



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E AEROSPAZIALE

Corso di di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Studio di fattibilità sull'utilizzo di un rotore eolico su Marte

Candidato:

Francesco Maria Labartino

Matricola S265788

Relatore:

Gaetano Iuso

Alla mia Famiglia

Sommario

La seguente tesi di laurea magistrale è incentrata sulla valutazione della possibilità di utilizzo delle fonti rinnovabili ed in particolare dell'energia eolica, in pianeti extraterrestri dotati di atmosfera come Marte.

Nel primo capitolo si analizzerà il pianeta partendo dalla sua composizione atmosferica e geologica ed in seguito l'analisi del vento rilevato dagli strumenti equipaggiati sui lander e rover marziani.

Nel secondo capitolo si esamineranno, invece, le potenze richieste dai singoli strumenti che compongono il payload di tre diversi lander e rover marziani.

Infine, nel terzo capitolo si effettueranno dei calcoli preliminari per determinare la quantità di energia ricavata da un ipotetico rotore eolico posizionato sulla superficie marziana sfruttando l'energia del vento.

Indice

Introduzione	7
1 Marte e i suoi venti	9
1.1 Caratteristiche fisiche del pianeta	11
1.1.1 Struttura interna	11
1.1.2 La superficie	12
1.1.3 Atmosfera	13
1.2 Clima marziano	15
1.3 Rilevamento dei sistemi ventosi marziani e la loro analisi	16
1.3.1 MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile EvolutioN)	16
1.3.2 TWINS (Temperature and Wind for InSight)	20
2 Analisi delle potenze richieste dai payload dei rover marziani	32
2.1 Opportunity	32
2.1.1 Mission Overview	34
2.1.2 Analisi energetica dei Payload	37
2.2 Perseverance	42
2.2.1 Mission Overview	43
2.2.2 Analisi energetica del Payload	44
2.3 InSight	50
2.3.1 Mission Overview	50
2.3.2 Analisi energetica dei Payload	51
2.4 Sistemi di produzione energetica	54
3 Un rotore eolico su Marte?	61
3.1 Energia eolica	61

<i>INDICE</i>	2
3.2 Le tipologie di rotori eolici	68
3.3 Potenza estratta dal vento marziano	71
4 Conclusioni e sviluppi futuri	79
Ringraziamenti	81
Codici Matlab	82
Bibliografia	93

Elenco delle figure

1	<i>La figura rappresenta un concept raffigurante un possibile habitat umano su Marte.</i>	7
1.1	<i>Un'immagine a colori reali di Marte scattata dallo strumento OSIRIS della sonda spaziale dell'Agenzia Spaziale Europea Rosetta durante il passaggio ravvicinato del febbraio 2007.</i>	9
1.2	<i>Nell'immagine sovrastante è rappresentata Mariner 4, sonda della NASA lanciata per studiare Marte</i>	10
1.3	<i>Struttura interna del pianeta Marte,(ricostruzione artistica a cura della NASA)</i>	12
1.4	<i>Superficie marziana ripresa dal rover Opportunity della NASA</i>	13
1.5	<i>tracce di metano rilasciate nell'atmosfera durante l'estate nell'emisfero nord del pianeta, elaborazione a cura della NASA (2009)</i>	15
1.6	<i>Inserimento e manovre per stabilizzare l'orbiter MAVEN in orbita eccentrica intorno a Marte[8]</i>	17
1.7	<i>Visualizzazione generata da computer dei percorsi orbitali (punti bianchi) presi dal veicolo spaziale MAVEN mentre mappava i venti (linee blu) nell'atmosfera superiore marziana. Le linee rosse provenienti dai punti bianchi rappresentano la velocità e la direzione del vento locale, misurate dallo strumento del gas neutro e dello spettrometro di massa ionica MAVEN</i>	18
1.8	<i>Illustrazione artistica che mostra il vento (freccie blu) soffiare su un aspro terreno marziano generando disturbi nella circolazione che si propagano verso l'alto come onde di gravità atmosferiche (linee grigie). Il veicolo spaziale Maven è in grado di rilevare queste onde che, fungendo da impronta di ciò che le ha generate, permettono di risalire all'orografia del terreno</i>	18

1.9	<i>Un "Diavolo di polvere" di Marte, ritratto dalla MRO. Strumento: HiRISE.</i>	
	<i>Crediti: NASA/JPL/University of Arizona</i>	19
1.10	<i>Illustrazione artistica che mostra il sito di atterraggio del lander InSight . .</i>	20
1.11	<i>CAD della coppia di sensori TWINS posizionato sul APSS di InSight . . .</i>	21
1.12	<i>Report metereologico stagionale su Elysium Plantia</i>	22
1.13	<i>TWINS (Temperature and Wind for InSight) (Foto realizzata da InSight.) .</i>	23
1.14	<i>Post-processing dei dati riguardanti la componente orizzontale della velocità del vento marziano riportata in m/s con riferimento a 30 Sol marziani . .</i>	24
1.15	<i>Probability Density Function della componente orizzontale della velocità del vento marziano. La curva nera rappresenta la distribuzione di Weibull mentre la curva rossa quella Normale</i>	25
1.16	<i>Cumulative Density Function della componente orizzontale della velocità del vento marziano. La curva blu rappresenta la distribuzione Normale mentre la curva rossa quella Weibull</i>	26
1.17	<i>Probability Density Function della direzione del vento marziano. La curva rossa rappresenta la distribuzione Normale di probabilità</i>	27
1.18	<i>Andamento della temperatura atmosferica rilevati dallo strumento TWINS del lander InSight</i>	29
2.1	<i>Ricostruzione artisitica di Opportunity o MER-B del JPL della NASA(credit: NASA)</i>	33
2.2	<i>Percorso effettuato da Opportunity o MER-B del JPL della NASA(credit: NASA)</i>	35
2.3	<i>Immagini scattate da Opportunity raffiguranti i propri pannelli solari ap- pena dopo l'atterraggio e gli stessi ricoperti di polvere (credit: NASA) . . .</i>	36
2.4	<i>Divisione massa ed energia dei payload scientifici di Opportunity</i>	41
2.5	<i>Immagine che rappresenta la testa del rover Perseverance accanto al piccolo drone Ingenuity</i>	42
2.6	<i>Immagine che rappresenta gli step della fase EDL (Entry Descent e Lan- ding) di Perseverance sul cratere Jezero</i>	43
2.7	<i>Immagine artistica redatta dalla NASA che rappresenta la posizione e il nome degli strumenti facenti parte del Payload scientifico del rover</i>	44
2.8	<i>Divisione masse ed energia dei payload di Perseverance</i>	50

2.9	<i>Foto artistica a cura della NASA che ritrae il lander InSight con i pannelli solari e il sismografo SEIS adagiato sulla superficie marziana</i>	51
2.10	<i>Divisione masse ed energia dei payload di InSight</i>	54
2.11	<i>Schema dimostrativo che mostra l'assorbimento di energia da parte di una cella solare</i>	56
2.12	<i>Densità di potenza in uscita in funzione dell'angolo di incidenza dei raggi solari</i>	57
2.13	<i>Confronto della densità di potenza in uscita in funzione dell'angolo di incidenza dei raggi solari tra Marte e la Terra</i>	58
2.14	<i>Deposito polveroso sui pannelli di InSight</i>	59
3.1	<i>Tubo di flusso</i>	61
3.2	<i>Tubo di flusso attorno ad un rotore eolico ad asse orizzontale</i>	63
3.3	<i>coefficiente di potenza in funzione del fattore di interferenza[22]</i>	67
3.4	<i>Schema di funzionamento di una turbina Savonius</i>	69
3.5	<i>Tipologie di turbine Darrieus</i>	70
3.6	<i>Turbina ibrida Savonius-Darrieus</i>	70
3.7	<i>Calcolo della velocità media sulla superficie marziana</i>	71
3.8	<i>Calcolo del numero di Reynolds del flusso indisturbato</i>	72
3.9	<i>profilo alare sperimentale utilizzato a bassi numeri di Reynolds studiato da JAXA in collaborazione con il Politecnico di Torino [21]</i>	73
3.10	<i>Potenza istantanea me evidenza la variabilità del vento marziano nella piana di Elysium.</i>	74
3.11	<i>PDF di tutti i dati ricavati dallo strumento TWIN nel sito di Elysium Planitia</i>	75
3.12	<i>Andamento della potenza media durante il mese marziano analizzato</i>	76

Elenco delle tabelle

1.1	Composizione chimica dell'atmosfera marziana	14
1.2	Caratteristiche fisiche degli elementi della atmosfera marziana	30
1.3	Viscosità Marziana di prima approssimazione presso Elysium Plantia . . .	30
2.1	Power budget Payload Scientifico di Opportunity	41
2.2	Power budget Payload Scientifico di Perseverance	49
2.3	Power budget Payload Scientifico di InSight	54
2.4	Tabulazione delle densità superficiale di potenza del sole in ingresso alla cella e delle efficienze delle varie tipologie di celle fotovoltaiche	57
2.5	Energia sviluppata dai pannelli solari montati su ogni rover o lander ana- lizzato in questo studio.	58
2.6	Energia richiesta dalle batterie dei vari rover e lander analizzati	60
3.1	Tempi di ricarica delle batterie dei principali rover e lander analizzati nel capitolo precedente	76

Introduzione

Negli ultimi anni, vi è un rinnovato interesse verso il pianeta rosso: Marte. Molte agenzie spaziali sia pubbliche che private (NASA, ESA, SPACE X, BLUE ORIGIN) hanno intrapreso una vera e propria impresa, alla base della quale vi è un unico obiettivo comune: essere i primi a poggiare un piede sul pianeta rosso e soprattutto colonizzarlo. La migliore ipotesi è che l'umanità installerà basi abitate su Marte negli anni '30. Creare una colonia su Marte sarà molto difficile. La piccola compagnia olandese Mars One afferma che invierà pionieri entro il 2032, ma pochi esperti esterni ritengono che ciò sia fattibile. SpaceX di Elon Musk prevede di inviare su Marte, entro 2022, due navi cargo senza equipaggio ma piene di attrezzature e scorte. Musk ha detto che intende avere una *Base Alpha* su Marte pronta per i primi coloni entro il 2028. Sempre relativamente a Marte, la cronologia della NASA prevede una missione con equipaggio che entri in orbita intorno al Pianeta Rosso che rientri senza atterrare per poi mandare una missione che atterri sul suolo marziano nel 2039. [24]

Per poter raggiungere tale obiettivo, bisogna prima di tutto studiare il pianeta, la sua atmosfera, la sua geologia, la sua composizione chimica. In seguito, bisognerebbe

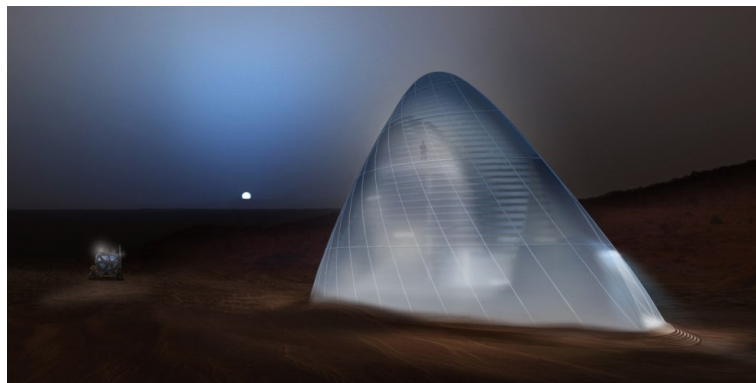


Figura 1: *La figura rappresenta un concept raffigurante un possibile habitat umano su Marte.*

assicurarsi che gli astronauti arrivino in buone condizioni fisiche sulla superficie del pianeta e questo significa prevedere un adeguato sistema di contromisure da attuare nella fase di pre-volo, volo e post-volo. Infine si devono prevedere delle strutture abitative per condurre la vita quotidiana e gli eventuali esperimenti da svolgere durante la permanenza sul pianeta. E' indispensabile, pertanto comprendere quali siano, una volta atterrati sul pianeta, le principali fonti di energia che potenzialmente possano aiutare a raggiungere il corretto fabbisogno energetico per sostenere ivi la vita.

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è incentrato su uno studio di fattibilità inerente allo sfruttamento dei venti marziani tramite un rotore eolico, al fine di generare energia elettrica utile al funzionamento degli apparati, strumentazioni ed attrezzature utilizzate per le missioni su Marte.

La tesi è articolata in 3 capitoli. Il primo capitolo porrà l'attenzione sul pianeta rosso ripercorrendo brevemente quelle che sono le sue caratteristiche geologiche ed atmosferiche e infine studiare statisticamente il vento rilevato dal rover InSight. Questo preambolo sarà sicuramente utile per gettare le basi dello studio. Il secondo capitolo l'attenzione sarà focalizzata sull'analisi delle fonti energetiche che principalmente vengono attualmente utilizzate sui rover e lander marziani. Nel terzo capitolo si effettueranno calcoli preliminari per determinare se l'energia ricavata dal vento marziano sia sufficiente a ricaricare delle batterie comunemente utilizzate in ambito "space". Infine nel capitolo finale verranno esposti dettagliatamente i risultati derivanti dallo studio condotto.

Le motivazioni che mi hanno spinto ad approfondire tale tema sono state principalmente due. In primis il mio interesse a studiare quali fossero le fonti energetiche naturali utilizzabili in loco come l'energia eolica e condurre uno studio multidisciplinare, volto a migliorare e sfruttare al meglio tutte le potenzialità nascoste di Marte. Il secondo luogo, la mia volontà di mettere a sistema le competenze apprese durante il mio corso di studi magistrali e quelle assunte lavorando nel team studentesco EoliTo del Politecnico di Torino. Il lavoro si inquadra in uno studio di fattibilità circa il potenziale sfruttamento dell'energia eolica quale contributo complementare a quella solare.

Capitolo 1

Marte e i suoi venti

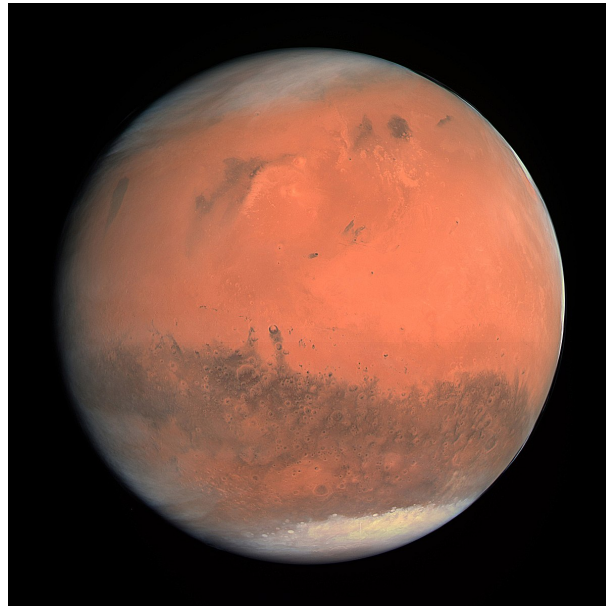


Figura 1.1: *Un'immagine a colori reali di Marte scattata dallo strumento OSIRIS della sonda spaziale dell'Agenzia Spaziale Europea Rosetta durante il passaggio ravvicinato del febbraio 2007.*

Marte è il quarto pianeta del sistema solare in ordine di distanza dal Sole; è visibile a occhio nudo ed è l'ultimo dei pianeti interni dopo Mercurio, Venere e la Terra. Marte è chiamato pianeta rosso a causa del suo colore caratteristico causato dalla grande quantità di ossido di ferro che lo ricopre [2]. Marte ha una massa pari ad appena l'11% di quella terrestre e il suo raggio equatoriale misura 3392,8 km. Sulla superficie di Marte l'accelerazione di gravità è mediamente un terzo di quella terrestre.[1]

Seppur presentando temperature medie superficiali molto basse e un'atmosfera molto rarefatta, Marte è il pianeta più simile alla Terra tra quelli del sistema solare. Le sue dimensioni sono intermedie tra quelle del nostro pianeta e quelle della Luna, e ha un'inclinazione dell'asse di rotazione e la durata del giorno simili a quelli terrestri. La sua superficie presenta formazioni vulcaniche, valli, calotte polari e deserti sabbiosi, canyon e formazioni geologiche che suggeriscono la presenza di un'idrosfera in un lontano passato. La superficie del pianeta appare craterizzata, a causa della totale assenza di attività tettonica delle placche capace di modellare le strutture superficiali del pianeta. La bassissima densità dell'atmosfera, inoltre non è poi in grado di consumare buona parte delle meteore, che pertanto raggiungono il suolo con maggior frequenza rispetto alla Terra. Tra le formazioni geologiche marziane più importanti si segnalano: l'Olympus Mons, il vulcano più grande del sistema solare (alto 27 km); le Valles Marineris, un lungo canyon notevolmente più esteso di quelli terrestri e un enorme cratere sull'emisfero boreale, ampio circa il 40% dell'intera superficie marziana [4].

All'osservazione diretta, Marte presenta variazioni di colore, imputate storicamente alla presenza di vegetazione stagionale; ma successive osservazioni spettroscopiche dell'atmosfera hanno da tempo fatto abbandonare l'ipotesi che vi potessero essere mari, canali e fiumi oppure un'atmosfera sufficientemente densa. La smentita finale arrivò grazie alla missione Mariner 4 della NASA, che nel 1965 mostrò un pianeta desertico e arido, animato da tempeste di sabbia periodiche e particolarmente violente. Missioni più recenti hanno evidenziato la presenza di acqua ghiacciata ma localizzata in alcuni punti della superficie e soprattutto nel sottosuolo.[1]



Figura 1.2: *Nell'immagine sovrastante è rappresentata Mariner 4, sonda della NASA lanciata per studiare Marte*

Intorno al pianeta orbitano due satelliti naturali, Fobos e Deimos, di piccole dimensioni

e dalla forma irregolare.

Numerose sono state le missioni verso Marte intraprese da Unione Sovietica, Stati Uniti, Europa e Giappone per studiarne la geologia, l'atmosfera e la superficie del nostro vicino pianeta. Circa metà delle missioni tuttavia sono risultate degli insuccessi costituiti da perdite e da vari inconvenienti tecnici. Anche per questo motivo il pianeta conserva il suo fascino, il suo mistero e, più in generale, un'ulteriore motivazione per proseguire le ricerche. Le probabilità di trovare tracce di vita su questo pianeta, così come esso ci appare, sono estremamente ridotte; tuttavia, se fosse confermata la presenza di acqua in tempi remoti, aumenterebbero le probabilità di trovare tracce di vita passata. Quest'ultimo compito lo sta svolgendo il rover Perseverance della NASA che è atterrata sulla superficie di Marte proprio lo scorso 18 Febbraio. [1]

Le missioni spaziali sono vincolate a finestre di lancio di 2-3 mesi ogni 780 giorni, corrispondente al *periodo sinodico* ossia il lasso di tempo che deve passare per far sì che i due pianeti siano nella stessa posizione relativa.

1.1 Caratteristiche fisiche del pianeta

1.1.1 Struttura interna

La crosta, il mantello e il nucleo di Marte si formarono circa 50 milioni di anni dopo la nascita del Sistema Solare e rimasero attivi per il primo miliardo di anni. Il mantello fu la regione rocciosa interna che trasferiva il calore generato durante l'accrescimento e formazione del nucleo. Si ritiene che la crosta sia stata creata dalla fusione della parte superiore del mantello mutando nel corso del tempo a causa di impatti con oggetti estranei, vulcanismo, movimenti successivi del mantello stesso ed erosione.

Grazie alle osservazioni della sua orbita attraverso lo spettrometro TES del Mars Global Surveyor e l'analisi dei meteoriti, è possibile sapere che Marte ha una superficie ricca di basalto. Alcune zone però mostrano quantità predominanti di silicio che potrebbe essere simile all'andesite sulla Terra. Gran parte della superficie è coperta da ossido ferrico che gli conferisce il suo peculiare colore rosso intenso. La crosta ha uno spessore medio di 50 km con un picco di 125 km. Facendo un confronto con quella terrestre, che ha uno spessore di circa 40 km in media, si potrebbe dire che la crosta marziana è tre volte più spessa, considerando le dimensioni doppie del nostro pianeta.[1]

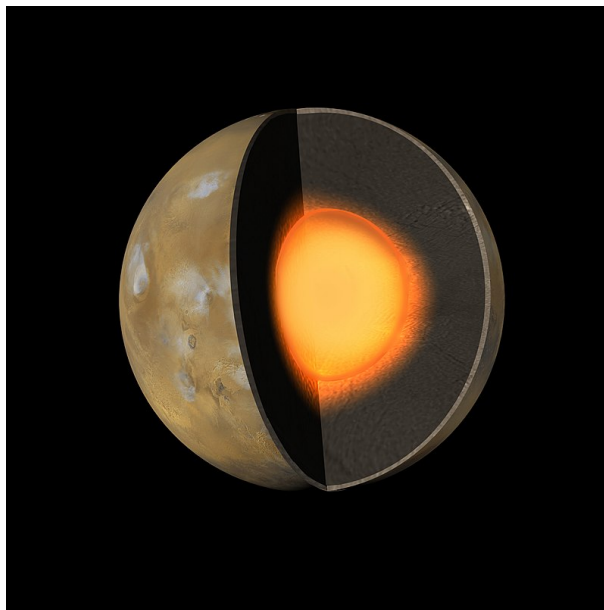


Figura 1.3: *Struttura interna del pianeta Marte, (ricostruzione artistica a cura della NASA)*

Il mantello, più denso di quello terrestre (di circa 2,35 volte), è composto soprattutto da silicati e, benché sia inattivo, è all'origine di tutte le testimonianze di fenomeni tettonici e vulcanici sul pianeta.

Il nucleo è composto principalmente da ferro e nichel, con una percentuale intorno al 16% di zolfo e si estende per un raggio di circa 1800 km. Molto probabilmente il nucleo è solido. Marte presenta un campo magnetico molto basso, questo comporta la mancanza di protezione del suolo dalle particelle cosmiche ad alta energia, solari, galattiche ed extragalattiche. Anche se Marte però non dispone di un campo magnetico intrinseco, lo studio del paleomagnetismo ha provato che si sia avuta una polarità alternata attorno ai due poli del pianeta grazie al ritrovamento di rocce magnetizzate: le rocce formatesi prima della scomparsa della magnetosfera marziana ormai magnetizzate, a differenza di quelle formatesi dopo [5].

1.1.2 La superficie

La superficie di Marte apparve, sin dalle prime esplorazioni mediante sonde, complessa e geologicamente diversificata. Mentre l'emisfero sud è ricoperto da vasti crateri e si eleva al di sopra del livello topografico di riferimento, l'emisfero nord è scarsamente craterizzato e situato generalmente al di sotto di tale livello. [1]

L'emisfero sud si compone principalmente di una crosta rocciosa molto antica, attraversata da numerosi canali naturali lunghi centinaia di chilometri e larghi qualche decina; localmente si possono individuare pianure di origine più recente.

