considerano solo i coefficienti statici. Come si può vedere, l'incremento del momento risulta essere più elevato secondo l'approccio BAM rispetto all'approccio DAF. L'applicazione dei risultati BAM indica un aumento di materiale nelle sezioni trasversali dei profili strutturali per ottenere forza e rigidità e, di conseguenza, un aumento proporzionale del costo unitario per inseguitore.

È da sottolineare che le strutture sono dotate di sistemi di protezione che permettono l'orientamento del tracker in caso di venti superiori a valori ammissibili prefissati.

## 2. Strutture fisse

Per quanto riguarda le strutture fisse si è fatto riferimento alla progettazione ed agli studi dell'azienda produttrice che dimensiona le strutture in ragione dello specifico sito di installazione, delle caratteristiche geometriche dell'impianto (angolo di tilt, altezza da terra, disposizioni dei moduli ecc.). Saranno quindi definiti gli interassi effettivi degli appoggi e determinato lo spessore idoneo dei materiali al fine di evitare qualsiasi tipo di lavorazione aggiuntiva in cantiere.

La progettazione è basata su verifiche strutturali in base a quanto previsto dalle norme vigenti in materia determinando, attraverso software di analisi FEM, l'ottimizzazione di ogni singolo elemento strutturale in ragione delle condizioni di carico e della loro combinazione (vento, neve, peso proprio e sisma).

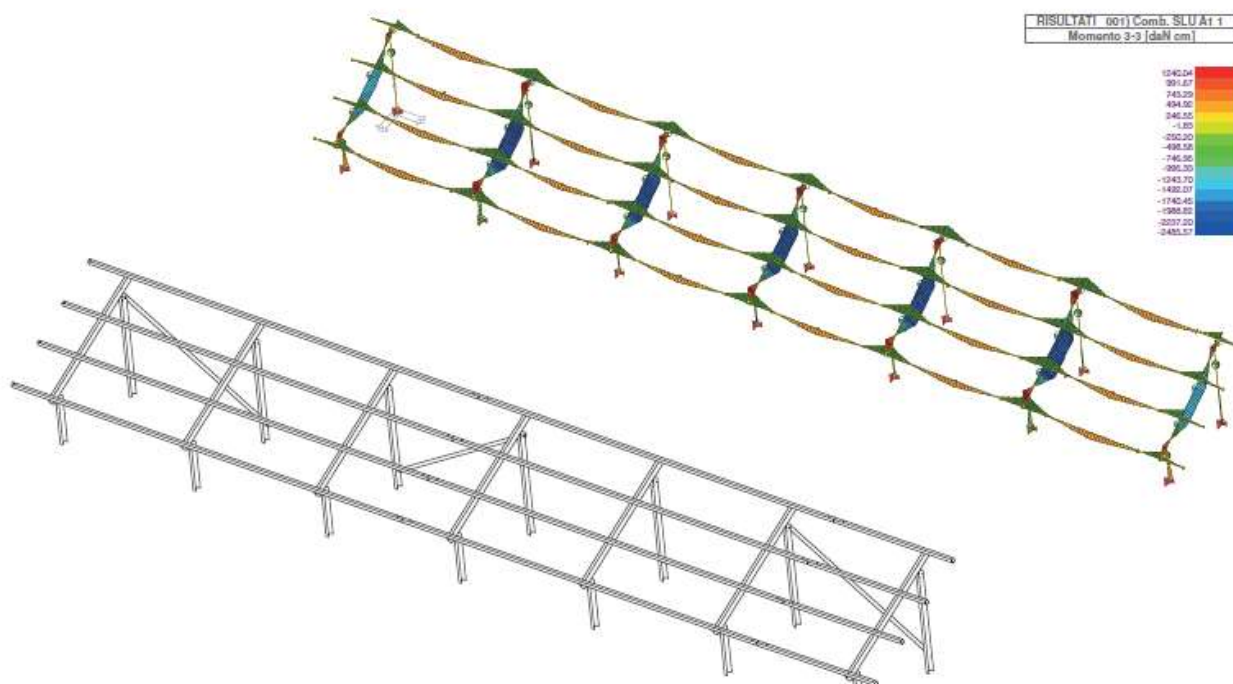


Figura 5 – Schemi di carico strutture fisse

A valle della progettazione esecutiva saranno quindi effettuati tutte le verifiche strutturali in accordo con la vigente normativa.

### 3. Ancoraggio al terreno di fondazione

Le strutture dei moduli saranno ancorati al terreno mediante infissione del montante per una profondità dimensionata in riferimento alle sollecitazioni indotte dalla sovrastruttura. I carichi dimensionanti sono quelli derivanti dalla combinazione delle azioni del vento incidente sulla struttura che provocano a livello fondale degli sforzi assiali sul montante. Il predimensionamento della profondità di infissione è soddisfatto se l'azione assiale esercitata dal vento è equilibrata dalle azioni tangenziali dovute al contatto con il terreno.

In fase di progettazione esecutiva sarà definita l'effettiva profondità di infissione (preliminarmente dimensionata nell'ordine di 1,5 – 2 m) atta a garantire l'equilibrio statico del sistema compatibile con le caratteristiche geomeccaniche del terreno di sedime, desumibili dalla relazione geologica.



## Conclusioni

Vista la natura dell'opera le azioni significative per il pre-dimensionamento delle strutture sono rappresentata dalla distribuzione dei carichi derivanti dalle azioni del vento. Altre azioni minori e certamente non dimensionanti, sono rappresentate dal peso proprio delle strutture, dal carico da neve e dalle azioni dinamiche indotte dalle sollecitazioni sismiche.

Le sollecitazioni derivanti da dette azioni risultano secondarie all'analisi strutturale rispetto alle azioni dinamiche indotte dal vento, visto soprattutto la trascurabile massa dei moduli che ricopre un ruolo determinante nelle verifiche statiche e dinamiche da sisma. Inoltre, vista la posizione dell'area di intervento i carichi da neve risultano marginali.

Rinviando alla progettazione esecutiva la verifica strutturale delle opere secondo i dettami delle NTC2018, considerando quindi l'analisi dei carichi rigorosa e la combinazione delle azioni sui vari elementi strutturali, dalle verifiche svolte è evidente la piena compatibilità dell'opera per come pre-dimensionata, sotto l'aspetto statico e dinamico.