L'emisfero nord, al contrario, presenta formazioni vulcaniche di notevoli dimensioni, con flussi di lava solidificati, numerosi canyon, ed un paesaggio generalmente diversificato e vario. La regione principale dell'emisfero, sede dei grandi vulcani, è Tharsis, un vasto rigonfiamento che si eleva fino a 10 km sul terreno circostante e che dà origine alla maggior parte delle fratture superficiali visibili. [3]



Figura 1.4: *Superficie marziana ripresa dal rover Opportunity della NASA*

Lo strato superficiale del pianeta è composto principalmente da silicati ed ossido di ferro, oltre ad altri composti chimicamente reattivi che possono rapidamente danneggiare eventuali materiali organici. La presenza di ghiaccio d'acqua su Marte è largamente testimoniata nei sedimenti delle regioni polari, sotto le calotte di anidride carbonica e sotto forma di permafrost, fino a 3 km di profondità. Le analisi delle sonde sul pianeta confermano che per lunghi periodi il pianeta fu percorso da fiumi e che ampie distese furono sommerse, forse anche per un miliardo d'anni. Le analisi svolte dalla sonda *Mars Express* hanno rivelato che il ghiaccio presente al polo sud, se sciolto, potrebbe coprire la superficie del pianeta con nove metri d'acqua. Il ghiaccio presente al polo sud, comunque, non è sufficiente a spiegare le estese erosioni della superficie e quindi gli scienziati stanno ricercando altri depositi d'acqua o altri fenomeni che possano spiegarle. [1]

1.1.3 Atmosfera

La magnetosfera di Marte è assente a livello globale e, in seguito alle rilevazioni del magnetometro MAG/ER del Mars Global Surveyor e considerando che è stata constatata l'assenza di magnetismo sopra i crateri Argyre e Hellas Planitia, si presume sia scomparsa da circa 4 miliardi di anni; i venti solari colpiscono quindi direttamente la ionosfera. Questo mantiene l'atmosfera del pianeta piuttosto sottile per via della continua asporta-

Composizione atmosferica	
Anidride carbonica	95%
Azoto	2,6%
Argon	1.6 %
Ossigeno	0.13 %
Monossido di carbonio	0.07 %
Vapore aqueo	0.03 %
Ossido di azoto	0.01 %
Neon	2.5 ppm
Kripton	0.3 ppm
Xeno	0.08 ppm
Ozono	0,03 ppm
Metano	0,01 ppm

Tabella 1.1: Composizione chimica dell'atmosfera marziana

zione di atomi dalla parte più esterna della stessa non facendola crescere abbastanza e densificarla. [1]

La pressione atmosferica media è di 700 Pa ma varia da un minimo di 30 Pa sull'Olympus Mons a oltre 1155 Pa nella depressione di Hellas Planitia. Per un paragone Marte ha una pressione atmosferica che è meno dell'1% rispetto a quella della Terra.

L'atmosfera marziana si compone principalmente di anidride carbonica (95%), azoto (2,7%), argon (1,6%), vapore acqueo, ossigeno e monossido di carbonio. Di seguito vengono riportate in forma tabellare i principali elementi chimici che compongono l'atmosfera marziana. Essi saranno fondamentali per lo studio.

Come si può notare dalla tabella sovrastante, vi sono tracce di metano rivenute su Marte, infatti è stato definitivamente provato che è presente metano nell'atmosfera marziana e in certe zone anche in grandi quantità; la concentrazione media si aggirerebbe comunque sulle 10 ppb (parti per miliardo) per unità di volume. Dato che il metano è un gas instabile che viene scomposto dalla radiazione ultravioletta solitamente in un periodo di 340 anni nelle condizioni atmosferiche marziane, la sua presenza indica l'esistenza di una fonte relativamente recente del gas. Tra le possibili cause vi possono essere l'attività

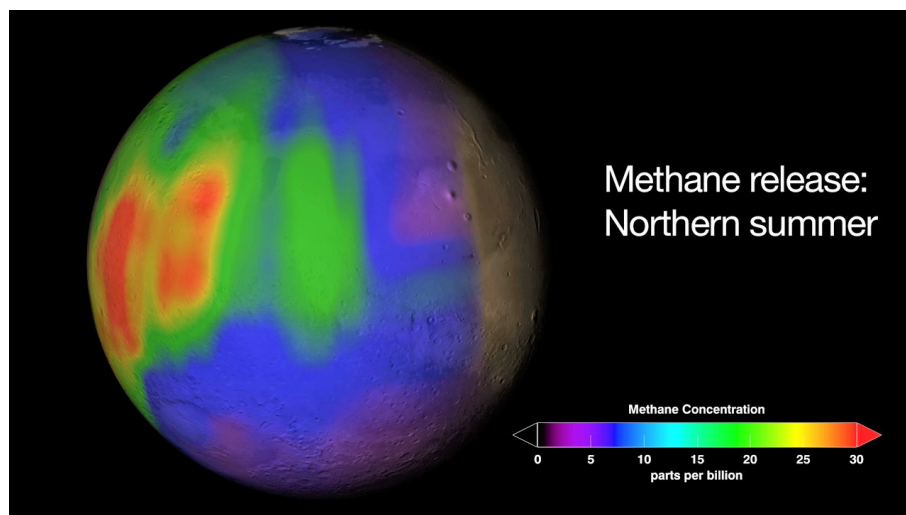


Figura 1.5: *tracce di metano rilasciate nell'atmosfera durante l'estate nell'emisfero nord del pianeta, elaborazione a cura della NASA (2009)*

vulcanica, l'impatto di una cometa e la presenza di forme di vita microbiche generanti metano. [1]

Durante l'inverno l'abbassamento della temperatura provoca la condensa del 25-30% dell'atmosfera che forma spessi strati di ghiaccio d'acqua o di anidride carbonica solida (ghiaccio secco). Con l'estate il ghiaccio sublima causando grandi sbalzi di pressione e conseguenti tempeste con venti che raggiungono i 400 km/h. Questi fenomeni stagionali trasportano grandi quantità di polveri e vapore d'acqua che generano grandi cirri. Queste nuvole vennero fotografate dal rover Opportunity nel 2004.

1.2 Clima marziano

Tra tutti i pianeti del sistema solare Marte è quello con il clima più simile a quello terrestre per via dell'inclinazione del suo asse di rotazione. Le stagioni tuttavia durano circa il doppio dato che la distanza dal Sole lo porta ad avere un anno di circa 1,88 anni terrestri. Le temperature variano dai -140°C a 20°C dell'estate. La forte escursione termica è dovuta anche al fatto che Marte ha un'atmosfera sottile (e quindi una bassa pressione atmosferica) e quindi una bassa capacità di trattenere il calore del suolo.

Una differenza interessante rispetto al clima terrestre è dovuta alla sua orbita molto eccentrica. Infatti Marte è prossimo al periastro quando è estate nell'emisfero meridionale (e l'inverno in quello settentrionale) e vicino all'apoastro nella situazione opposta. La

conseguenza è un clima con una maggiore escursione termica nell'emisfero sud rispetto a quello nord che è costantemente più freddo. Infatti le temperature estive dell'emisfero meridionale possono essere fino a 30°C più calde di quelle di un'equivalente estate in quello nord.

Rilevanti sono anche le tempeste di sabbia che possono estendersi su una piccola zona così come sull'intero pianeta. Solitamente si verificano quando Marte si trova prossimo al Sole ed è stato dimostrato che aumentano la temperatura atmosferica del pianeta, per un fenomeno simile all'effetto serra.

Entrambe le calotte polari sono composte principalmente da ghiaccio ricoperto da uno strato di circa un metro di anidride carbonica solida (ghiaccio secco) al polo nord, mentre lo stesso strato raggiunge gli otto metri in quello sud, la sovrapposizione del ghiaccio secco sopra a quello d'acqua è dovuto al fatto che il primo condensa a temperature molto più basse e quindi successivamente a quello d'acqua in epoca di raffreddamento. Entrambi i poli presentano dei disegni a spirale causati dall'interazione tra il calore solare disomogeneo e la sublimazione e condensazione del ghiaccio. Le loro dimensioni variano inoltre a seconda della stagione.[7]

1.3 Rilevamento dei sistemi ventosi marziani e la loro analisi

Come spiegato nelle sezioni precedenti, i venti marziani sono stati oggetto di studio da parte degli scienziati delle grandi agenzie spaziali.

1.3.1 MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution)

La prima missione che si è dedicata a questo interrogativo è stata MAVEN della NASA.

MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution) è una missione partita il 21 Settembre del 2014 ed è correntemente operativa. La sua missione è quella di comprendere e studiare la storia del pianeta rosso, grazie ad un apposito payload scientifico. Infatti l'orbiter sta studiando la parte alta dell'atmosfera e della ionosfera cercando di risolvere gli enigmi inerenti alla continua perdita gas presenti in atmosfera da parte del pianeta.

Come possiamo vedere nella immagine [Figura1.6] in alto a destra è rappresentato l'orbiter nella sua interezza, mentre al centro in azzurro chiaro possiamo notare la manovra

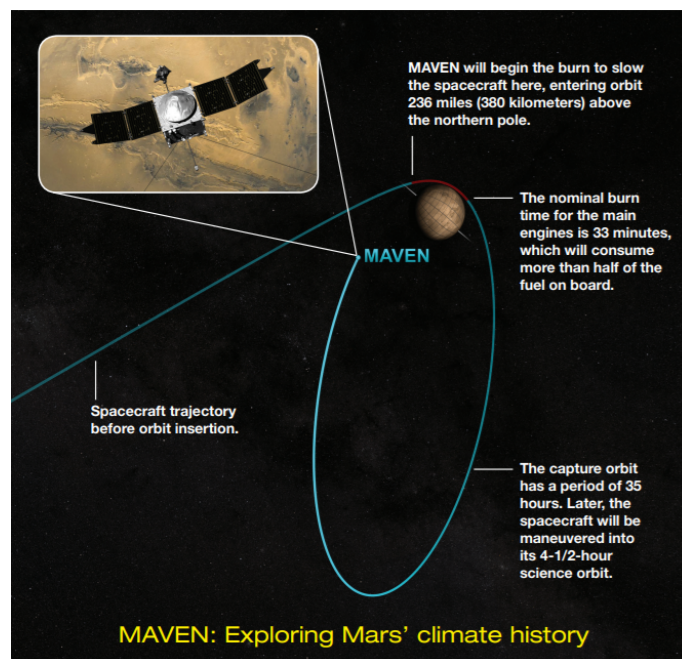


Figura 1.6: *Inserimento e manovre per stabilizzare l'orbiter MAVEN in orbita eccentrica intorno a Marte*[8]

di inserzione in orbita stabile di MAVEN intorno a Marte. L'orbita è molto eccentrica e tocca nel periastro i 150 km ca. di altitudine e 6300 km ca. di altitudine in corrispondenza del apoastro. Questa tipologia di orbita è stata preferita nonostante il suo costo elevato, poichè in corrispondenza del apoastro la velocità sarà più bassa favorendo l'osservazione dell'intero pianeta.

I sorvoli più ravvicinati e quindi quelli in corrispondenza dell'periastro garantiscono lo studio atmosferico del pianeta. Proprio durante questi sorvoli, MAVEN ha fatto una scoperta grazie ad uno strumento chiamato NGIMS (Natural Gas and Ion Mass Spectrometer): i venti di Marte.

Lo scopo di NGIMS era quello infatti di rivelare la composizione dell'alta atmosfera marziana, ma cambiando la modalità di questo sofisticato strumento esso ha permesso a MAVEN e alla NASA di evincere le velocità dei venti marziani. Inoltre poichè l'orbita sofisticata di MAVEN continua a variare nel tempo, ha permesso alla NASA di redigere la prima mappa del vento in scala planetaria di Marte. [Figura1.7]

Questa mappa è estremamente importante poichè ci mostra la direzione dei venti ricavate dalla sonda ad altitudini comprese fra i 140 e i 204 km e anche ad una prima approssimazione della velocità dei venti nella parte superiore della atmosfera marziana. Una mappa che, oltre a mostrare una variabilità dei venti nel breve periodo, rivela anche

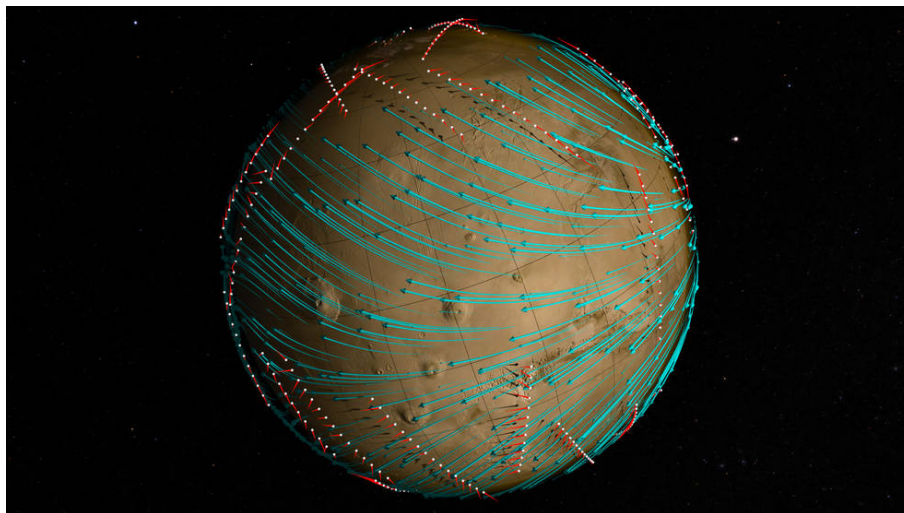


Figura 1.7: *Visualizzazione generata da computer dei percorsi orbitali (punti bianchi) presi dal veicolo spaziale MAVEN mentre mappava i venti (linee blu) nell'atmosfera superiore marziana. Le linee rosse provenienti dai punti bianchi rappresentano la velocità e la direzione del vento locale, misurate dallo strumento del gas neutro e dello spettrometro di massa ionica MAVEN*

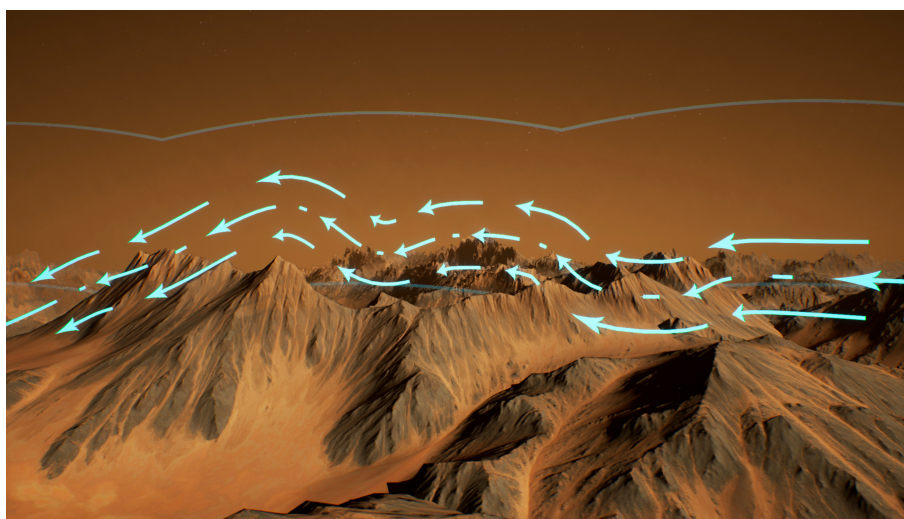


Figura 1.8: *Illustrazione artistica che mostra il vento (freccie blu) soffiare su un aspro terreno marziano generando disturbi nella circolazione che si propagano verso l'alto come onde di gravità atmosferiche (linee grigie). Il veicolo spaziale Maven è in grado di rilevare queste onde che, fungendo da impronta di ciò che le ha generate, permettono di risalire all'orografia del terreno*

schemi di circolazione più semplici di quelli presenti sulla Terra. Dallo studio emerge che su Marte i venti persistono nel corso delle stagioni, e mostrano una marcata correlazione

con la topografia sottostante, toccando negli strati alti della sottile atmosfera anche i 200 km/h. Questo conferma anche le evidenze fotografiche le quali mostrano che Marte periodicamente si ricopre di polvere a causa delle tempeste di sabbia che si scatenano in seguito alle differenze di temperatura soprattutto tra l'equatore e l'emisfero australe che crea una forte depressione alzando una enorme quantità di polvere nella parte alta dell'atmosfera. Le onde prodotte a seguito dello scontro delle correnti con le montagne e le valli presenti a livello del suolo, si propagano verso l'alto, vengono rilevate da Maven, che le utilizza per risalire indirettamente all'orografia di Marte, pur trovandosi in orbita a grande distanza.[9]

Un'altra prova della presenza di sistemi ventosi sulla superficie di Marte, che hanno spinto ad approfondire lo studio del vento, è la presenza dei cosiddetti "Diavoli di polvere". I diavoli di polvere sono delle vere e proprie colonne d'aria in rotazione che somigliano a trombe d'aria in miniatura ma che non hanno una origine meteorologica. Un fenomeno abbastanza diffuso sulla Terra, in zone desertiche e secche. Su Marte, dove i deserti non mancano di certo, i "dust devils" sono ancora più frequenti. Questi sono stati rilevati dallo spazio dall'*Mars Reconnaissance Orbiter* (MRO) della NASA, ma anche dai rover Spirit e Opportunity.



Figura 1.9: Un "Diavolo di polvere" di Marte, ritratto dalla MRO. Strumento: HiRISE.
Crediti: NASA/JPL/University of Arizona

1.3.2 TWINS (Temperature and Wind for InSight)

InSight, acronimo di *Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport*, è una missione spaziale per l'esplorazione di Marte sviluppata dalla NASA, il cui lancio era previsto per il marzo 2016 e che è stato rinviato al 5 maggio 2018 per problemi riscontrati nel sismometro di cui è dotata la sonda. Il lander è atterrato sulla superficie di Marte, più precisamente nella regione vulcanica di Elysium Planitia, alle ore 19:52:59 UTC circa del 26 novembre 2018.[20]

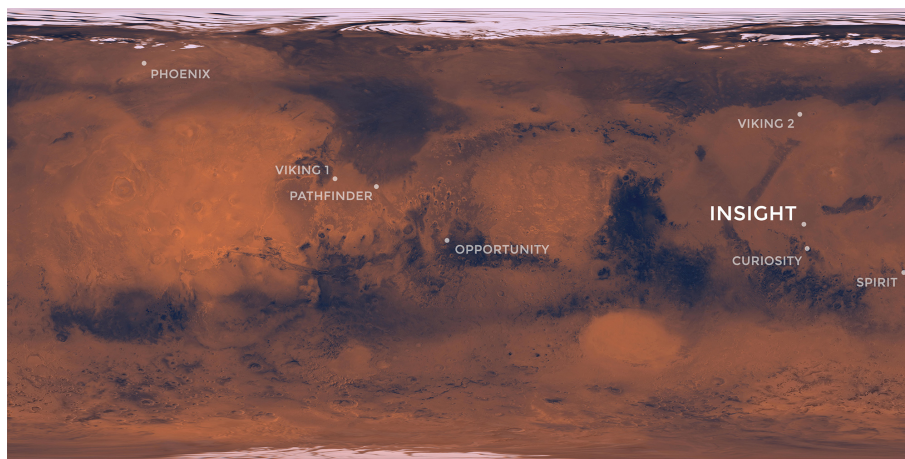


Figura 1.10: *illustrazione artistica che mostra il sito di atterraggio del lander InSight*

La missione includeva la dislocazione di un sismometro e un sensore termico, che avrebbe potuto raggiungere una profondità di 5 metri al di sotto della superficie. Obiettivo della missione è investigare sulla struttura interna di Marte allo scopo di ricavare degli indizi sulle fasi più remote della formazione dei pianeti terrestri nella più ampia formazione del sistema solare. Un secondo obiettivo è lo studio della meteorologia marziana grazie ad uno strumento chiamato TWINS (Temperature and Wind for InSight) in grado di rilevare la velocità del vento, la sua direzione, la pressione atmosferica e la temperatura del luogo di atterraggio del lander (Elysium Planitia) con una frequenza di $1/10Hz$ ossia ad intervalli di 10 secondi.[10]

Analisi dei dati

Il lavoro di tesi ha inizio proprio dall'analisi del bollettino meteorologico stagionale redatto dal lander riportato nella figura 1.12 che illustra i cambiamenti stagionali in Elysium Planitia da quando InSight è atterrato.

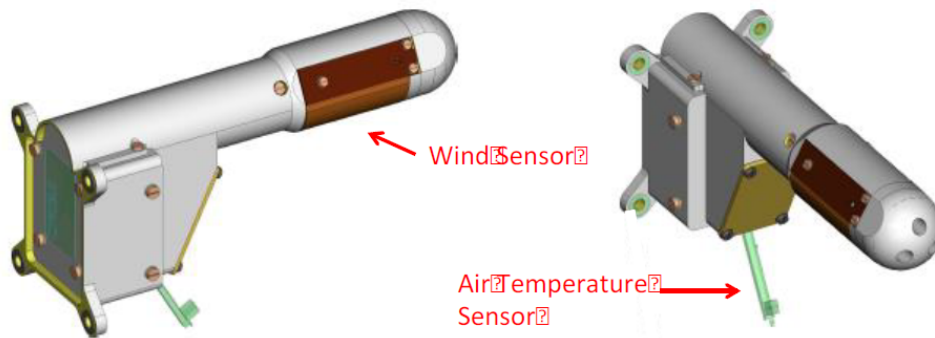


Figura 1.11: CAD della coppia di sensori TWINS posizionato sul APSS di InSight

I cinque set di dati su questo grafico danno un quadro completo di come potrebbe essere trascorrere un anno vicino all'equatore su Marte:

- **Temperatura dell'aria**

La linea nera mostra la **temperatura media** giornaliera dell'aria in gradi Celsius. Le temperature dell'aria massima e minima di ogni Sol sono riportate nella parte superiore e inferiore della barra grigia verticale.

- **Pressione atmosferica**

la linea nera mostra la **pressione atmosferica media** giornaliera in Pascal. La pressione massima e minima di ogni Sol sono riportate nella parte superiore e inferiore della barra grigia verticale.

- **Velocità del vento**

la linea nera mostra la **velocità media giornaliera del vento** in metri al secondo. Le velocità del vento massima e minima di ogni Sol sono riportate nella parte superiore e inferiore della barra grigia verticale.

- **Direzione del vento**

I punti neri mostrano la direzione media giornaliera del vento rappresentata in gradi da Est a Nord, come se si leggesse una bussola. L'Est è a 90 gradi, il Sud a 180 gradi, l'Ovest a 270 e il Nord a 360.

- **Opacità atmosferica (o τ)**

Misura la quantità di luce solare bloccata dalla polvere nell'atmosfera prima che raggiunga il suolo. I triangoli verdi sono misurazioni (con barre di errore ombreggiate in grigio) di τ prese dalla Instrument Deployment Camera (IDC) sul braccio robotico. I triangoli blu sono misurazioni effettuate con la Instrument Context Camera (ICC), montata sotto il dack superiore di InSight.

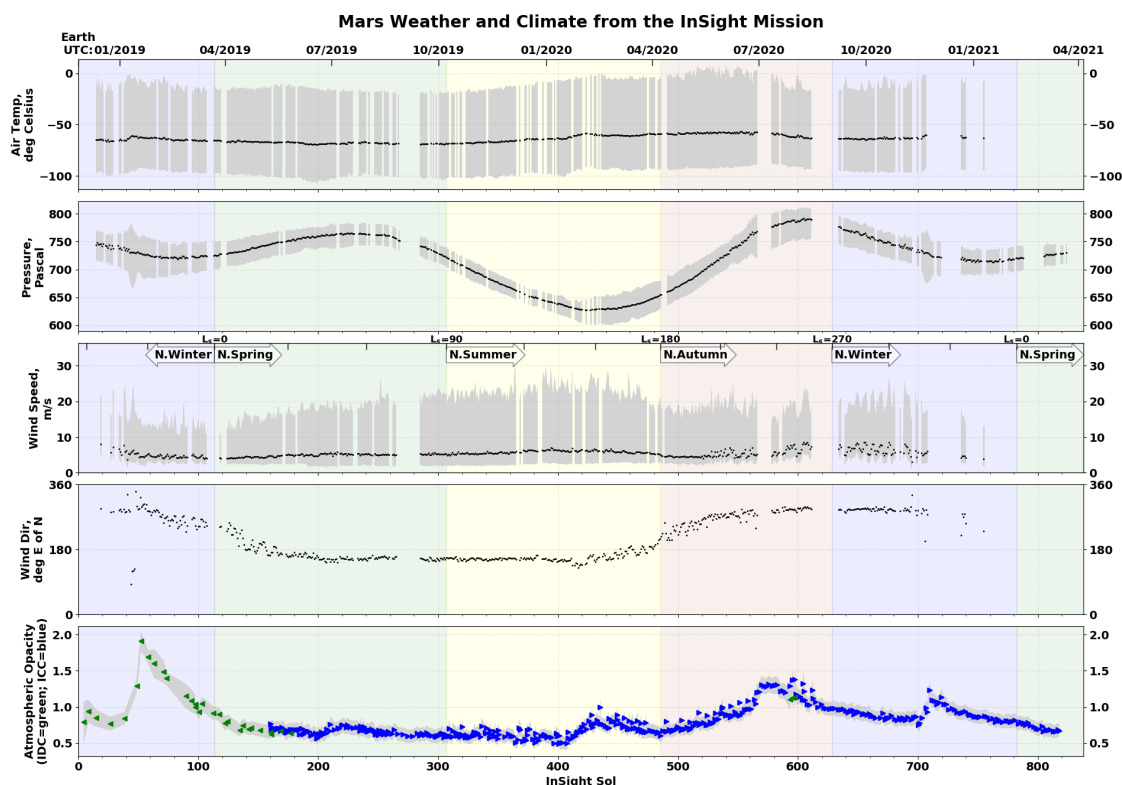


Figura 1.12: *Report meteorologico stagionale su Elysium Plantia*

Come detto nella parte precedente, l'asse del pianeta rosso è inclinato di circa 25° rispetto all'eclittica. Questo significa che anche Marte possiede delle stagioni in maniera analoga alla Terra. Infatti dal grafico possiamo notare delle aree colorate che identificano le stagioni marziane. Sugli assi orizzontali superiori ed inferiori sono riportati rispettivamente i Sol e i giorni Terrestri per poterci orientare meglio nella dicitura e rendere più familiare la trattazione.

Analizzando pertanto il grafico precedente possiamo notare che la presenza del vento sulla superficie di Marte è presente ad una velocità variabile ma comunque sempre persistente.

Per agevolare lo studio, si è deciso di raccogliere i dati giornalieri ricevuti dallo strumento TWINS (Temperature and Wind for InSight), raccolti dalla *NASA's Planetary*

Atmospheres Node. I file inerenti ad ogni Sol (giorno) marziano, scaricabili in formato .CSV, sono stati processati in Matlab nel quale si è scritto uno script capace di estrarre informazioni riguardo la velocità e direzione del vento per ogni Sol marziano. Lo studio statistico è stato condotto attraverso lo studio di 30 Sol, più precisamente raccogliendo dati dal Sol 440 al Sol 469 (indicativamente nel mese terrestre di Marzo): periodo estivo e anche il più ventoso. Lo script in prima istanza riporta su un grafico l'andamento della velocità del vento su Elysium Plantia in funzione del tempo in formato UTC.

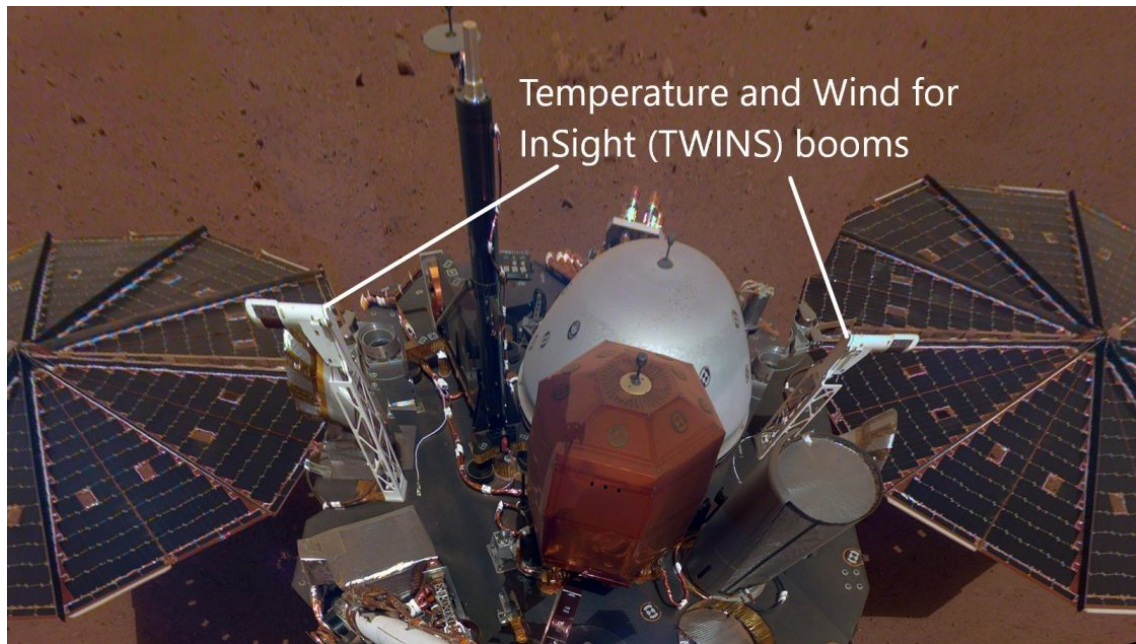


Figura 1.13: *TWINS (Temperature and Wind for InSight)* (Foto realizzata da InSight.)

Come possiamo notare, in ogni singolo grafico di [Figura1.14], che rappresentano l'andamento della velocità del vento durante le ventiquattro ore circa del Sol marziano, il vento è sempre presente. Come sulla Terra esso è variabile nella velocità con oscillazioni che vanno dai pochi metri al secondo a picchi di anche 20 m/s.

Un'altra similitudine con i venti terrestri, è che disegnando la PDF (Probability Density Function) e la CDF (Cumulative Density Function) inerente alla velocità del vento per ogni Sol marziano, le distribuzioni di probabilità si avvicinano ad una distribuzione di Weibull, come possiamo notare nei grafici riportati sotto [Figura1.15] e [Figura1.16].

Per completezza nei calcoli si è deciso di riportare le direzioni verso cui il vento marziano nei pressi di Elysium Plantia ha spirato e le rispettive PDF per ogni Sol analizzato [Figura1.17 e Figura1.18].

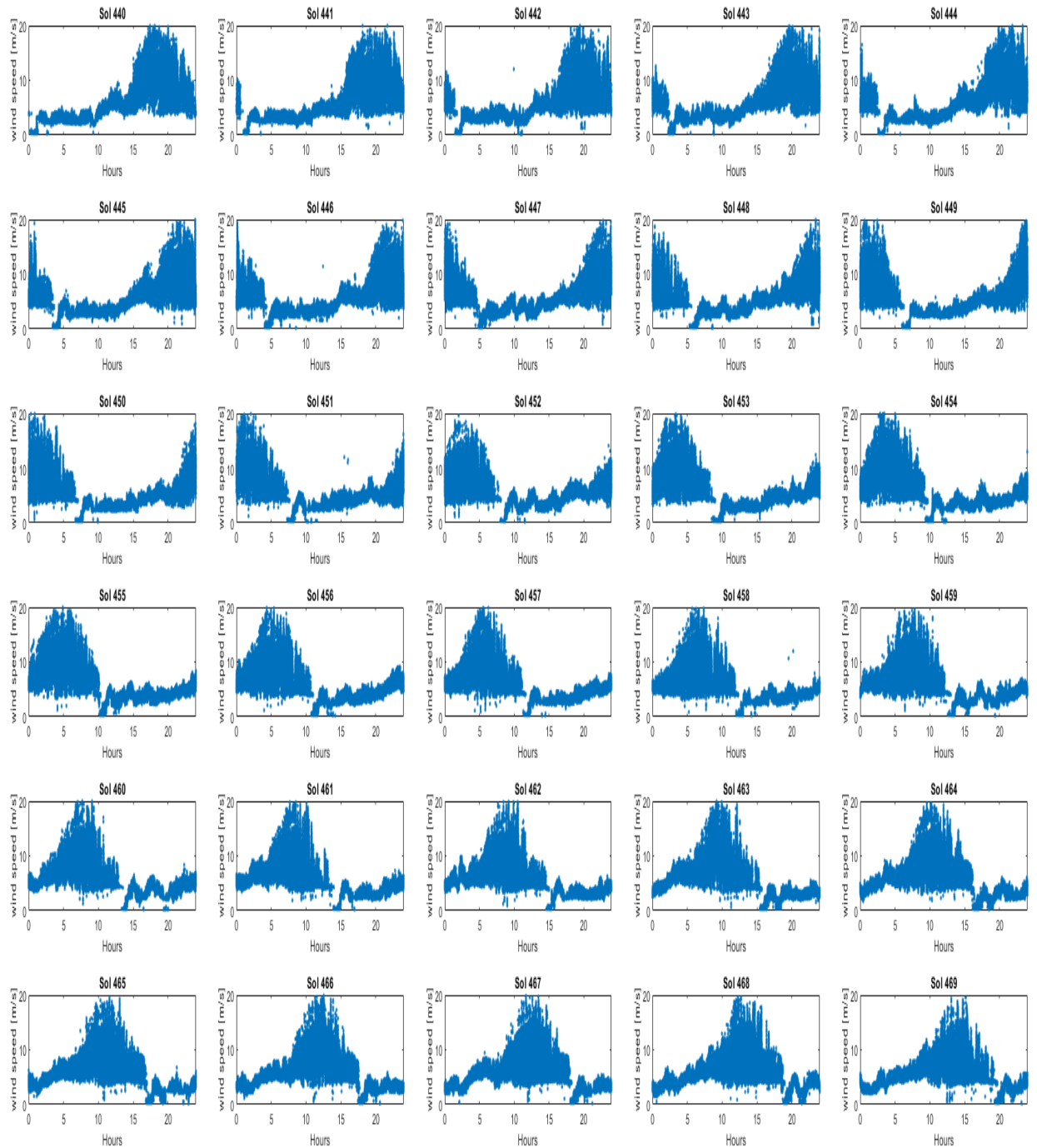


Figura 1.14: *Post-processing dei dati riguardanti la componente orizzontale della velocità del vento marziano riportata in m/s con riferimento a 30 Sol marziani*

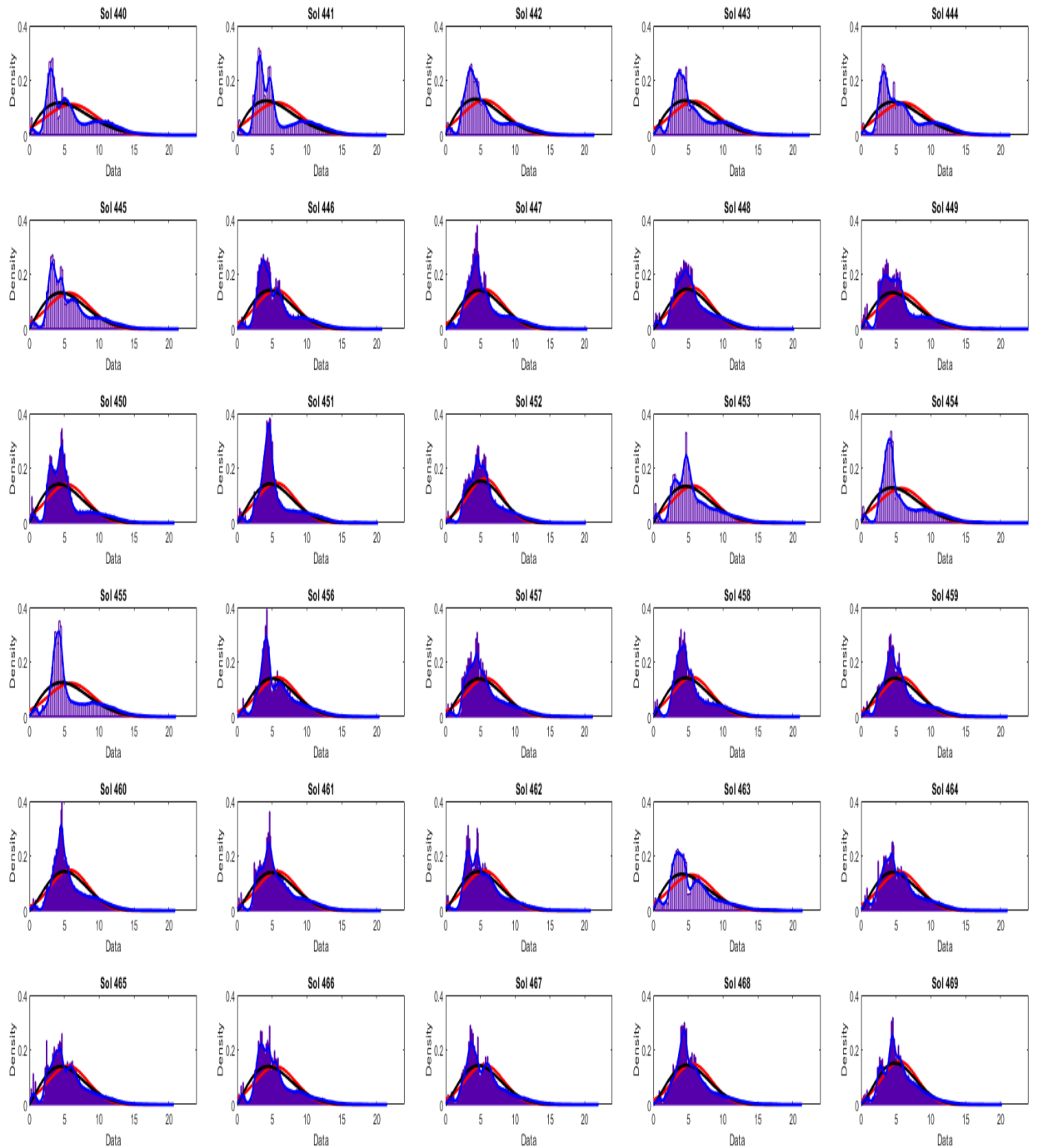


Figura 1.15: *Probability Density Function* della componente orizzontale della velocità del vento marziano. La curva nera rappresenta la distribuzione di Weibull mentre la curva rossa quella Normale

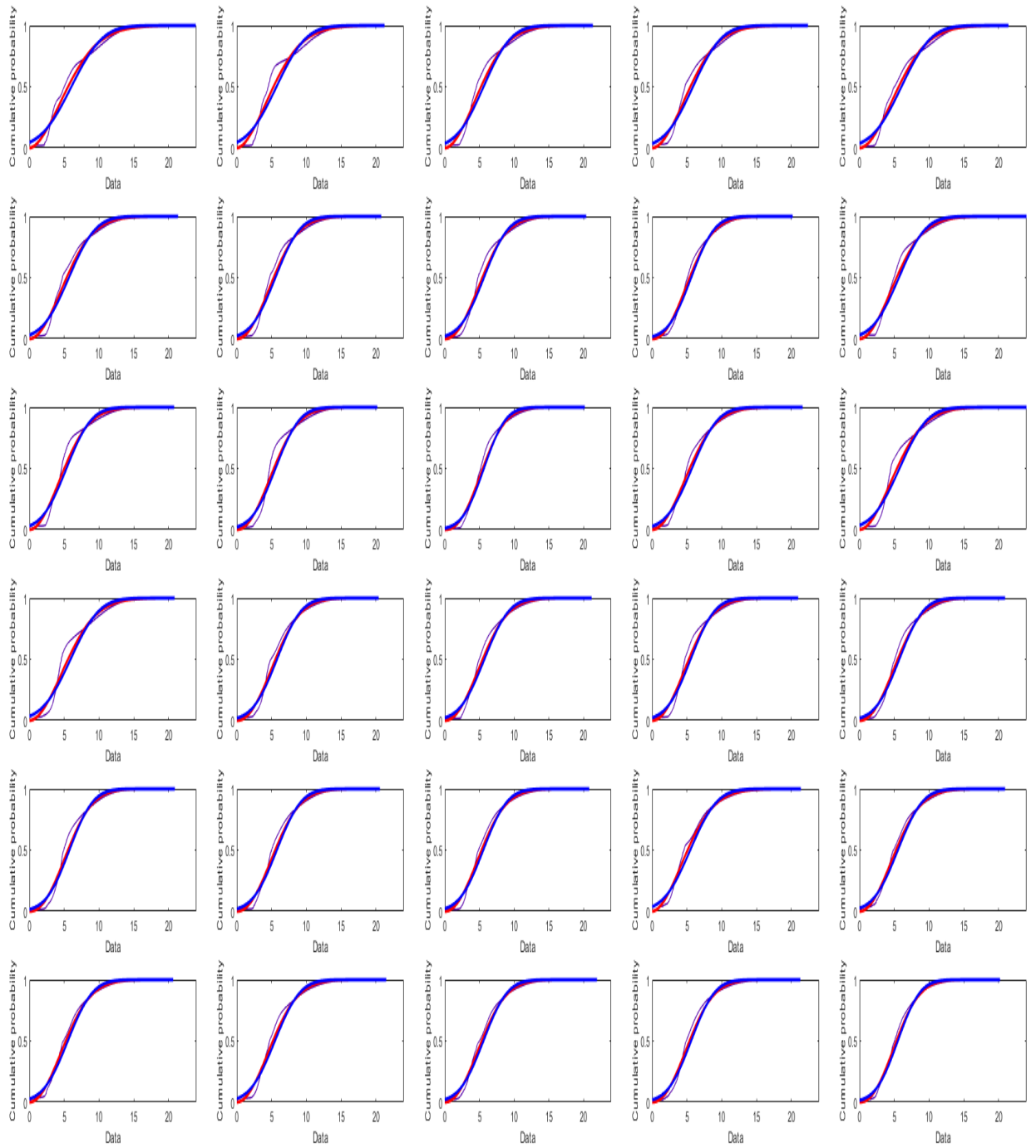


Figura 1.16: *Cumulative Density Function* della componente orizzontale della velocità del vento marziano. La curva blu rappresenta la distribuzione Normale mentre la curva rossa quella Weibull

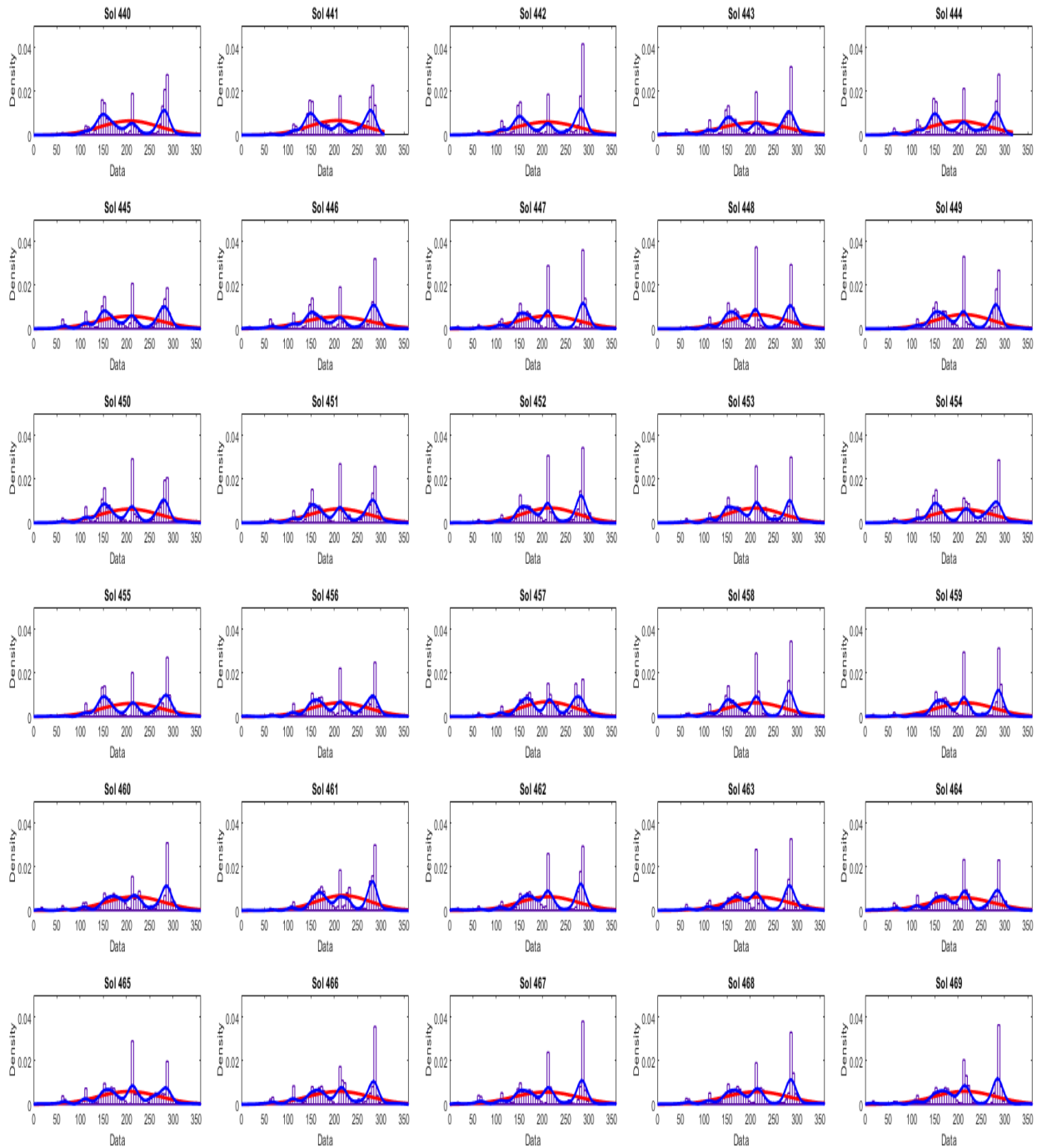
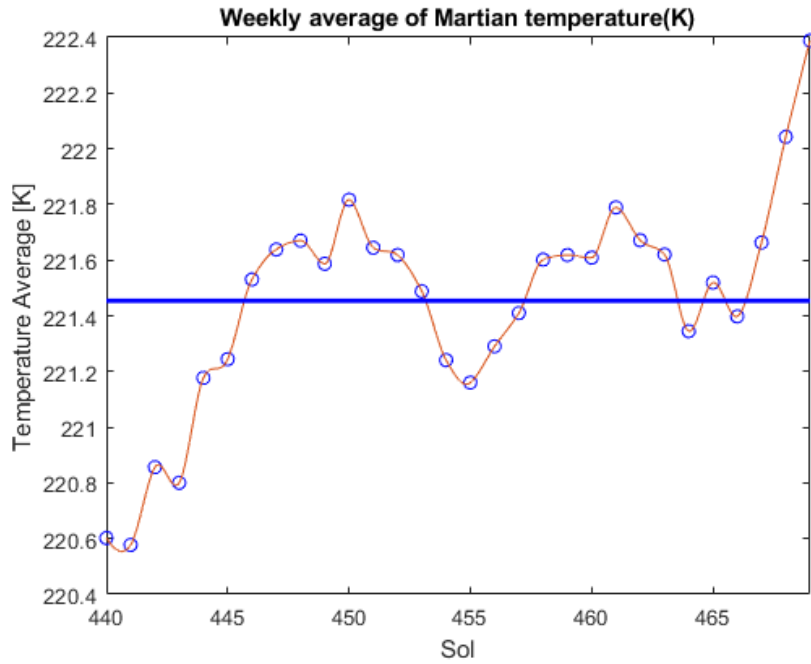


Figura 1.17: *Probability Density Function della direzione del vento marziano. La curva rossa rappresenta la distribuzione Normale di probabilità*

Terminato pertanto il breve studio statistico sulla velocità del vento in un mese marziano, si è deciso di riproporre il procedimento per la temperatura nella piana di Elysium Plantia. Di seguito vengono riportati gli andamenti della temperatura nell'arco del Sol per lo stesso mese preso in esame per la velocità.

Temperatura e Viscosità

Un ultimo passaggio per una corretta analisi delle caratteristiche atmosferiche del pianeta rosso si è deciso di effettuare un calcolo preliminare della viscosità della miscela di gas caratteristica del pianeta. Per farlo si è fatto dapprima uno studio sulle temperature registrate dallo strumento TWINS di InSight da cui si è ricavato un andamento medio di temperatura durante il mese marziano analizzato (figura seguente). Con riferimento alla tabella 1.1 si sono selezionati i due elementi fondamentali che compongono l'atmosfera marziana.



Attraverso l'uso delle costanti empiriche [18], per il calcolo della viscosità si è utilizzata la relazione di Sutherland riportata in seguito per calcolare le viscosità dinamiche di ogni componente chimico della miscela in esame alla temperatura di 221,5 K, calcolata facendo la media delle temperature medie giornaliere ricavate dallo strumento TWINS.

$$\mu = S \frac{T^{\frac{3}{2}}}{\chi + T} \quad (1.1)$$

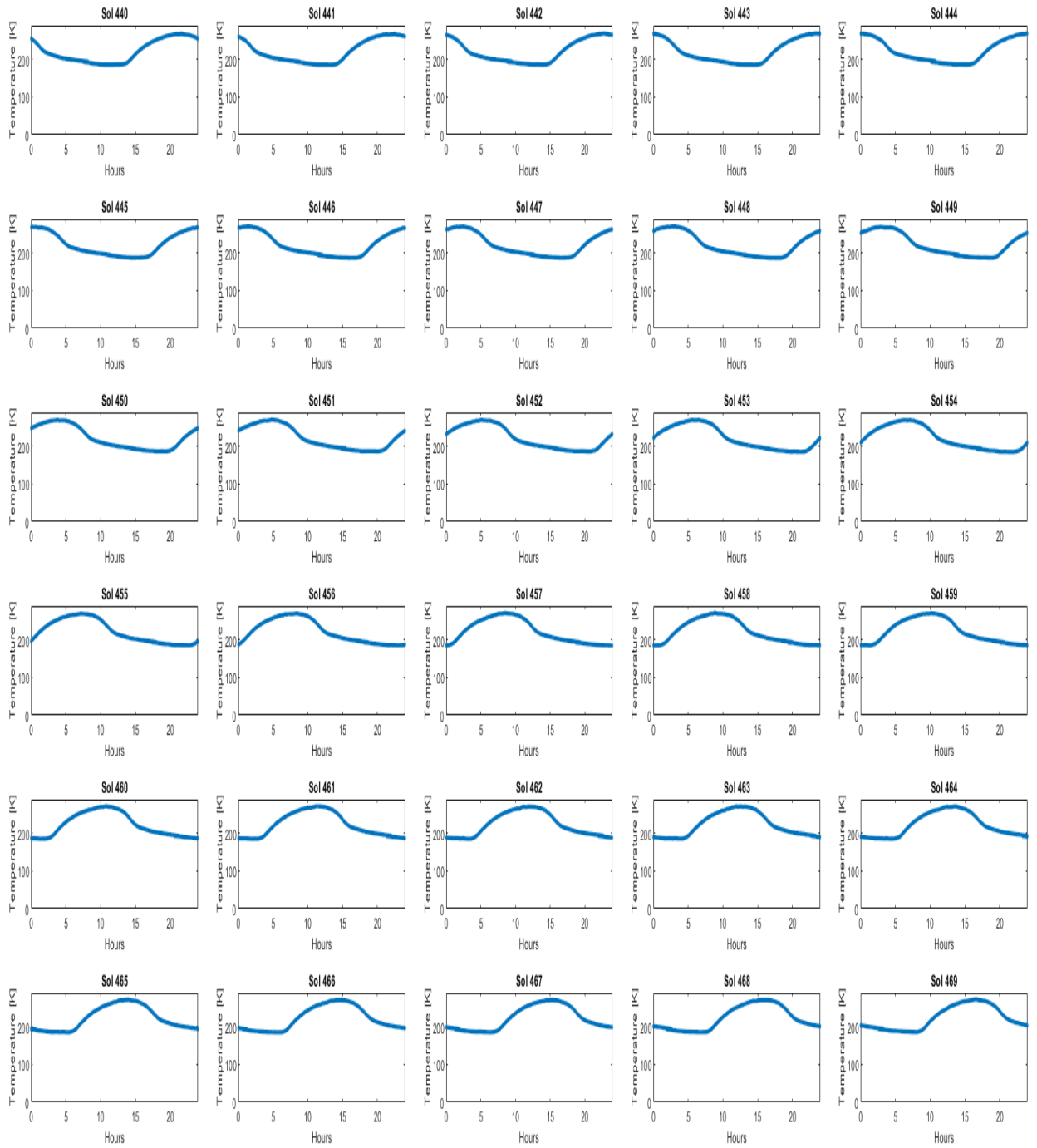
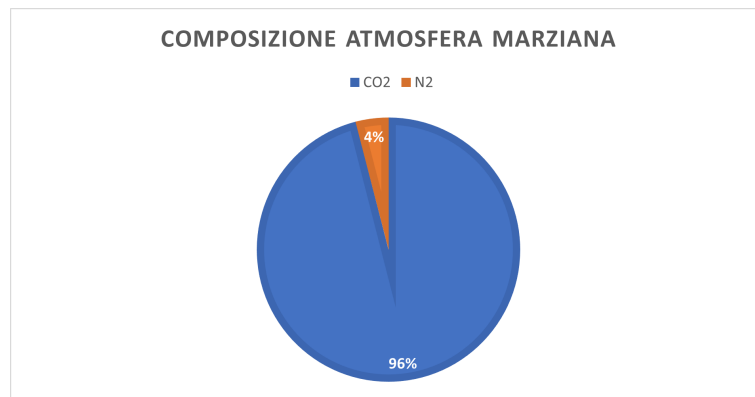


Figura 1.18: *Andamento della temperatura atmosferica rilevati dallo strumento TWINS del lander InSight*

Mars Atmosphere							
Elements	Molecular Fracition	Molecular Weighth (g/mol)	χ (K)	S (kg/msK ^{0.5})	Viscosity(kg/ms)	Temperature average (K)	
CO2	0,96	44	233	0,00000155	1,12398E-05	221,45	
N2	0,04	28	102	0,00000139	1,41619E-05		

Tabella 1.2: Caratteristiche fisiche degli elementi della atmosfera marziana



A questo punto si è deciso di proceder al calcolo della viscosità della miscela applicando la regola di Wilke che prevede l'utilizzo delle frazioni molari, pesi molecolari e viscosità dei singoli componenti della miscela nella seguente formula:

$$\mu = \sum_{i=1}^{\nu} \mu_i \left(1 + \sum_{k=1; k \neq i}^{\nu} G_{ik} \frac{X_k}{X_i} \right)^{-1} \quad (1.2)$$

dove:

$$G_{ik} = \frac{\left[1 + (\mu_i/\mu_k)^{1/2} (\mathcal{M}_k/\mathcal{M}_i)^{1/4} \right]^2}{2^{3/2} [1 + (\mathcal{M}_i/\mathcal{M}_k)]^{1/2}} \quad (1.3)$$

dove la χ rappresenta la frazione molare della singola specie, la M la massa molare ed infine la μ la viscosità della singola specie calcolata a 221,5K.

La viscosità della miscela in prima approssimazione è riportata nella tabella sottostante:

G_ik		Factors of Wilke's laws	Dynamic Viscosity (kg/m*s)	Kinematic viscosity (m ² /s)
G12	0,710938041	1,09164E-05	1,13236E-05	0,001132359
G21	1,407629801	4,07148E-07		

Tabella 1.3: Viscosità Marziana di prima approssimazione presso Elysium Plantia

Come possiamo notare la viscosità dell'"aria marziana" in prima approssimazione è dello stesso ordine di grandezza di quella dell'aria che è di circa $1.85 * 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}$ a 300 K, ma inferiore in modulo.

Capitolo 2

Analisi delle potenze richieste dai payload dei rover marziani

A seguito dell'analisi del vento marziano si è passati ad analizzare le potenze dei Payload principali di alcuni rover e lander inviati sul pianeta rosso per effettuare diversi esperimenti. Questo tipo di analisi si dimostra fondamentale per lo scopo di questo studio, in quanto si potrebbe trovare un eventuale utilizzatore per l'energia ricavata dall'eolico se questa fosse sufficiente. Si vuole inoltre precisare che le potenze a cui si è fatto riferimento sono di picco e quindi si è supposto che tutte le strumentazioni e sistemi di locomozione siano attivi. Questo è evidentemente impossibile poichè, durante la progettazione energetica di un rover o lander, bisogna tener conto del power-saving che consente in alcuni casi di utilizzare l'energia ricavata dai pannelli solari per ricaricare le batterie da utilizzare durante i periodi di eclissi. Per un'analisi più chiara si è deciso di organizzare il lavoro partendo dai rover, in particolare da uno dei più piccoli per poi analizzare il rover più all'avanguardia e più pesante. Infine si procederà all'analisi del lander InSight.

2.1 Opportunity

Opportunity, conosciuto anche come MER-B (Mars Exploration Rover - B) o MER-1, e soprannominato "Oppy", è un rover robotico che è stato attivo su Marte dal 2004 fino a metà 2018. Opportunity è stato operativo su Marte per 5110 sols (5250 giorni; 14 anni, 136 giorni). Lanciato il 7 luglio 2003, come parte del programma Mars Exploration Rover della NASA, è atterrato a *Meridiani Planum* il 25 gennaio 2004, tre settimane più

tardi del suo gemello Spirit (MER-A) atterrato sull'altro lato del pianeta. Con una durata prevista di 90 sol di attività (poco meno di 92,5 giorni terrestri), Spirit ha funzionato fino a quando si è bloccato nel 2009 e ha cessato le comunicazioni nel 2010, mentre Opportunity è stato in grado di rimanere operativo per 5111 sol dopo l'atterraggio, mantenendo la sua potenza e sistemi chiave attraverso la ricarica continua delle sue batterie utilizzando l'energia solare, e ibernandosi durante eventi come le tempeste di polvere per risparmiare energia. Questo attento funzionamento ha permesso a Opportunity di operare per 57 volte la durata della sua vita progettata, superando il piano iniziale di 14 anni e 46 giorni (in tempo terrestre). Il 10 giugno 2018, quando ha contattato per l'ultima volta la NASA, il rover aveva percorso una distanza di 45,16 chilometri (28,06 miglia). I punti salienti della missione hanno incluso la missione iniziale di 90 sol, trovando meteoriti come Heat Shield Rock (meteorite Meridiani Planum), e oltre due anni di esplorazione e studio del cratere Victoria. Il rover è sopravvissuto a moderate tempeste di polvere e nel 2011 ha raggiunto il cratere Endeavour, che è stato descritto come un "secondo sito di atterraggio". La missione Opportunity è considerata una delle imprese di maggior successo della NASA.

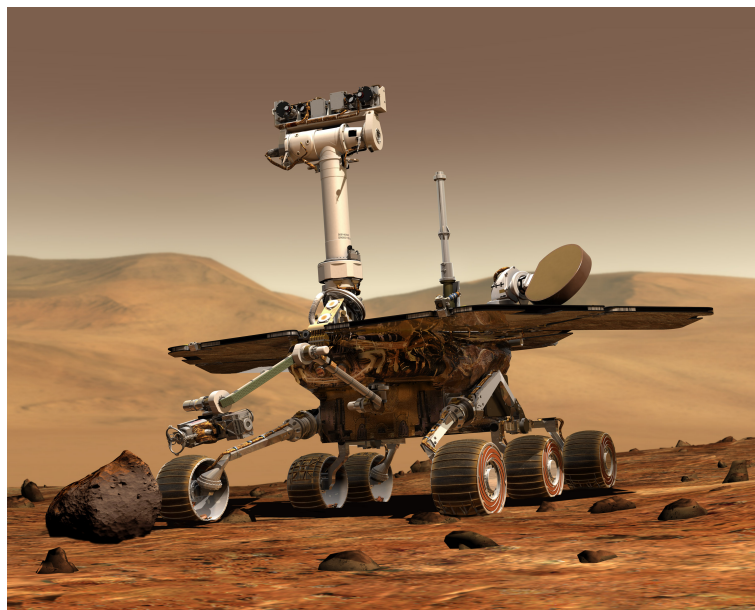


Figura 2.1: *Ricostruzione artistica di Opportunity o MER-B del JPL della NASA*(credit: NASA)

A causa di una tempesta di polvere planetaria del 2018 su Marte, Opportunity ha cessato le comunicazioni il 10 giugno ed è entrato in ibernazione il 12 giugno 2018. Si sperava che si riavviasse una volta che il tempo si fosse schiarito, ma non lo fece, sugge-

rendo o un guasto catastrofico o che uno strato di polvere avesse coperto i suoi pannelli solari. La NASA sperava di ristabilire il contatto con il rover, adducendo un periodo di vento che avrebbe potuto potenzialmente pulire i suoi pannelli solari. Il 13 febbraio 2019, i funzionari della NASA hanno dichiarato che la missione Opportunity fosse conclusa, dopo che la navicella non era riuscita a rispondere a oltre 1.000 segnali inviati dall'agosto 2018.[23]

2.1.1 Mission Overview

Collettivamente, i rover Opportunity e Spirit facevano parte del programma Mars Exploration Rover nel lungo termine Mars Exploration Program. I quattro obiettivi principali del Mars Exploration Program erano di determinare se il potenziale per la vita esiste su Marte (in particolare, se l'acqua recuperabile può essere trovata su Marte), di caratterizzare il clima di Marte e la sua geologia, e quindi di preparare una potenziale missione umana su Marte. I Mars Exploration Rovers dovevano percorrere la superficie marziana ed eseguire analisi geologiche periodiche per determinare se l'acqua fosse mai esistita su Marte e i tipi di minerali disponibili, oltre a confermare i dati presi dal Mars Reconnaissance Orbiter.

Dal suo atterraggio iniziale, avvenuto per caso in un cratere da impatto in mezzo a una pianura altrimenti generalmente piatta, Opportunity ha analizzato con successo campioni di regolite e di roccia e ha scattato foto panoramiche del suo sito di atterraggio. Il suo campionamento ha permesso agli scienziati della NASA di formulare ipotesi sulla presenza di ematite e sulla passata presenza di acqua sulla superficie di Marte. In seguito, Opportunity è stato diretto ad attraversare la superficie di Marte per indagare un altro sito craterico, il cratere Endurance, che ha esaminato da giugno a dicembre 2004. Successivamente, Opportunity esaminò il sito di impatto del suo stesso scudo termico e scoprì un meteorite intatto, ora noto come Heat Shield Rock, sulla superficie di Marte.

Alla fine di settembre 2006, Opportunity ha raggiunto il cratere Victoria e ha esplorato lungo il bordo in senso orario. Nell'agosto 2008, Opportunity ha lasciato il cratere Victoria per il cratere Endeavour, che ha raggiunto il 9 agosto 2011. Qui, sul bordo del cratere Endeavour Il Mars Reconnaissance Orbiter aveva rilevato dei fillosilicati, e il rover ha analizzato le rocce con i suoi strumenti per verificare questo avvistamento a terra.

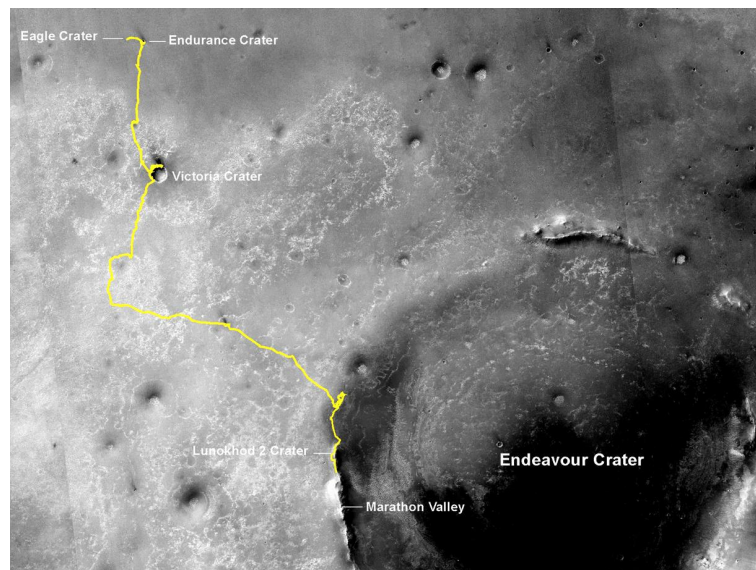
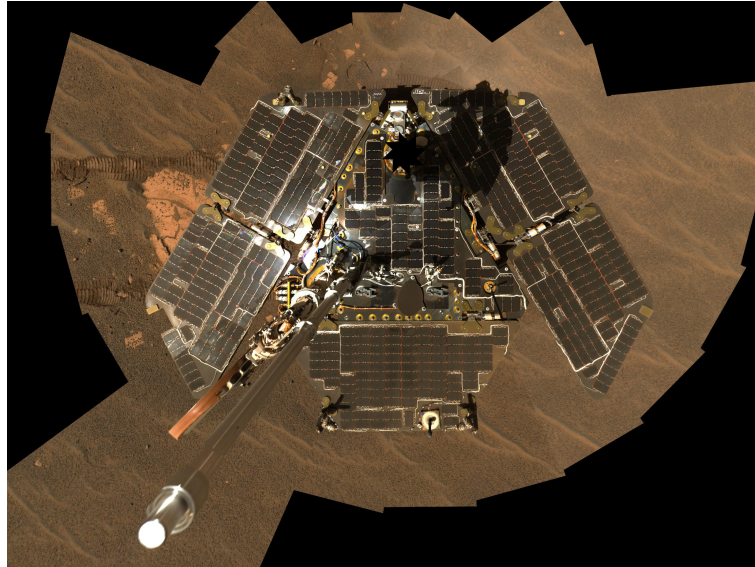


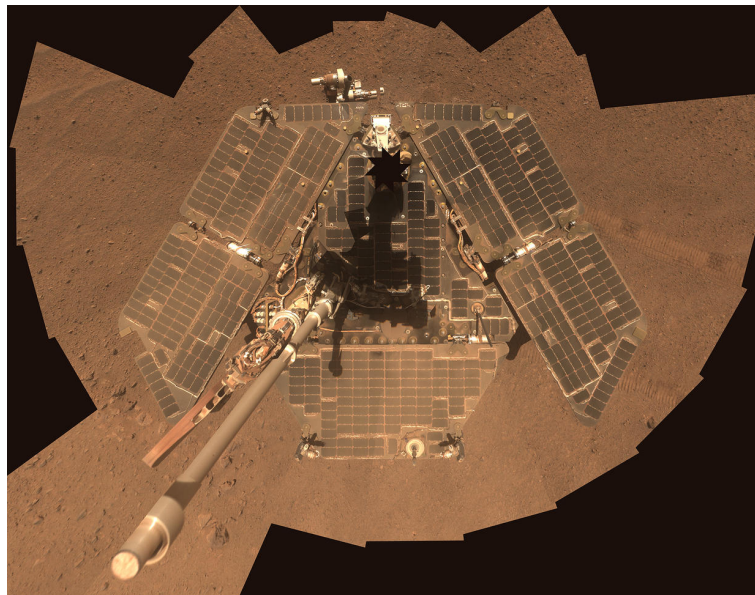
Figura 2.2: *Percorso effettuato da Opportunity o MER-B del JPL della NASA*(credit: NASA)

Nel giugno 2018, si è scatenata una tempesta di polvere su scala planetaria, e nel giro di pochi giorni i pannelli solari del rover non hanno prodotto energia sufficiente per mantenere le comunicazioni. Il rover ha continuato a non dare segni di vita anche dopo che la tempesta ebbe fine all'inizio di ottobre, suggerendo o un guasto catastrofico o uno strato di polvere spesso che copriva i suoi pannelli solari rendendoli inefficienti. Il team è rimasto speranzoso che un periodo ventoso tra novembre 2018 e gennaio 2019 avesse potuto eliminare la polvere dai suoi pannelli solari, come era già successo in precedenza ma ha aspettato invano portando alla dichiarazione della fine della missione. L'ultima comunicazione dal rover arrivò il 10 giugno 2018 (sol 5111) da Perseverance Valley, e indicò una produzione di energia del campo solare di 22 Watt-ora per il sol, e la più alta opacità atmosferica (τ) mai misurata su Marte: 10,8. [16] L'opacità atmosferica per definizione è una stima numerica di quanto l'atmosfera o l'ambiente circostante è capace di bloccare i raggi solari.

La polvere ha segnato significativamente la vita di Opportunity e come detto è stata molto probabilmente la causa della sua "morte". Infatti, dalle immagini dello stesso rover [Figura 2.3], che si è deciso di riportare di seguito, si può notare come lo strato di polvere che ha ricoperto i pannelli solari di Opportunity era abbastanza spesso da portare l'indice di opacità dei pannelli solari ad un valore inaccettabile per il caricamento delle batterie e insufficiente all'utilizzo dei principali strumenti scientifici.



(a) Solar arrays appena dopo l'atterraggio di MER-1



(b) Solar arrays ricoperti di polvere che inficia la loro efficienza

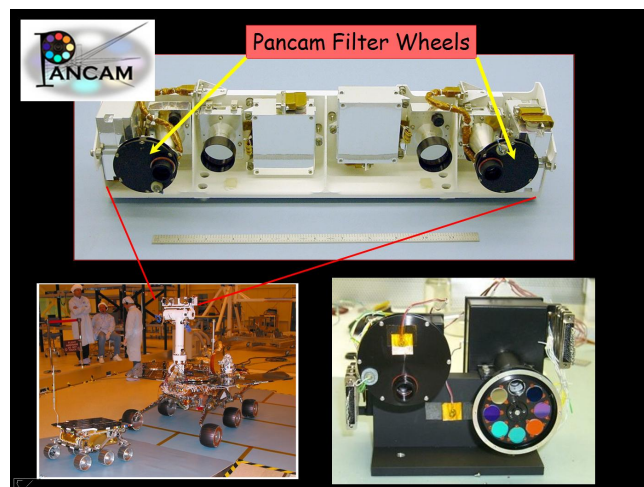
Figura 2.3: Immagini scattate da Opportunity raffiguranti i propri pannelli solari appena dopo l'atterraggio e gli stessi ricoperti di polvere (credit: NASA)

2.1.2 Analisi energetica dei Payload

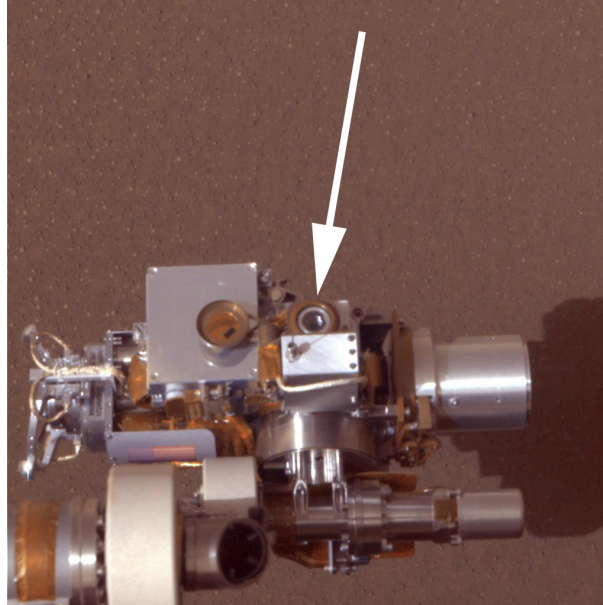
Il rover Opportunity della NASA, come descritto nella sezione precedente è stato il più longevo dei rover o lander atterrati sul pianeta rosso. Opportunity, insieme al suo gemello Spirit, era alimentato da pannelli solari e mosso da un sistema di locomozione molto complesso formato da sei ruote alimentate ognuna da un motore autonomo che agilmente consentiva al rover di superare ostacoli come rocce o terreni impervi. Come riportato dalla NASA [11] le sue dimensioni erano di 1.5 m di altezza, largo 2.3 m e lungo circa 1.6 m. Il suo peso è di 180 kg rendendolo il rover più grande costruito all'epoca. Opportunity presentava come tutti i rover o lander marziani un sistema di comunicazione complesso a differenti frequenze con il quale ha avuto la possibilità di comunicare con la Terra. Questi sistemi di comunicazione e computer non sono stati presi in considerazione nello studio, poiché si è voluto analizzare attraverso fonti attendibili le potenze di picco richieste e necessarie per il funzionamento di ciascun elemento che costituiva il payload scientifico del rover.

Il payload scientifico di Opportunity, preso come caso studio, è costituito principalmente da sei elementi:

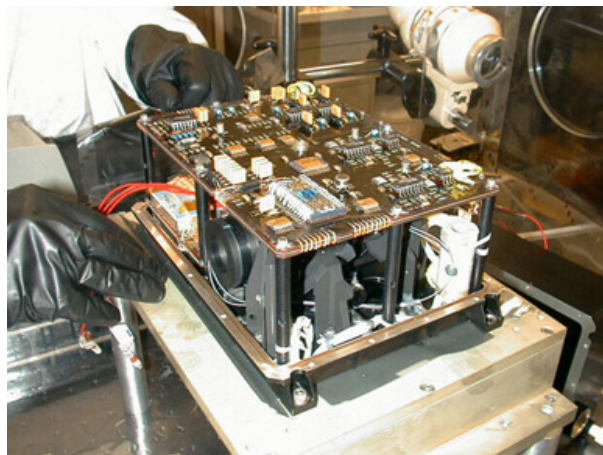
- **Pancam:** Lavoro mutuo di due fotocamere che danno la possibilità al rovere di avere degli "Occhi" con cui guardare. La fotocamera era a colori e posizionata sulla testa del rover. Il compito di questa fotocamera è quello di scattare fotografie panoramiche alla superficie marziana e grazie alla presenza di diversi filtri è stato possibile fotografare il sole e il cielo marziano.



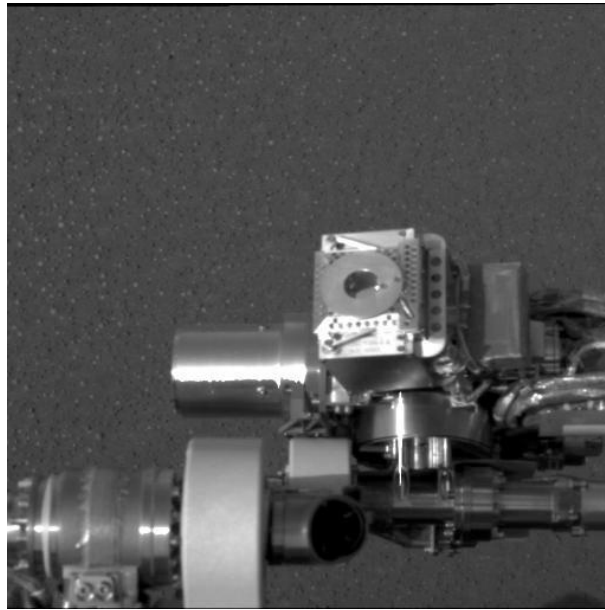
- **Mi:** *Microscopic Imager* è un microscopio che consentiva di catturare immagini ravvicinate in bianco e nero a rocce e regolite, dando conferma dei dati raccolti con altri strumenti contestualizzando le analisi mineralogiche e geofisiche del terreno marziano. E' sostanzialmente una fotocamera ad altissima risoluzione che è stata posizionata sul braccio estensibile e mobile di Opportunity.



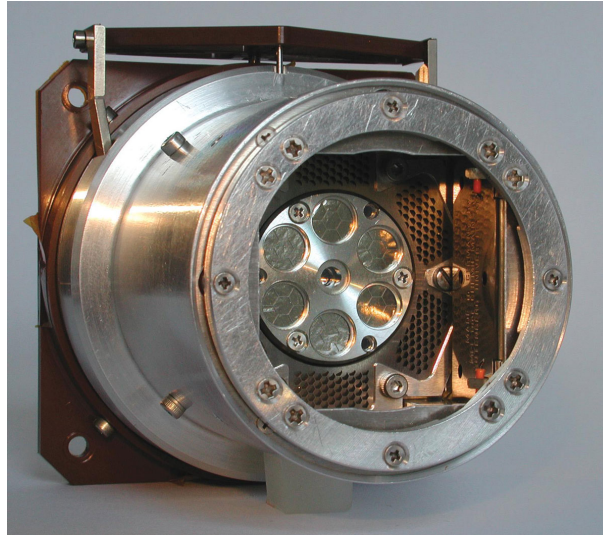
- **Mini-TES:** Piccolissimo spettrometro di massa in grado di rilevare i diversi spettri della luce infrarossa o di calore emessi dalle rocce e/o minerali. Il suo compito pertanto è quello di determinare la mineralogia delle rocce e del suolo marziano rilevando i loro modelli di radiazione termica [11]. E' stato studiato e progettato per individuare rocce formatesi in acqua, si trova nel corpo del rover più precisamente nella parte inferiore del collo e grazie ad un sofisticato sistema di specchi che fungono da periscopio si fa arrivare la luce rilevata dalla fotocamera allo strumento.



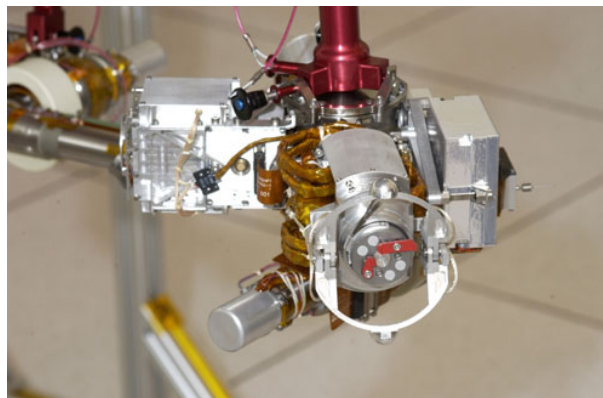
- **MB:** Lo *Spettrometro Mössbauer* è uno spettrometro installato sia in MER-A che in MER-B ed è stato progettato appositamente per individuare minerali ferrosi e determinarne con precisione la composizione. Questa capacità può anche aiutare gli scienziati a comprendere le proprietà magnetiche dei materiali di superficie. È uno dei quattro strumenti montati sulla torretta all'estremità del braccio di Opportunity. [11] La misurazione viene compiuta avvicinando lo strumento direttamente a contatto con il campione da analizzare.



- **APXS:** *Alpha Particle X-Ray Spectrometer* è uno spettrometro in grado di determinare la composizione di minerali, rocce e terreno attraverso l'uso dei raggi X e particelle alpha. Come con gli altri strumenti situati sul braccio estensibile del rover, il sensore APXS è abbastanza piccolo ed è uno dei quattro strumenti. La sua elettronica è alloggiata nella calda scatola elettronica (WEB) situata nel corpo del rover. [11]



- **RAT** *Rock Abrasion Tool* è sostanzialmente una potente smerigliatrice posizionata sul braccio mobile di Opportunity, che ha lo scopo di ridurre in polvere dei campioni di roccia attraverso i suoi piccoli "denti". Grazie a questo processo di smerigliatura si è potuto analizzare campioni di roccia privi non esposti alle intemperie.



Attraverso una ricerca approfondita si sono riuscite a trovare le potenze di picco, la massa e l'ingombro volumetrico di quasi ogni strumento facente parte del payload di Opportunity. Questo passaggio sarà fondamentale per una stima della potenza utile da erogare per il funzionamento di alcuni di questi payload.

In seguito si è deciso di tabulare in maniera ordinata quanto appena detto per il rover Opportunity.

Come si può notare la massa totale del rover compreso il sistema di locomozione e il bus principale su cui poggia la struttura è di 180 kg e il fabbisogno energetico dei payload considerandoli sempre accesi ed in continuo funzionamento è di circa 150 W,

Opportunity				
Componente	Massa (kg)	Potenza (W)	Volume totale(cm3)	Funzione
Pancam	0.54	6.5		Fotocamera
Mi	0.29	4.8	101.6226	Immagini ravvicinate B/W di suolo e rocce
Mini-TES	2.4	5.6	5937.275	Determinare la mineralogia di rocce
MB	0.4		180	Spettrometro per identificare i minerali portatori di ferro
APXS	0.62	1.5	165.984	Determinare gli elementi che compongono le rocce e il suolo
RAT	0.72	30	636.1725124	Rimuovere la polvere e la roccia esposta alle intemperie
Sistema di Locomozione e Body	175.03	100	5520000	Controllo del movimento sulla superficie
Totale	180	148.4	5527021.054	

Tabella 2.1: Power budget Payload Scientifico di Opportunity

escludendo i sistemi di comunicazione e computer per processare dati raccolti dai singoli strumenti. Analizzando la tabella possiamo inoltre notare che lo strumento RAT, la piccola smerigliatrice, è il secondo payload più esigente dal punto di vista energetico dopo il sistema di locomozione che assorbe circa 100 W. Esclusi questi questi due casi però il fabbisogno energetico di ogni strumento in media si aggira tra i 3 e i 5 W. Quanto detto si può notare meglio dal seguente grafico a torta che mostra la distribuzione di massa ed energia nel rover.

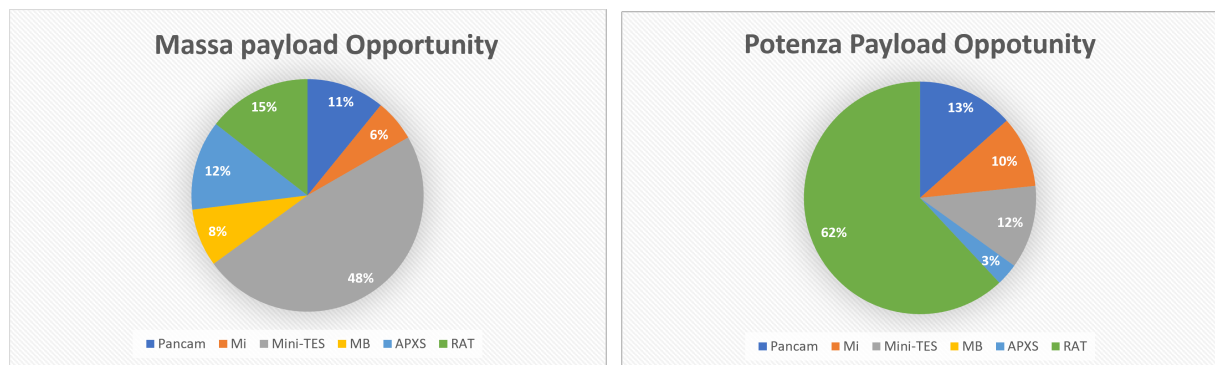


Figura 2.4: Divisione massa ed energia dei payload scientifici di Opportunity

Come si può notare, Mini-Tes occupa circa il 48 % della massa totale, ma nello stesso tempo il suo fabbisogno energetico è decisamente più basso rispetto ad altri strumenti, perciò richiede circa il 12% della potenza totale erogata dai pannelli solari o dalle batterie.

2.2 Perseverance

Perseverance è un rover marziano delle dimensioni di un'automobile pensato e progettato come pioniere destinato alla osservazione, allo studio e all'esplorazione del cratere Jezero su Marte. Esso è presentato dalla NASA come parte della missione Mars 2020. Come la maggior parte dei rover e lander marziani, Perseverance è stato creato dal Jet Propulsion Laboratory e lanciato nel luglio 2020. Dopo un lungo viaggio, il 18 Febbraio 2021, il rover è atterrato sulla superficie di Marte in maniera impeccabile. In seguito all'arrivo del rover, la NASA ha chiamato il suo sito di atterraggio Octavia E. Butler Landing.

Il concept di Perseverance è basato su un aggiornamento di quello di Curiosity. Esso, contiene sette strumenti di carico primario, telecamere e due microfoni. Il rover ha anche portato su Marte il drone Ingenuity, un velivolo sperimentale e vetrina tecnologica che ha effettuato il primo volo a motore su un altro pianeta il 19 aprile 2021. Il 30 aprile 2021, Perseverance è diventato il primo veicolo spaziale a sentire e registrare i suoni di un altro veicolo spaziale separato nelle vicinanze, registrando l'audio durante il quarto volo di Ingenuity.[19]



Figura 2.5: *Immagine che rappresenta la testa del rover Perseverance accanto al piccolo drone Ingenuity*

Gli obiettivi principali del rover includono la ricerca di una precedente vita microbica esistente in quegli ambienti, la raccolta di campioni di roccia e di suolo da conservare sulla superficie e la verifica della produzione di ossigeno dall'atmosfera marziana per preparare le future missioni con equipaggio.[19]

2.2.1 Mission Overview

Il rover Perseverance è il rover più all'avanguardia mai costruito dal JPL. La parte più critica della sua missione sul pianeta rosso è iniziata durante la fase EDL (Entry, Descent e Landing). Durante questa fase il rover ha attraversato i cosiddetti "7 minuti di terrore", fase in cui si perdono le comunicazioni a causa dell'alta velocità di rientro che è in regime ipersonico. In seguito si è aperto il paracadute supersonico che ha rallentato la discesa del rover. Durante la parte finale della discesa il rover a differenza delle altre missioni ha completato la diminuzione della velocità attraverso l'uso di retrorazzi che hanno pilotato il rover verso il sito di atterraggio prestabilito. Infine a circa 20 m dal suolo si compiuta la manovra di "Skycrane", che è consistita nel portare a touch-down il rover in sicurezza attraverso l'uso di cavi metallici, come una sorta di ascensore.

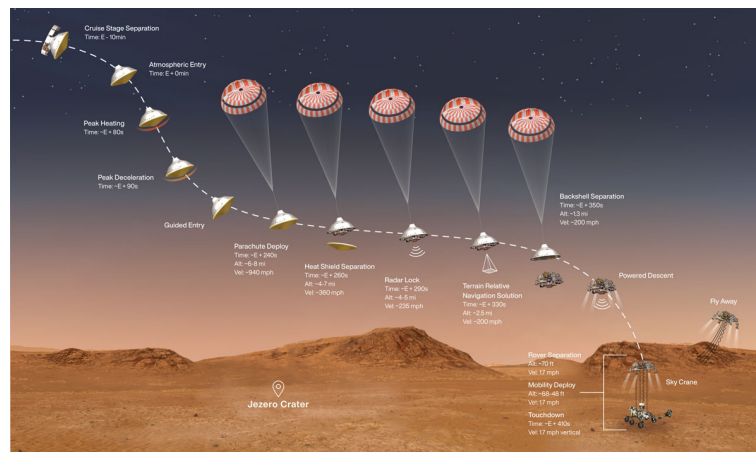


Figura 2.6: Immagine che rappresenta gli step della fase EDL (Entry Descent e Landing) di Perseverance sul cratere Jezero

Perseverance pesa circa 1000 kg, ed è un rover alimentato elettricamente da un MMRTG (Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator). L'MMRTG converte il calore dal decadimento radioattivo naturale del plutonio-238 in un flusso costante di elettricità ed è ad oggi il rover più grande mai costruito. I suoi principali obiettivi, da porcare a termine entro l'anno marziano (687 giorni terrestri) sono quattro:

- ricerca di rocce alterate da, o formatesi in ambienti che molto probabilmente in un lontano passato ha sostenuto una vita microbica;
- Trovare all'interno delle rocce analizzate delle tracce chimiche lasciate da una vita passata (cosiddette **biofirme**);

- Effettuare dei carotaggi di circa 30 cm attraverso delle trivelle e conservare questi reperti all'interno del rover stesso così da riportarli sulla Terra in una missione passata;
- Testare uno strumento capace di estrarre ossigeno dall'abbondante anidride carbonica presente nell'atmosfera marziana così da essere di supporto alla vita per le missioni future su Marte;

2.2.2 Analisi energetica del Payload

Come fatto per Opportunity, in questa sezione si concentra l'attenzione sul carico pagante della missione, escludendo in un primo momento il secondo protagonista di Mars 2020 della NASA: Ingenuity.

Perseverance, assieme al suo "fratello minore" Curiosity, è un rover più all'avanguardia costruito dalla NASA. Esso pesa più di 1000 kg e come i suoi predecessori, possiede un sistema di locomozione formato da sei ruote alimentate ciascuna da un motore autonomo rendendo agile il movimento di Perseverance. Il suo fabbisogno energetico è soddisfatto grazie ad un generatore a radio isotopi che sviluppa più 2000 W, ovviamente in condizioni di massima potenza in grado di ricaricare anche le batterie primarie del rover. IL payload di Perseverance è formato sostanzialmente da sette strumenti:

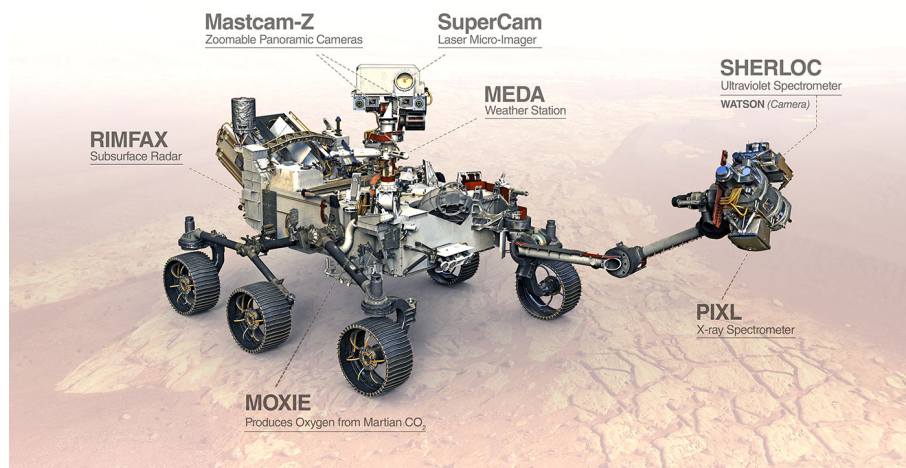
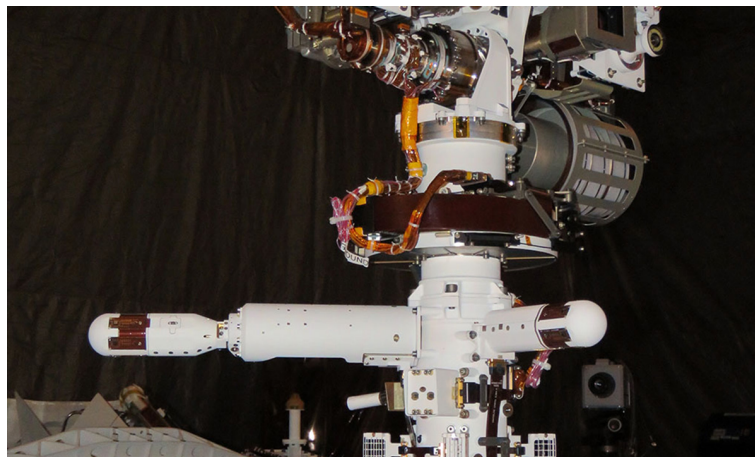


Figura 2.7: Immagine artistica redatta dalla NASA che rappresenta la posizione e il nome degli strumenti facenti parte del Payload scientifico del rover

- **Mastcam-Z:** è un sistema di fotocamere ad altissima risoluzione che sono capaci donare a Perseverance la possibilità di avere una vista stereoscopica. Questo sistema di fotocamere, allocato principalmente sulla testa del rover, è capace di zoommare su alcuni dettagli, senza perdere eccessivamente qualità grafica e di registrare dei video ad alta fluidità.

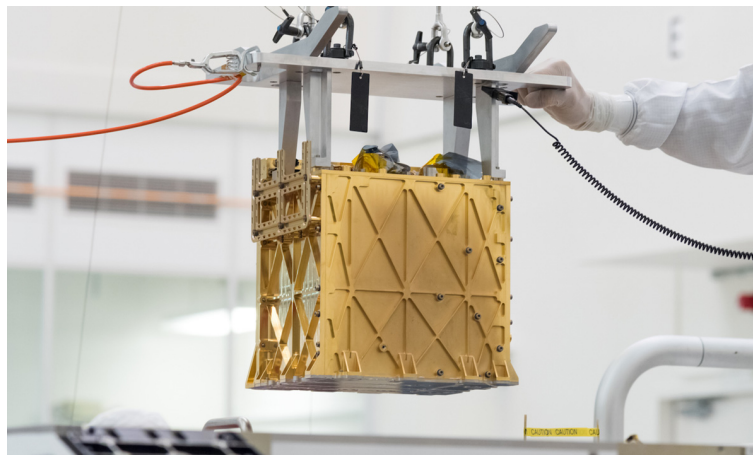


- **MEDA:** *Mars Environmental Dynamics Analyzer* effettua misurazioni meteorologiche tra cui velocità e direzione del vento, temperatura e umidità e misura anche la quantità e la dimensione delle particelle di polvere nell'atmosfera marziana. I sensori sono situati sul "collo" dell'albero del rover, sulla parte anteriore e all'interno del corpo del rover.

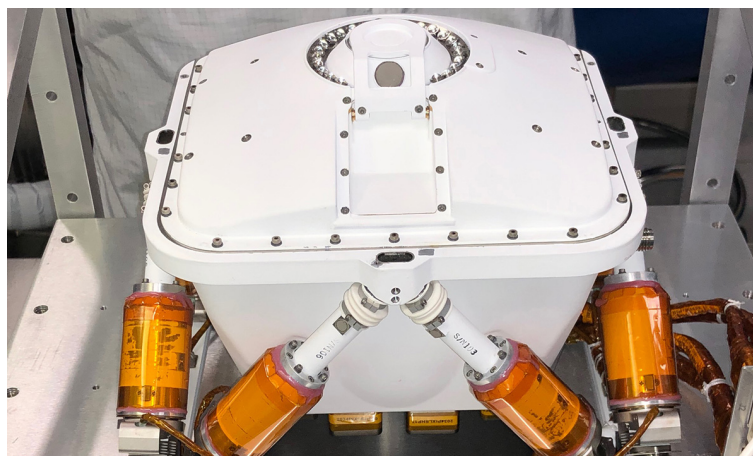


- **MOXIE:** *Mars Oxygen In-Situ Resource Utilization Experiment* è uno strumento estremamente importante, poichè il suo funzionamento è necessario a dimostrare la possibilità di produrre *in situ* ossigeno molecolare partendo dall'anidride carbonica presente al 95% circa nell'atmosfera marziana. MOXIE è presente nel corpo di

Perseverance. L'esperimento ha dato origine anche a diverse idee per produrre ossigeno sul pianeta rosso, una delle quali è il trasporto di un tank vuoto e di riempirlo con ossigeno liquido prodotto su Marte.



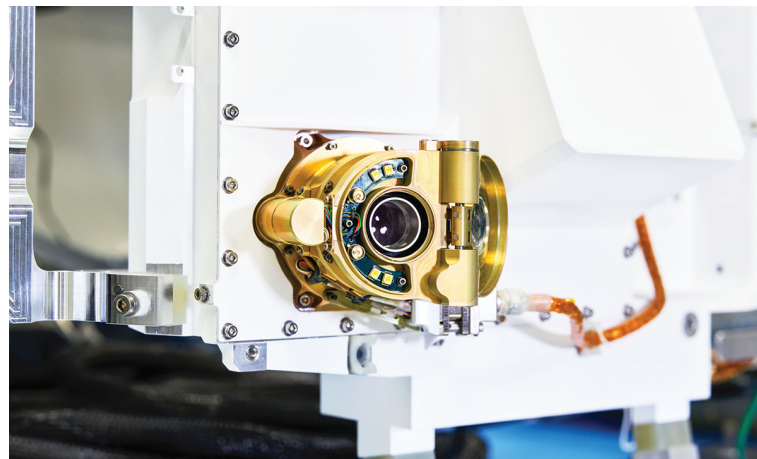
- **PIXL** è uno strumento che serve a studiare la composizione chimica delle rocce analizzate da Perseverance attraverso l'uso di raggi X (litochimica a raggi X). Esso è capace di individuare elementi chimici su scala ridotta ed è dotato di una fotocamera capace di scattare fotografie ravvicinate di strutture rocciose o del suolo marziano dell'ordine di grandezza di un granello di zucchero.



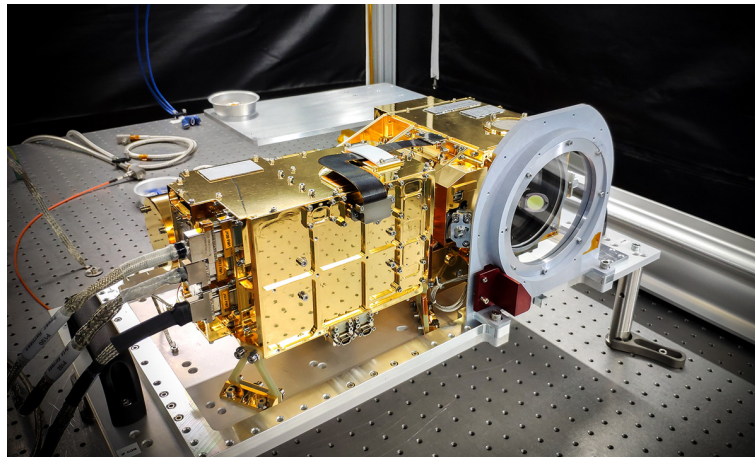
- **RIMFAX** *Radar Imager for Mars Subsurface Experiment* è uno strumento capace di studiare il suolo marziano utilizzando un radar a penetrazione del suolo. Esso è posizionato sul body di Perseverance e più precisamente nella parte posteriore del rover. RIMFAX permetterà di studiare la stratificazione del sottosuolo marziano andando a dare degli indizi agli scienziati per scoperte sulla antica storia geologica di Marte.



- **SHERLOC:** il *Scanning Habitable Environments with Raman & Luminescence for Organics & Chemicals* è uno strumento montato sul braccio meccanico di Perseverance ed è formato da un sofisticato sistema di fotocamere, spettrometri e laser capaci di analizzare il suolo marziano e le rocce per individuare tracce di molecole organiche o di minerali che possiedono modifiche causate dalla presenza dell'acqua o di una passata vita microbica. SHERLOC è assistito da WATSON che è una fotocamera che permette di scattare foto ravvicinate di grani di rocce analizzate.



- **SuperCam:** è una fotocamera montata sulla testa del rover dotata di un laser e di uno spettrometro di massa. Questa fotocamera a colori permetta al rover di scattare foto a delle rocce analizzandone immediatamente la struttura e composizione. La sua funzione è mirata proprio alla ricerca di forme di vita passata sul pianeta fino ad ora apparentemente deserto. Il laser permette di eliminare la polvere superficiale offrendo una visione chiara agli altri strumenti.



Ingenuity

Una parte importante del payload di Perseverance è il mini-drone Ingenuity che merita una sottosezione a parte, poichè è considerato a tutti gli effetti la seconda parte della missione Mars2020 della NASA. E' la prima volta nella storia delle missioni marziane che si fa volare un drone in un altro pianeta, a parte la sonda Huygens della missione Cassini su s Saturno. Ingenuity è dotato di un rotore elettrico che consente di far ruotare un set di pale appositamente studiate per il volo marziano e quindi adatte ad una atmosfera caratterizzata da un basso numero di Reynolds. Data la sua natura di dimostratore tecnologico, Ingenuity è stato concepito con tecnologie facilmente reperibili sul mercato e non costruito con soluzioni *ad hoc* a sola eccezione come detto per le pale.

Il corpo centrale a forma di parallelepipedo misura solo 14 cm, mentre nel suo totale Ingenuity 80 cm. I rotori sono formati da due coppie di pale del diametro di 1,2 m ed, essendo a guida autonoma, a causa della enorme distanza dalla Terra, deve affidare il suo orientamento alla posizione relativa del sole in ogni istante del suo volo.

Il suo "cervello" è molto semplice e comunemente reperibile. Per Ingenuity è stato usato un processore Qualcomm 801 Snapdragon, tipico dei nostri telefoni cellulari, e il suo sistema operativo è basato su Linux. Questo consente al drone di gestire la navigazione e controllo di assetto.

Ingenuity pesa 1,8 kg (0,68 kgf su Marte), con l'accelerazione gravitazionale di Marte di $3,69m/s^2$ esso genera una spinta di oltre 6,642 N nell'atmosfera marziana, la cui densità è approssimativamente l'1% di quella terrestre. Per sostenersi nell'atmosfera marziana il sistema di eliche devono girare ad una velocità di circa 3000 giri al minuto.



Descritto il payload scientifico di Perseverance e quello di Ingenuity si procede all'analisi energetica tenendo conto del fabbisogno energetico del rover sommato a quello dell'elicotterino. Anche in questo caso, come fatto con Opportunity, si è deciso di prendere in considerazione le potenze di picco, della massa e l'ingombro volumetrico di ogni strumento facente parte del payload scientifico, escludendo dall'analisi delle potenze richieste, quelle dedicate alle comunicazioni del rover con la Terra.

Perseverance				
Componente	Massa (kg)	Potenza (W)	Volume totale(cm3)	Funzione
Mastcam-Z	3,99	17,4	1320	Fotocamera
MEDA	5,5	17	5143,5625	Misure metereologiche
MOXIE	17,1	300	17650,389	Produrre O ₂ da CO ₂ presente dall'atmosfera marziana
PIXL	6,9	25	13351,5	Spettrometro a raggi X
RIMFAX	3	10	1552,32	Radar a penetrazione del suolo
SHERLOC	4,72	48,8	3484	Rivelatore di minerali
Supercam	10,4	17,9	17328	Composizione chimica di rocce e suoli
Ingenuity	1,8	350		Mars Helicopter Scout
Body e sistema di locomozione	971,59	200	17820000	Controllo del movimento sulla superficie
Totale	1025	986,1	17879829,77	

Tabella 2.2: Power budget Payload Scientifico di Perseverance

Come possiamo notare dalla tabella sovrastante, il peso totale di Perseverance è di

circa 1025 kg, dove la parte più importante dal punto di vista del peso è sicuramente il corpo, il sistema di locomozione, i computer e i cablaggi interni. Il sistema di locomozione assorbe circa 200 W e assieme allo strumento MOXIE è la parte del rover più dispendiosa dal punto di vista energetico. Il Power budget di prima istanza mostra quindi che il bisogno energetico del payload di Perseverance richiede circa 1000 W utili ad attivare ogni strumento equipaggiato.

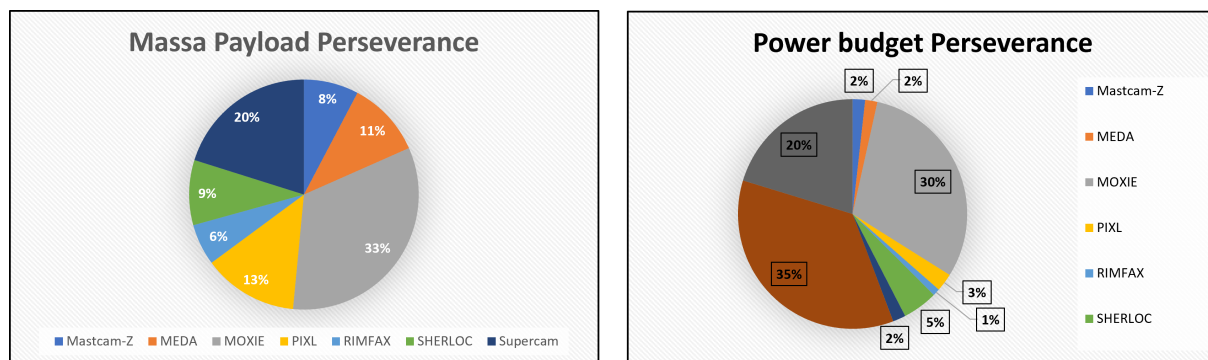


Figura 2.8: *Divisione masse ed energia dei payload di Perseverance*

Per completezza ed immediatezza grafica si sono riportati i grafici a torta che rappresentano la distribuzione percentuale delle masse e potenze richieste di ogni strumento del payload, escluso il sistema di locomozione e il mini-dorne Ingenuity.

2.3 InSight

2.3.1 Mission Overview

InSight, brevemente introdotta nel capitolo precedente, è un lander marziano lanciato nel 2018 dalla NASA ed è una piccola stazione fissa priva di movimento, pensata e sviluppata per ricercare in maniera più approfondita la storia evolutiva del pianeta Marte dal punto geologico, comprendendo così anche nozioni aggiuntive su come i pianeti di tipo terrestre si siano formati 4,5 miliardi di anni fa. InSight, grazie alla presenza del suo sismografo, può ascoltare il "polso" di questo pianeta apparentemente spento, analizzando così le attività sismiche.

Il razzo che ha spedito InSight ha anche lanciato un esperimento tecnologico separato della NASA: due mini-astronavi chiamate Mars Cube One, o MarCO. Questi CubeSat

delle dimensioni di una valigetta hanno volato per conto loro verso Marte dietro InSight. [12]

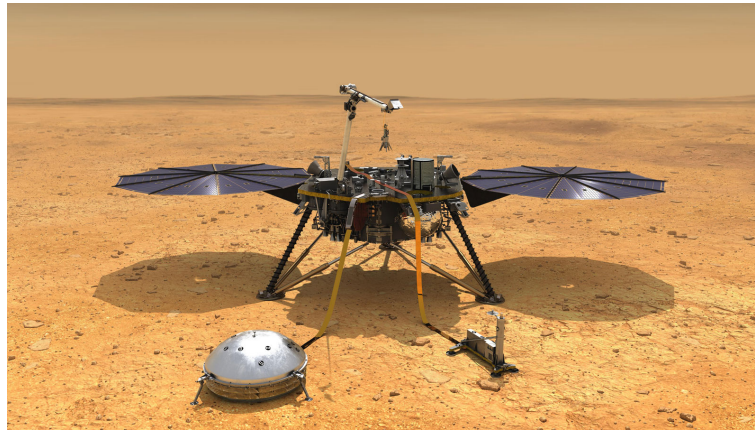


Figura 2.9: Foto artistica a cura della NASA che ritrae il lander InSight con i pannelli solari e il sismografo SEIS adagiato sulla superficie marziana

Il loro obiettivo era testare nuove apparecchiature miniaturizzate per le comunicazioni nello spazio profondo. Al loro arrivo su Marte, i gemelli MarCO hanno ritrasmesso con successo i dati che il lander emetteva durante la discesa in atmosfera e durante l'atterraggio di InSight. Questo è stato il primo test della tecnologia CubeSat miniaturizzata su un altro pianeta, che i ricercatori sperano possa offrire nuove funzionalità alle future missioni. [12]

InSight è dotato, come detto in precedenza di una parte devoluta allo studio atmosferico e meteorologico del pianeta raccogliendo dati inerenti alla velocità, direzione, del vento marziano, pressione, indice di opacità atmosferica e temperatura. Questo strumento è chiamato TWINS, contenuto nell'APSS (*Auxiliary Payload Sensor Subsystem*) che include anche un magnetometro per rilevare il campo magnetico planetario anche se molto debole.

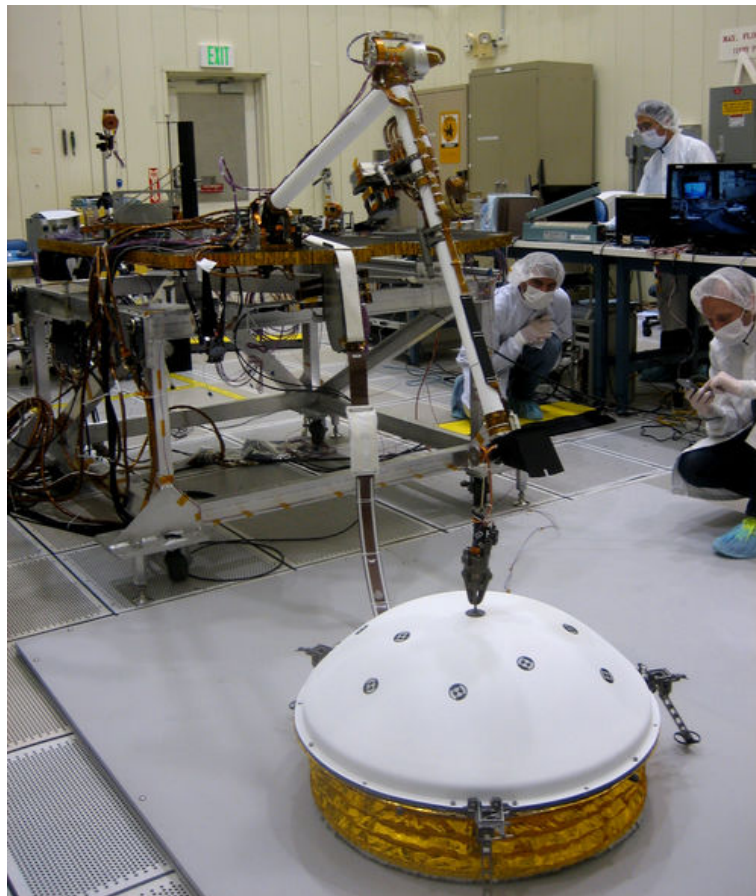
2.3.2 Analisi energetica dei Payload

Anche in questo caso studio si andranno ad analizzare i payload scientifici montati su InSight dandone una breve descrizione, definendone la funzione e determinarne la potenza di picco richiesta.

InSight, a differenza di Opportunity e di Perseverance è un lander, quindi non è dotato di movimento, pesa circa 360 kg ed è equipaggiato da tre strumenti principali. Anche in

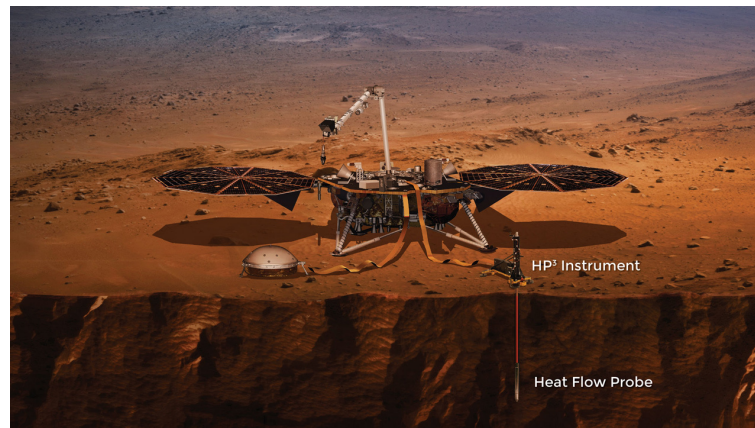
questo caso per coerenza non si è tenuto conto del fabbisogno energetico di strumentazioni di bordo e computer poichè elementi secondari del payload. Gli strumenti sono:

- **SEIS**: *Seismic Experiment for Interior Structure* è lo strumento scientifico a forma di cupola coperto da uno scudo termico e che evita la penetrazione di vento e polvere, equipaggiato sul braccio di InSight che permette di studiare eventuali movimenti tettonici e terremoti presenti sulla superficie marziana. SEIS è uno strumento molto sensibile infatti riesce a percepire anche le piccole vibrazioni superficiali generate da sistemi ventosi come tempeste di sabbia o diavoli di sabbia. Per questo motivo per contestualizzare i dati rivelati da SEIS si confrontano i risultati con lo strumento TWINS dell'APSS di InSight.



- **Heat Probe (HP³)**: *Heat Flow and Physical Properties Package* è uno strumento che trivellando può arrivare a circa cinque metri sotto la superficie che permette di rivelare la temperatura che emette il pianeta Marte. Questo permette di studiare come si sia formato Marte e se la sua formazione ha qualcosa in comune con gli altri corpi rocciosi come Terra e Luna. HP3 è molto sottile e viene estratto dal corpo

di InSight, grazie al braccio meccanico, che aiuta a posizionare anche SEIS sulla superficie.



- **RISE:** *Rotation and Interior Structure Experiment* traccia con precisione la posizione del lander per determinare di quanto oscilla il Polo Nord di Marte mentre orbita attorno al sole. Queste osservazioni forniranno informazioni dettagliate sulle dimensioni del nucleo ricco di ferro di Marte. Inoltre queste misure aiuteranno a determinare se il nucleo di Marte è liquido e quali altri elementi, oltre al ferro, possono essere presenti.[12] Lo strumento è formato da due antenne a tromba a guadagno medio, da un transponder e da un trasmettitore posizionati sul corpo centrale di InSight.



Di seguito per terminare la trattazione si riportano tabulate le potenze di picco e i grafici a torta che mostrano il fabbisogno energetico di ogni payload primario.

Come possiamo notare lo strumento più esigente dal punto di vista energetico e massiccio è sicuramente RISE, che assieme al suo sistema di antenne transponder e trasmettente

InSight				
Componente	Massa (kg)	Potenza (W)	Volume totale(cm3)	Funzione
SEIS	2	8,5	3000	Sismografo marziano
Heat Probe (HP3)	3	2	20000	Rivela la temperatura del suolo marziano
RISE	13,1	78	39600	Segue lo spostamento del polo nord di marte
Body e altre strumentazioni	341,9	511,5		
Totale	360	600	59600	

Tabella 2.3: Power budget Payload Scientifico di InSight

necessita di 78 W per un ora di funzionamento. Il fabbisogno di InSight inoltre è di 600W per garantire il funzionamento di ogni strumento, anche quelli secondari non trattati nella trattazione.



Figura 2.10: Divisione masse ed energia dei payload di InSight

2.4 Sistemi di produzione energetica

La risorsa energetica primaria che alimenta i rover, i lander ed in generale tutte le sonde che sono state inviate verso Marte, ma anche verso altri pianeti e la ISS (International Space Station) sono i pannelli solari. I pannelli solari fanno parte dell' EPS (Electrical Power System) che ha lo scopo di:

- Conversione di energia da qualche fonte in energia elettrica;
- Conservazione dell'energia;
- Regolazione, distribuzione e controllo della potenza in tutto il veicolo spaziale;

L'EPS converte l'energia grezza da una fonte adeguata, di solito il Sole, in energia elettrica che l'equipaggiamento del veicolo spaziale può utilizzare. Una volta che l'energia elettrica è ottenuta, spesso deve essere immagazzinata, specialmente nei i momenti in cui il rover o lander è nell'ombra o quando esso richiede un aumento di potenza istantanea. Infine, tutta questa potenza deve essere distribuita ai i vari sottosistemi, che a volte hanno esigenze diverse. Inoltre, tutti i sottosistemi devono essere protetti da sbalzi di potenza imprevisti.

Come detto il modo più comune di produrre energia è quello utilizzare come fonte energetica primaria la luce del Sole e trasformala in energia elettrica attraverso i pannelli solari o *solar arrays*. La conversione avviene per effetto fotoelettrico per mezzo delle celle solari (celle fotovoltaiche).

Purtroppo il processo di conversione non è estremamente efficiente. Definiamo pertanto la efficienza di una cella solare con il simbolo η . $\eta = 1$ indica che tutta l'energia che colpisce la cella solare viene convertita in energia elettrica. Le efficienze tipiche delle celle solari si aggirano intorno agli 0,1-0,3 a seconda della cella solare utilizzata. le tipologie di celle solari utilizzate in ambito "space" sono essenzialmente di tre:

- **Celle al Silicio** (monocristalline, policristalline o amorfe) con efficienze che si aggirano intorno al 7-15%;
- **celle all'Arsenuro di Gallio** (GaAs) (a singola giunzione o a tripla giunzione) che si dimostrano le migliori in quanto l'efficienza raggiunge il 18-30%;
- **Celle solari a film-sottile** con efficienze estremamente bassa 8-11% a base di Silicio amorfo, tellururo di cadmio o seleniuro di rame e indio;

Un'altro aspetto che bisogna tener conto quando si parla di celle solari è l'angolo con cui il raggio solare colpisce la cella stessa. Se il raggio solare colpisce perpendicolarmente la cella essa produrrà più energia. Se l'angolo di incidenza è maggiore di 60° rispetto alla perpendicolare, il raggio verrà completamente riflesso e nessuna parte dell'energia viene assorbita.

Inoltre bisogna tenere conto anche dell'intensità della fonte primaria di energia che arriva ad incidere sulla cella solare. Essa è fortemente influenzata dalla distanza della cella dalla fonte stessa e quindi dal Sole e anche dalla opacità atmosferica se la cella non si trova nello spazio profondo ma in ambienti planetari con atmosfera.

La legge che mostra la relazione tra energia assorbita e energia disponibile in funzione della efficienza di cella ed infine l'angolo di incidenza dei raggi solari su una cella solare è mostrata di seguito:

$$P_{OUT} = P_{IN} \cdot \eta \cdot \cos \Theta \quad (2.1)$$

dove la P_{out} è la potenza in uscita e quindi assorbita dalla cella, la P_{in} è la potenza posseduta dal raggio solare incidente, Θ è l'angolo di incidenza del raggio rispetto alla normale alla cella.

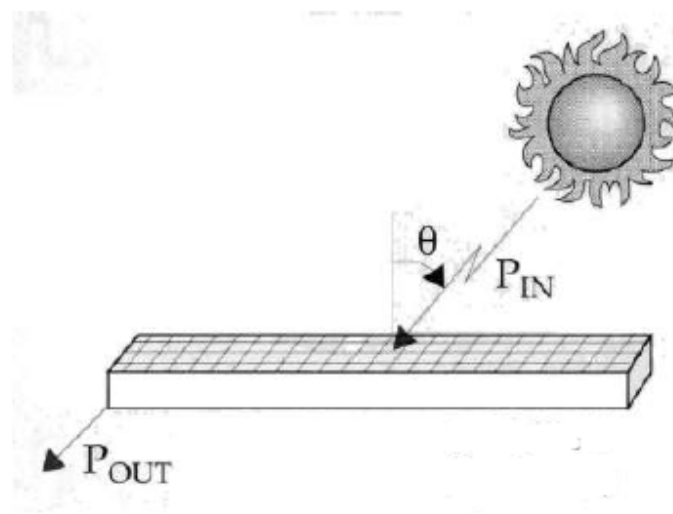


Figura 2.11: *Schema dimostrativo che mostra l'assorbimento di energia da parte di una cella solare*

Di seguito vengono riportate in tabella le densità di potenza solare in ingresso alle celle al metro quadro in funzione della distanza dal Sole. Per completezza finalizzata alla comprensione, si mostra anche il dato riferito a Venere, che è il pianeta con atmosfera più vicino al Sole. Inoltre vengono riportati in tabella le efficienze delle celle comunemente utilizzate in ambito space.

Attraverso la legge riportata nella pagina precedente, si è riportato in un grafico la densità di potenza in funzione dell'angolo di incidenza dei raggi solari in gradi per ogni tipologia di cella e per ogni tipologia di pianeta di tipo terrestre con atmosfera.

Come possiamo notare nei grafici riportati sotto, la potenza in uscita diminuisce all'aumentare dell'angolo di incidenza a prescindere dall'efficienza di cella. In generale notiamo

P_{in} (Solar input density) (W/m^2)	
Earth	1350
Mars	585
Venus	2595

η (conversion efficiency)	
Silicon Monocrystalline (Si)	0,2
GaAs (Triple Junction)	0,3
Thin-film	0,11

Tabella 2.4: Tabulazione delle densità superficiale di potenza del sole in ingresso alla cella e delle efficienze delle varie tipologie di celle fotovoltaiche

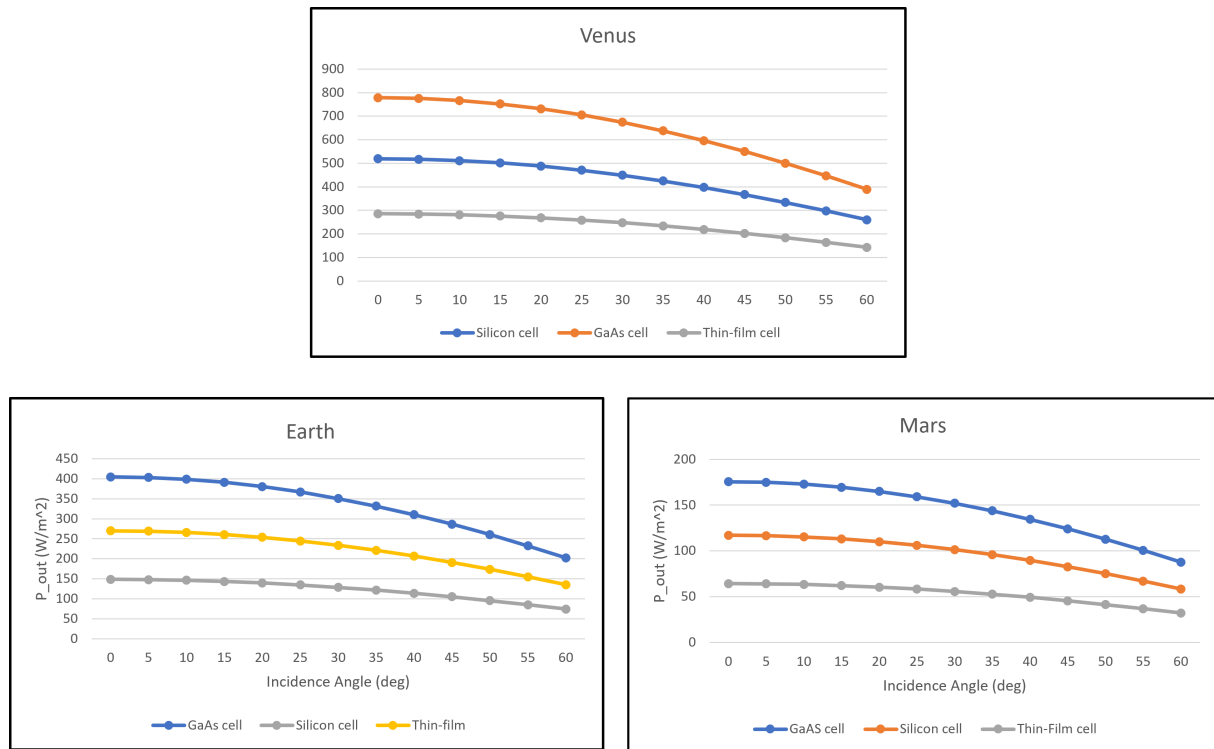


Figura 2.12: Densità di potenza in uscita in funzione dell'angolo di incidenza dei raggi solari

che la potenza in uscita dalla cella è sempre maggiore se si utilizzasse la cella all'arsenuro di gallio a tripla giunzione. Ciò conferma quanto detto in precedenza.

E' interessante notare anche che confrontando la densità di potenza in uscita in funzione dell'angolo di incidenza dei raggi solari tra Marte e la Terra utilizzando la cella

fotovoltaica più performante, che su Marte la densità di potenza è circa 2,5 volte più bassa rispetto alla Terra.

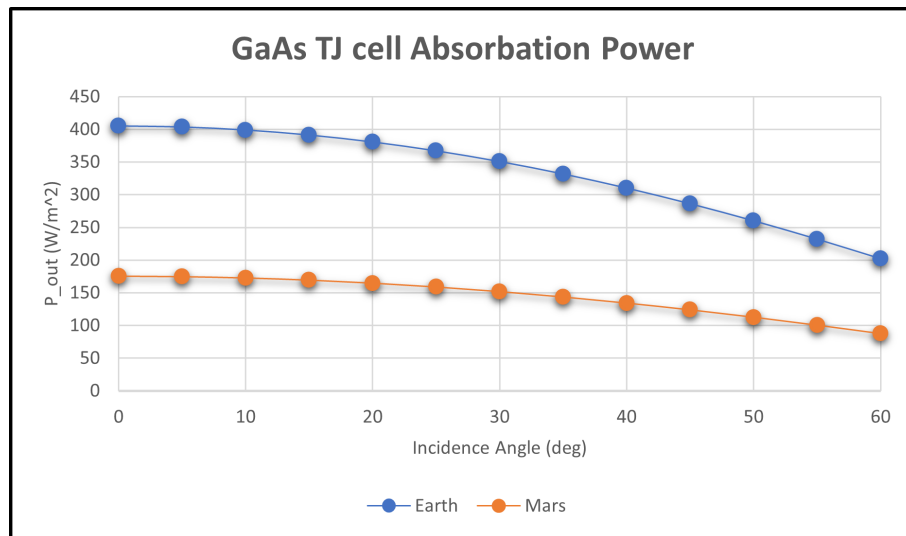


Figura 2.13: Confronto della densità di potenza in uscita in funzione dell'angolo di incidenza dei raggi solari tra Marte e la Terra

Durante le missioni marziane, spesso si sono utilizzati proprio i pannelli solari come fonte primaria per il sostentamento energetico dei rover e/o lander. Infatti dalle analisi già riportate, solo Perseverance possiede delle batterie nucleari, mentre Opportunity, InSight e il piccolo Ingenuity sono dotati di pannelli solari. Di seguito pertanto viene presentata una tabella che ci indica il numero dei pannelli solari, le loro dimensioni e la potenza/energia che essi producono ricavati dai rispettivi siti web redatti dalla NASA.

Solar panel Opportunity				
Type	Numbers wings	Area totale (m ²)	Energy 1st Sol (Wh)	
GaAs TJ cells	2+body	3,68	900	
Solar panel Ingenuity				
Type	Numbers wings	Area totale (m ²)	Power 1st Sol (W)	
GaAs TJ cells	1	0,0544	4,25	
Solar panel InSight				
Type	Numbers	Diameter (m)	Area totale (m ²)	Energy 1st Sol (Wh)
GaAs TJ cells	2	2,15	7,261006021	3000

Tabella 2.5: Energia sviluppata dai pannelli solari montati su ogni rover o lander analizzato in questo studio.

Dalla tabella sovrastante si nota che l'energia sviluppata dai pannelli solari è riportata al primo Sol marziano. Questo ci fa intuire che i pannelli solari non sviluppano mai la stessa potenza, infatti essi sono soggetti a degrado delle celle stesse e a eventi meteorologici inevitabili, come tempeste di sabbia o diavoli di polvere che alzano pulviscolo che si deposita sui pannelli stessi formando uno strato a volte spesso di sabbia che oscura le celle dai raggi solari già poco intensi rispetto alla Terra. A prova di quanto detto, ci sono le immagini dei rover che ci mostrano come questo fenomeno sia estremamente importante e nella maggior parte dei casi catastrofico con il tempo portando alla fine delle missioni, come nel caso di Opportunity e più recentemente di InSight che si è ibernato per fare power-saving a causa di una tempesta di sabbia. I pannelli solari inoltre lavorano solo di giorno, pertanto di notte non producono alcuna energia. Per questo motivo si utilizzano delle batterie secondarie ricaricabili che spesso sono a ioni di litio che hanno il compito di riscaldare la strumentazione e quindi i payload che si troverebbero ad affrontare temperature proibitive per il loro utilizzo e utili anche a dare supporto energetico per l'uso degli stessi anche durante la fase notturna del Sol. L'energia necessaria per il caricamento delle batterie sarà tenuto in esame come punto cardine sull'uso della energia eolica che verrà esplicitato nel capitolo successivo.

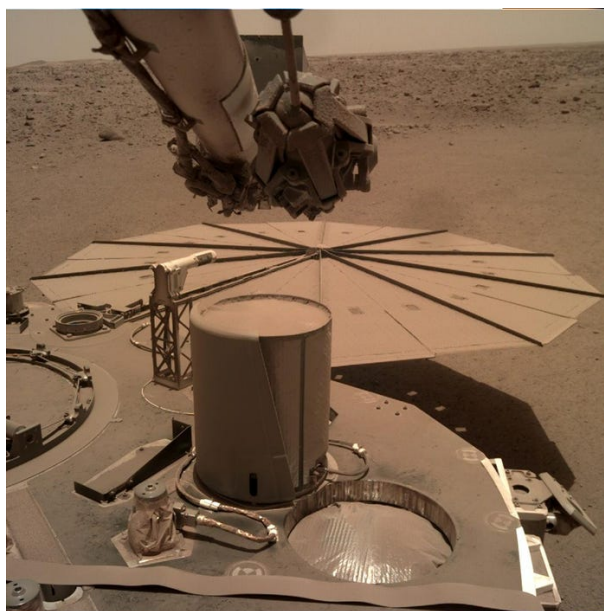


Figura 2.14: *Deposito polveroso sui pannelli di InSight*

Per quanto riguarda Perseverance è stato omesso il dato inerente ai pannelli solari poichè il rover, basato sul progetto di Curiosity possiede come fonte primaria un MMRTG

Opportunity Batteries					
Name	Number	Voltage (V)	Capacity (Ah)	Energy (Wh) BOL	Charge time on Mars (h)
EaglePicher Lithium Ion	2	28	8	448	12
Perseverance secondary Batteries					
Name	Number	Voltage (V)	Capacity (Ah)	Energy (Wh) BOL	
EaglePicher Lithium Ion	2	12	43	1032	
Ingenuity Batteries					
Name	Number	Voltage (V)	Capacity (Ah)	Energy (Wh)	Charge time on Mars (h)
Sony Sony SE US1865o VTC4 Li-ion	6	3,7	2,1	46,62	12
InSight Batteries					
Name	Number	Voltage (V)	Capacity (Ah)	Energy (Wh) BOL	Charge time on Mars (h)
EaglePicher Lithium Ion	2	28	25	1400	12

Tabella 2.6: Energia richiesta dalle batterie dei vari rover e lander analizzati

che eroga una potenza di circa 2000 W e che sfrutta il decadimento del plutonio.

Capitolo 3

Un rotore eolico su Marte?

In questo capitolo si andrà a studiare se, a valle dell'analisi energetica fatta in precedenza, risulti conveniente utilizzare l'energia eolica sul pianeta rosso. Inoltre, si valuterà se sia possibile utilizzare un rotore eolico come supporto ai pannelli solari che, sono ampiamente utilizzati in ambito spaziale ed in particolare nelle missioni marziane.

3.1 Energia eolica

Su Marte il vento è sempre presente, ed è influenzato dalla pressione e soprattutto dall'orografia del terreno. Pertanto delle enormi masse d'aria che si muovono da un punto del pianeta a più alta pressione ad un punto con minore pressione è una sorgente massiccia di energia potenziale che potrebbe essere sfruttata.

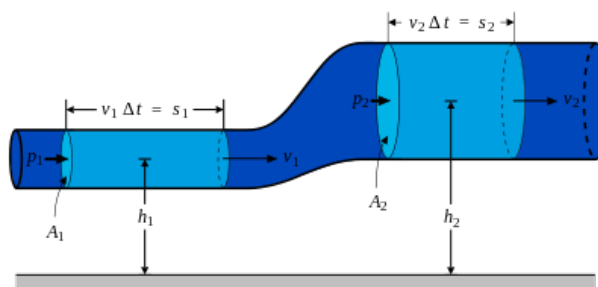


Figura 3.1: *Tubo di flusso*

Alla base dell'eolico vi è l'applicazione di una delle leggi della fluidodinamica molto importanti, la legge di Bernoulli. [22] Bernoulli afferma che considerato un tubo di flusso a sezione variabile, all'interno del quale viene fatto passare un fluido ideale, incompressibile

ed inviscido per un determinato tempo Δt , la variazione di energia meccanica tra due sezioni A_1 e A_2 è uguale al lavoro delle forze che agiscono sul fluido stesso.

Come possiamo notare dalla figura riportata sopra, il fluido che attraversa la porzione del tubo di flusso con area A_1 è soggetto ad una forza di pressione che è pari a $F_1 = p_1 A_1$, e quindi subisce un lavoro pari a:

$$L_1 = F_1 v_1 \Delta t = F_1 S_1 = p_1 A_1 S_1 = p_1 \Delta V$$

dove ΔV_1 è la variazione di volume. Allo stesso modo, sempre facendo riferimento allo schema in figura Figura3.1, si riportano i calcoli per ricavare il lavoro in corrispondenza della sezione A_2 :

$$L_2 = -F_2 v_1 \Delta t = -F_2 S_2 = -p_2 A_2 S_2 = -p_2 \Delta V$$

Questa volta il lavoro è negativo poichè le forze di pressione agiscono in verso opposto a quello di percorrenza del fluido. Pertanto il lavoro complessivo compiuto sul fluido dalle forze di pressione in un tempo Δt è pari alla somma dei lavori compiuti su di esso nelle sezioni 1 e 2:

$$L = (p_1 - p_2) \Delta V \quad (3.1)$$

La variazione di energia cinetica e potenziale nelle sezioni 1 e 2 sarà

$$\Delta K = \frac{1}{2}(\Delta m)v_2^2 - \frac{1}{2}(\Delta m)v_1^2 \quad (3.2)$$

$$\Delta U = (\Delta m)gh_2 - (\Delta m)gh_1 \quad (3.3)$$

dove Δm è la variazione di massa di fluido che passa attraverso il tubo di flusso, g è l'accelerazione gravitazionale e h è la quota altimetrica e quindi la quota riferita all'orizzontale.

A questo punto applicando il teorema del lavoro e dell'energia che afferma che la somma delle variazioni di energia cinetica e potenziale è uguale al lavoro compiuto dalle forze, si ottiene:

$$L = \Delta K + \Delta U$$

$$(p_1 - p_2) \Delta V = \frac{1}{2}(\Delta m)v_2^2 - \frac{1}{2}(\Delta m)v_1^2 + (\Delta m)gh_2 - (\Delta m)gh_1 \quad (3.4)$$

dividendo ambo i membri per ΔV e aggiustando la forma matematica si arriva alla legge:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2$$

da cui si ricava la legge di Bernoulli:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{costante} \quad (3.5)$$

pertanto la nostra legge è perfettamente applicabile nel caso di rotori eolici ad asse orizzontale e verticale. Di seguito viene mostrato il tubo di flusso applicato ad un sistema eolico ad asse orizzontale:

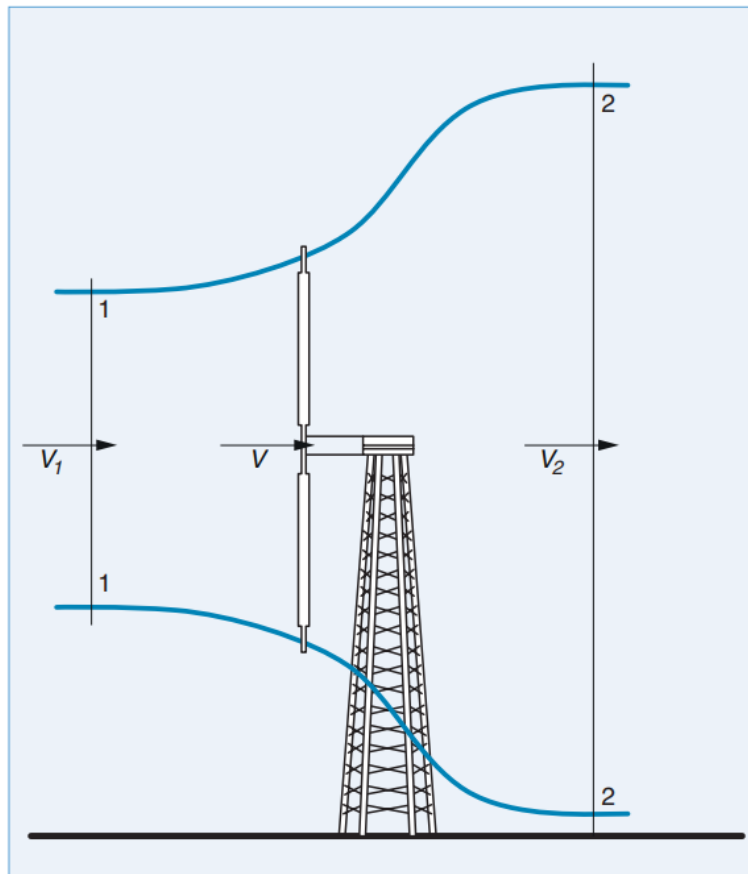


Figura 3.2: *Tubo di flusso attorno ad un rotore eolico ad asse orizzontale*

Il tubo di flusso rappresentata nello schema precedente è definito come *modello semplificato di Betz*, che è stato utilizzato dallo stesso scienziato per determinare la quantità di energia estraibile attraverso un rotore eolico.

Per poter analizzare il modello, Betz fece delle ipotesi:

- Il flusso di gas deve essere in ogni sezione considerato stazionario;
- la diminuzione della velocità deve essere distribuita uniformemente sul disco attuatore del rotore;
- Una condizione al contorno sulle sezioni infinitamente a valle e a monte del disco attuatore riguardo la pressione che deve essere pari alla pressione atmosferica;
- il gas deve essere considerato incompressibile e quindi la densità atmosferica deve essere considerata costante;
- la massa d'aria non deve incontrare ostacoli lungo il tubo di flusso, non deve compiere moto rotatorio e deve essere di intensità costante.

Applicando il teorema di Bernoulli pertanto si ha che:

$$p_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} + \rho g h_1 = p_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} + \rho g h_2 + k$$

dove p , v e h sono la pressione, velocità e altezza del centro asse del disco in corrispondenza di ogni sezione. Nella sezione centrale, dove è presente il disco attuatore, viene estratta parte dell'energia cinetica dal gas in movimento. $k = K/V$ è un fattore che indica l'energia cinetica per unità di volume che potenzialmente si potrebbe estrarre dal rotore.

Poichè per ipotesi $p_1 = p_2 = p_0$ che è la pressione ambiente, e l'altezza $h_1 = h_2$, l'equazione di Bernoulli si semplifica come segue:

$$k = \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_2^2) \quad (3.6)$$

Per quanto detto in precedenza, in prossimità del rotore parte dell'energia cinetica viene convertita in energia meccanica di rotazione. La potenza estratta è data dall'energia cinetica per unità di volume moltiplicata la quantità di gas in volume che attraversa la sezione S del rotore nell'unità di tempo Sv :

$$P = kSv = \frac{1}{2}\rho Sv(v_1^2 - v_2^2) \quad (3.7)$$

Come possiamo notare nella figura precedente, la velocità del gas v_1 nella prima sezione A_1 rallenta in prossimità del rotore fino ad arrivare alla velocità v_2 . Questa transizione è accompagnata dalla validità dell'equazione della continuità nella sezione in prossimità del disco attuatore:

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 = \rho v A = \frac{dm}{dt} \quad (3.8)$$

Per inciso, la potenza è anche data dal prodotto tra la forza che il gas esercita al suo passaggio sulla pala del rotore e la velocità del vento stesso:

$$P = Fv$$

dove la forza si potrebbe ricavare dalla conservazione della quantità di moto tra sezione di ingresso ed uscita del tubo di flusso nell'unità di tempo:

$$F = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{mv_2 - mv_1}{\Delta t} = \frac{m}{\Delta t}(v_2 - v_1) \Rightarrow F = \frac{dq}{dt} = (v_2 - v_1) \frac{dm}{dt} \quad (3.9)$$

Pertanto inserendo la forza nella formula della potenza appena scritta si ottiene e sostituendo l'equazione della continuità:

$$P = Fv = \frac{dm}{dt}(v_1 - v_2)v = \rho Av^2(v_1 - v_2) \quad (3.10)$$

Avendo quindi due espressioni per la potenza si unisce la Eq. 3.7 con la Eq. 3.10 e si ottiene:

$$\frac{1}{2}\rho Av(v_1^2 - v_2^2) = \rho Av^2(v_1 - v_2) \quad (3.11)$$

da cui si ricava:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (3.12)$$

Ossia la velocità nella sezione del rotore è esattamente la media delle velocità v_1 e v_2 e il rallentamento del flusso avviene proprio nella sezione centrale.

A questo punto si introduce nella trattazione un fattore di interferenza a definito come:

$$a = 1 - \frac{v}{v_1} = \frac{v_1 - v}{v_1}$$

da cui ricaviamo $v = (1-a)v_1$ e $v_2 = v_1(1-2a)$. Da qui possiamo riflettere sul valore massimo che può assumere a che è 0.5. Questo valore è puramente teorico poichè corrisponde al valore di a tale per cui il flusso nella sezione di uscita si annulli.

Sostituendo l'espressione di v_2 nell'equazione della potenza si ottiene:

$$P = \frac{1}{2}A\rho v_1^3 4a(1-a)^2 \quad (3.13)$$

Da qui si può ricavare anche la forza:

$$F = \frac{1}{2}A\rho v_1^2 4a(1-a)^2 \quad (3.14)$$

Annullando la derivata prima di P fatta rispetto ad a e annullandola, si ottiene il valore ottimale che la stessa a può assumere per massimizzare la potenza. Da questa analisi si ottengono due valori del fattore di interferenza: $a = 1$ e $a = 1/3$. Siccome $a = 1$ non è corretto poichè è il valore per cui la potenza si annulla, si prende in considerazione solo $a_{opt} = 1/3$.

Si introduce ora anche il *coefficiente di potenza* c_p , definito come il rapporto tra la potenza P appena calcolata e la potenza P_0 o potenza fluidodinamica che è quella potenza che potenzialmente si potrebbe ricavare dallo stesso tubo di flusso in assenza del rotore.

$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{2}A\rho v_1^3 4a(1-a)^2}{\frac{1}{2}A\rho v_1^3} = 4a(1-a)^2 \quad (3.15)$$

a questo punto sostituendo il valore ottimale ricavato in precedenza si ottiene un valore di c_p pari a 0.593. Questo fa capire che la potenza massima estraibile dal vento è il 59.3% della potenza fluidodinamica posseduta dal vento. Questo risultato viene chiamato **limite di Betz**. Il coefficiente di potenza può essere espresso analiticamente anche in funzione delle velocità:

$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right) \quad (3.16)$$

Quanto appena detto è valido nel momento in cui si considera il funzionamento di un rotore eolico ideale. In realtà il coefficiente di potenza deve tener conto di alcune perdite che fanno calare tale valore portandolo lontano dal limite ideale:

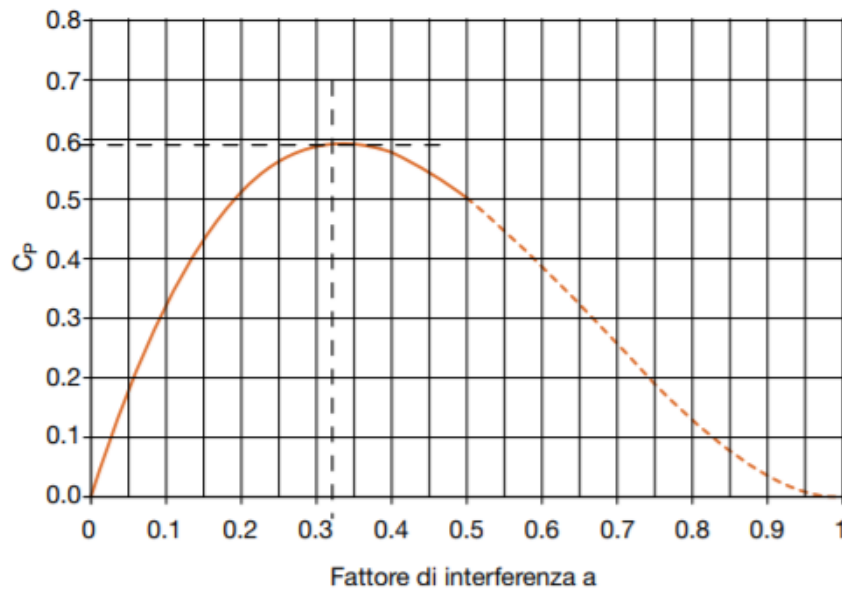


Figura 3.3: *coefficiente di potenza in funzione del fattore di interferenza*[22]

- fluido rotazionale dietro la scia del rotore;
- numero finito di pale;
- resistenza aerodinamica non nulla;

Nonostante queste perdite però si è riusciti ad arrivare coefficienti di potenza reali molto vicini a limite di Betz, a circa 0.5. Infine si devono considerare i vari rendimenti di conversione elettrica e meccanico che fanno scendere ulteriormente la potenza elettrica estraibile.

$$P_e = \eta_e \eta_m P$$

Infine, si deve tener conto che il c_p è legato alle caratteristiche aerodinamiche della pala attraverso il TSR (Tip Speed Ratio) che per definizione è definito come il rapporto tra la velocità tangenziale al tip alare e la velocità del vento in ingresso:

$$\lambda = \frac{\Omega R}{v_1} \quad (3.17)$$

dove R è il raggio del disco rotorico.

3.2 Le tipologie di rotori eolici

I rotori eolici attualmente utilizzati sono sostanzialmente di due tipi: a portanza e a resistenza a seconda della forza motrice sfruttata. I rotori eolici basati sulla portanza, utilizzano sostanzialmente dei veri e propri profili alari per generare la forza motrice. Infatti, il gas scorre sia sul dorso che sul ventre del profilo alare montato. Aerodinamicamente, il profilo vede una pressione maggiore sul dorso e una pressione minore sul ventre e questo genera sul profilo la portanza L e una componente resistiva D che si oppone al movimento della pala.

I rotori eolici basati sulla resistenza invece, sfruttano la differenza di resistenza (attrito) data dal vento attraverso l'utilizzo di superfici simmetricamente posizionate rispetto all'asse del rotore stesso.

Un'altra classificazione che è d'obbligo fare è sicuramente quella di distinguere rotori ad asse orizzontale (HAWT) e rotori ad asse verticale (VAWT), a seconda che l'asse di rotazione del rotore sia parallelo o perpendicolare alla direzione del vento.

I rotori HAWT sono attualmente i più diffusi e variano nel numero di pale che spesso sono tre ma che possono arrivare anche ad una dozzina. I rotori ad asse orizzontale sono formati spesso da un disco rotorico che è collegato tramite albero ad un moltiplicatore di giri, freni e attuatori per il "pitch" e "yaw" che controllano attivamente il calettamento della pala e l'allineamento della navicella rispetto al vento (corpo che contiene il generatore elettrico, moltiplicatore di giri, freni ad attuatori).

I rotori ad asse orizzontale lavorano generalmente a λ maggiori e questo permette di ottenere coefficienti di potenza che generalmente si aggirano intorno allo 0.48. Un altro vantaggio è che questa tipologia di rotori lavorano a coppia più bassa. Uno svantaggio caratteristico dei rotori HAWT è sicuramente è l'utilizzo di un sistema attivo che controlla l'allineamento alla corrente, pertanto non sono omnidirezionali.

I rotori ad asse verticale invece, sono certamente molto meno diffuse rispetto alle HAWT, ma sono molto versatili poichè sono pensate per essere installate su unità abitative e ad altezze più basse, rendendo il processo di installazione più agevole.

Un ulteriore vantaggio è che avendo minore quantità di parti mobili, poichè omnidirezionali, le VAWT richiedono interventi e costi di manutenzione meno onerosi a livello economico e di rischio.

Alcuni svantaggi sono sicuramente derivanti dall'altezza di installazione, poichè questi

rotori, a parità di luogo di installazione vedono in ingresso una velocità del vento più bassa rispetto a quello che incontrerebbe una HAWT, ed inoltre anche soggetto a più flussi turbolenti generati dall'interazione del vento con il suolo.

Tuttavia, l'ottimizzazione di queste macchine permette il loro funzionamento anche a velocità estremamente basse ($4m/s$), flussi turbolenti e possiedono una maggiore resistenza alle raffiche. Questo rende queste turbine molto interessanti dal punto di vista ingegneristico nonostante sia meno performante delle turbine ad asse orizzontale.

Le turbine ad asse verticale si dividono in tre grandi categorie: Savonius, Darrieus e Savonius-Darrieus.

Il rotore ad asse verticale di tipo **Savonius** è una turbina "a resistenza", ed è molto semplice e intuitiva nel suo funzionamento. Essa è formata tipicamente da due lamiere a forma di semicirconfenza in opposizione tra loro che sono collegate ad un albero centrale.

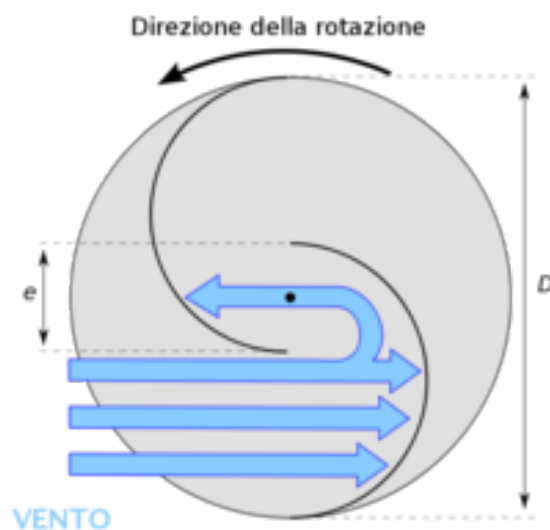


Figura 3.4: *Schema di funzionamento di una turbina Savonius*

Il loro funzionamento è basato sul principio secondo il quale il vento impattando su uno dei semi-cilindri mette in rotazione il rotore. Muovendosi, la turbina vede diminuire la vena fluida mentre il semi-cilindro opposto la vede aumentare. In termini fisici vi è una differenza della resistenza che rappresenta la forza motrice che permette la rotazione del rotore.

Il problema del Savonius è proprio nel avanzamento controvento di uno dei due cilindri come possiamo vedere nella figura 3.4. Questo limita molto la coppia che si potrebbe produrre a parità di velocità del vento.

Le turbine **Darrieus**, sono dei rotori "a portanza", la quale viene generata mediante l'uso di veri e propri profili alari che generano una distribuzione di pressione sulla pala tale da generare una coppia ben più grande di quella generata dal Savonius, aumentandone così l'efficienza. Le tipologie di turbine Darrieus sono sostanzialmente tre: "eggbeater", "H-type" e Darrieus elicoidale che si distinguono per la forma delle pale.

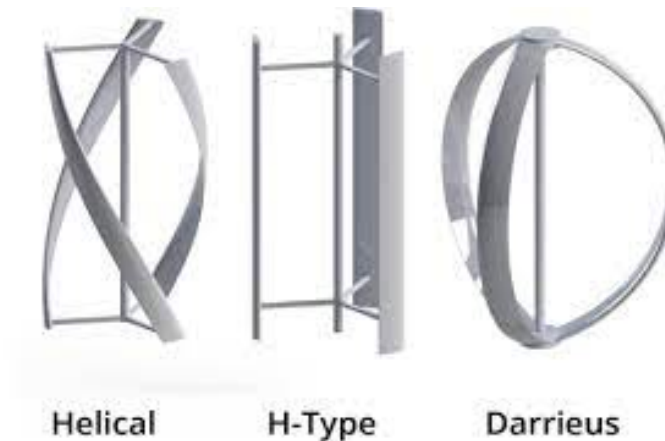


Figura 3.5: *Tipologie di turbine Darrieus*

Tuttavia le turbine Darrieus non sono in grado di avviarsi autonomamente, infatti, a prescindere dalla velocità del vento che le investe, la coppia di avviamento è nulla, quindi ha bisogno di una coppia di spunto data da un dispositivo ausiliario per avviarle.

Per tale motivo, si è pensato di progettare una terza categoria (ibrido) di rotori ad asse verticale le turbine **Savonius-Darrieus**, dove la coppia di spunto viene data da una turbina Savonius coassiale ed interna ad una turbina Darrieus.



Figura 3.6: *Turbina ibrida Savonius-Darrieus*

3.3 Potenza estratta dal vento marziano

In questa sezione si pone l'attenzione sul calcolo della potenza che fisicamente si potrebbe estrarre dal vento marziano analizzato nel primo capitolo. Si precisa che questo studio è stato condotto basandosi sul vento ricavato nei pressi del sito di atterraggio di InSight (Elysium Plantia) e quindi sulla superficie del pianeta. Dalla missione MAVEN però, si è constatato che a causa della orografia del terreno marziano, in quota i venti sono comunque presenti e più intensi.

Come prima parte dell'analisi della potenza estraibile dal vento marziano si analizza il numero di Reynolds a monte del disco rotorico che in media viene ad instaurarsi nei pressi di Elysium Plantia. Per farlo si è cercato, a valle dell'analisi della velocità del vento fatta in precedenza, di estrarre una velocità media per ogni sol marziano ed in seguito calcolare il numero di Reynolds medio per ogni Sol.

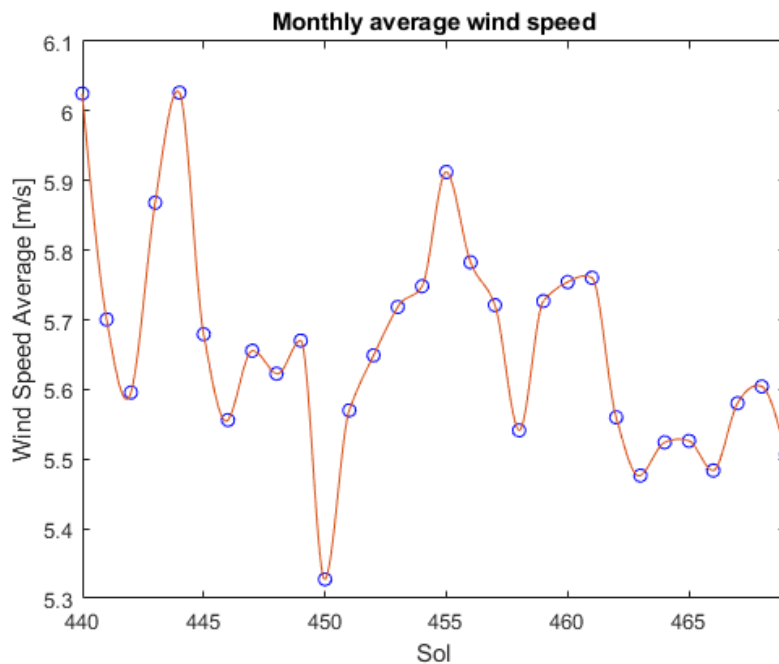


Figura 3.7: *Calcolo della velocità media sulla superficie marziana*

Dal grafico si può notare che la velocità oscilla tra un minimo di 5.3 ed un massimo di 6 metri al secondo durante il mese estivo. Risulta particolarmente utile per calcolare il numero di Reynolds a monte della pala, considerare quindi queste velocità medie. Ai fini di un calcolo preliminare si assume che la velocità considerata sia solo quella media del flusso indisturbato v_1 e non la composizione di questa con la velocità di rotazione della pala. Si è considerato che la lunghezza caratteristica della pala sia pari ad un metro, la

viscosità pari a quella calcolata nel primo capitolo ($1.13 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$) e la densità pari a quella media sulla superficie del pianeta (0.02 kg/m^3):

$$Re_{\infty} = \frac{\rho_{\infty} L V_m}{\mu}$$

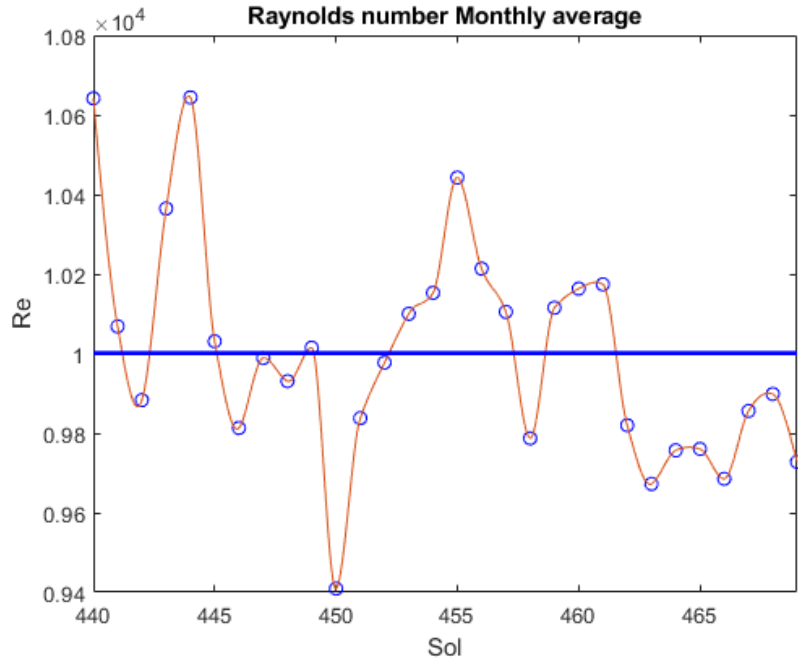


Figura 3.8: *Calcolo del numero di Reynolds del flusso indisturbato*

Dal calcolo possiamo notare che a parità di densità, viscosità e lunghezza caratteristica della pala del rotore, al variare della velocità varia anche il numero di Reynolds. Esso oscilla intorno al valore medio di circa 10000. Questo dimostra che il regime di flusso sia turbolento anche a velocità così basse. Quanto appena detto dimostra che in una turbina eolica ad asse verticale di tipo Darrieus o ad asse orizzontale i profili alari delle pale che costituiscono il rotore stesso debbano essere adatte a dei regimi con bassi numeri di Reynolds.

Tutto ciò è in totale accordo con quanto scritto dal collega *Lorenzo Bruni* nel suo lavoro di tesi incentrato proprio sullo studio di queste tipologie di profili. Il presente lavoro di tesi, svolto attraverso una collaborazione con l'agenzia spaziale giapponese JAXA, [21] dimostra che profili sperimentali, come ad esempio il profilo triangolare, più sottili e più lunghi, con spessore massimo nella parte anteriore del profilo, consentono di mitigare l'effetto del basso numero di Reynolds che porta alla separazione del flusso molto a monte del profilo.



Figura 3.9: *profilo alare sperimentale utilizzato a bassi numeri di Reynolds studiato da JAXA in collaborazione con il Politecnico di Torino [21]*

Questo elemento potrebbe essere approfondito attraverso altri studi di ottimizzazione che potrebbero portare ad una realizzazione futura di un rotore eolico su Marte.

Successivamente si è deciso di calcolare la potenza che potenzialmente l'ipotetico rotore eolico potrebbe estrarre dal vento marziano. Per poterlo fare però si sono fatte delle ipotesi molto conservative ma che potrebbero dare l'idea delle sue prestazioni:

- l'area del rotore che incontra il vento è stata scelta molto simile a quella dei pannelli solari di InSight, in questo caso $10m^2$;
- un coefficiente di potenza molto prossimo al limite di Betz tipico delle turbine ad asse orizzontale eoliche moderne pari a 0.49;
- non si terrà conto dei rendimenti di generazione elettrica e meccanici che sono causa di perdite;

Per prima cosa si è calcolato l'andamento della potenza in funzione delle singole velocità istantanee, che si sono ricavate dallo strumento TWINS del lander InSight per ogni Sol marziano. Dal grafico sottostante si può notare che la natura molto variabile del vento marziano fa oscillare la potenza che comunque segue la seguente legge:

$$P_e = \frac{1}{2} \rho c_p A v^3 \quad (3.18)$$

A parità dei fattori elencati nelle ipotesi sovrastanti, al variare della velocità istantanea varia anche la potenza istantanea.

La potenza raggiunge in alcuni momenti anche i 400 W, valori relativamente alti considerate le dimensioni del rotore e le limitazioni dovute alla bassissima densità del pianeta rosso.

Non si possono considerare questi ordini di grandezza per la potenza accumulabile dal rotore perchè, dalle distribuzioni di Weibull di tutti i dati del mese estivo marziano, si

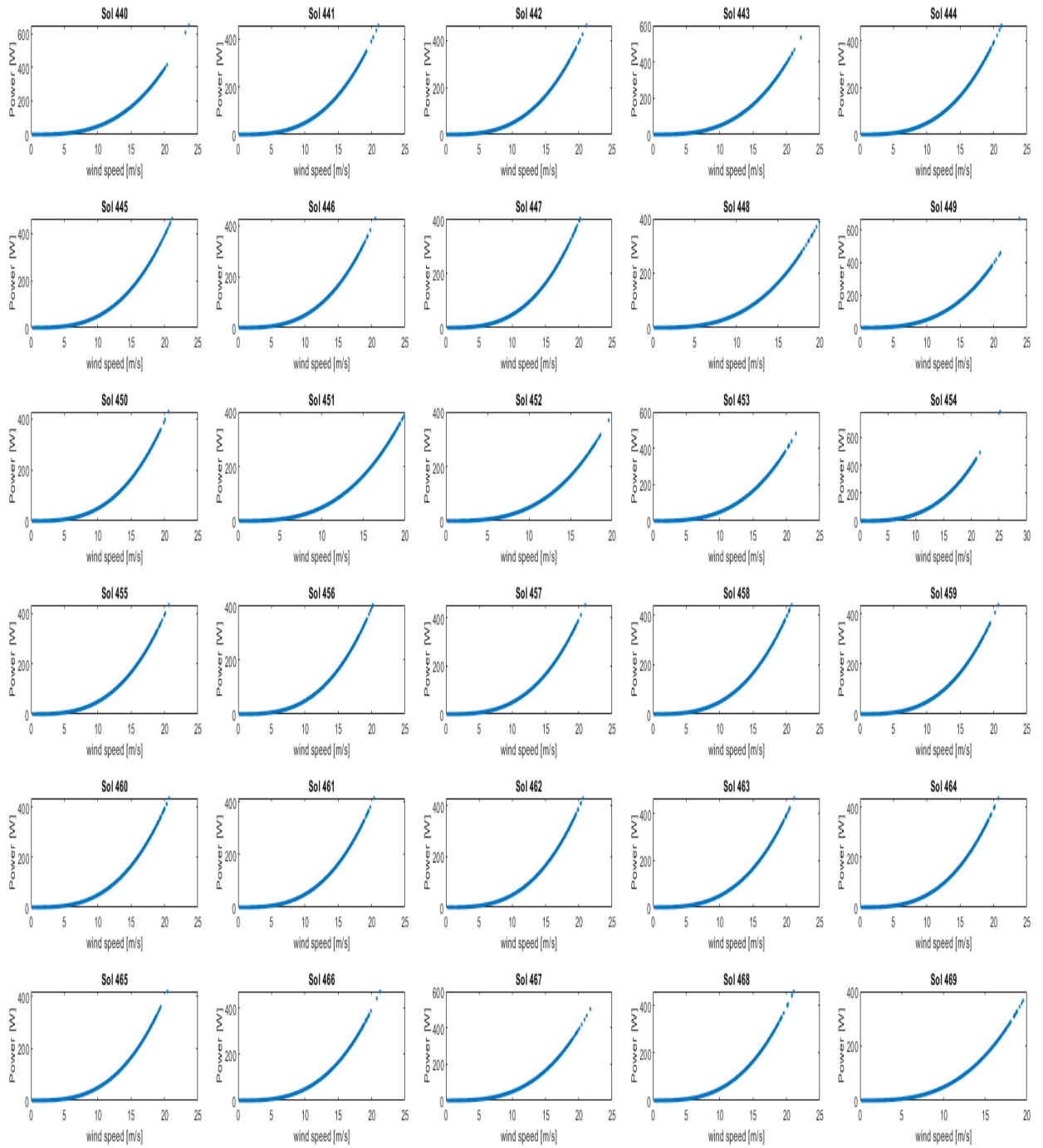
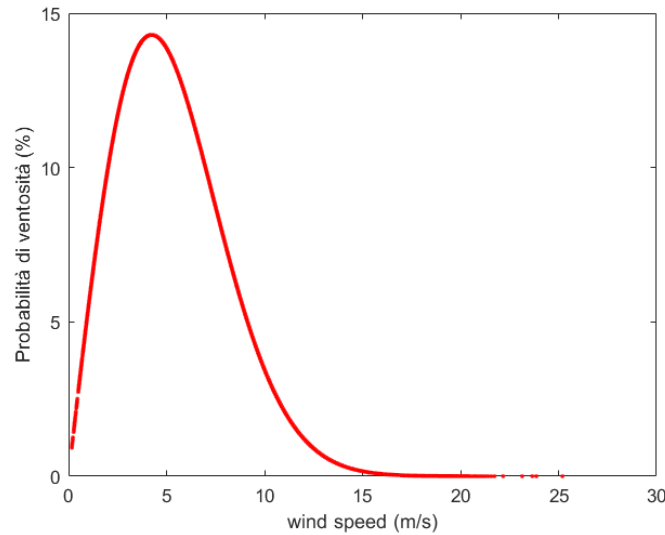
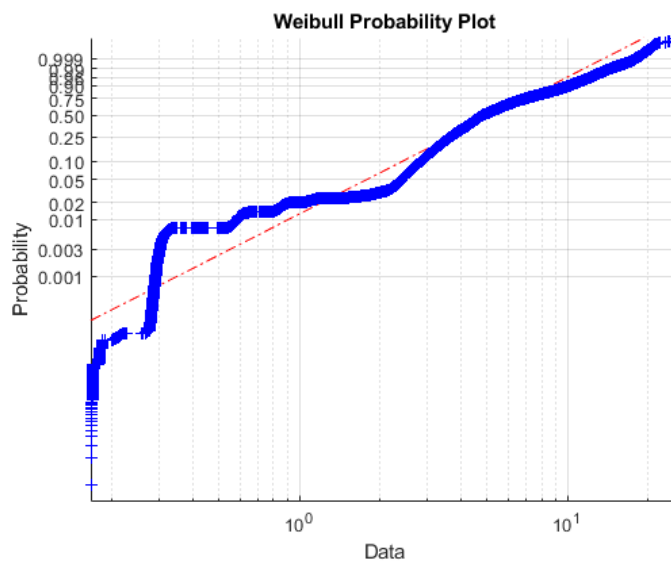


Figura 3.10: *Potenza istantanea me evidenza la variabilità del vento marziano nella piana di Elysium.*

evinces che la velocità del vento che più probabilmente si può trovare a quota zero nei pressi di Elysium Planitia è circa 5.3m/s . Questo valore non è molto lontano dalla media aritmetica dei dati medi ricavati dalle singole distribuzioni di velocità per ogni Sol.



(a) Distribuzione di Probabilità



(b) Confronto tra distribuzione reale dei dati e una distribuzione ideale di Weibull prodotto tramite Matlab

Figura 3.11: PDF di tutti i dati ricavati dallo strumento TWIN nel sito di Elysium Planitia

A questo punto, per un calcolo più coerente si prendono le singole velocità medie per ogni Sol riportate in Figura 3.7 e si è calcolata la potenza media per ogni Sol e prendendo costanti le caratteristiche del rotore ideale.

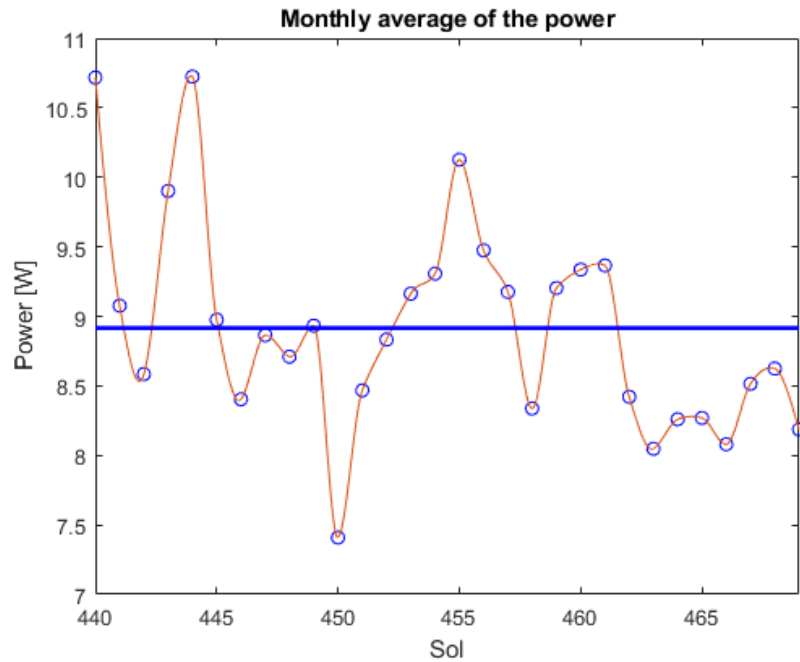


Figura 3.12: Andamento della potenza media durante il mese marziano analizzato

La potenza varia come l'andamento delle velocità medie. Le potenze estraibili pertanto da un rotore ideale con le caratteristiche sopraelencate oscillano tra un minimo di 7.5 W circa e quasi 11 W di picco. Questo spiega come un rotore delle dimensioni di circa 10 m^2 produce una potenza bassissima. Pertanto la causa di questi risultati è imputabile alla bassa densità atmosferica marziana. Ai fini dello studio di fattibilità si è calcolata anche in questo caso la media mensile di potenza estratta, pari a circa 9 W.

Per chiudere la trattazione si riprendono le energie delle batterie utili al sostentamento energetico durante la fase notturna del Sol marziano e si è calcolato il tempo indicativo di carica di queste ultime utilizzando il rotore ideale. Analizzando tabella seguente e considerando la potenza media appena ricavata supponendola costante, i tempi di ricarica delle batterie aumentano all'aumentare della capacità della batteria stessa.

Time charging Ingenuity's batteries (h)	5,23
Time charging Opportunity's batteries (h)	50,24
Time charging InSight's batteries (h)	156,99
Time charging Perseverance's batteries (h)	115,72

Tabella 3.1: Tempi di ricarica delle batterie dei principali rover e lander analizzati nel capitolo precedente

Si evince con certezza che l'energia eolica estratta da un singolo rotore posizionato su un sito pianeggiante, è sufficiente solo a caricare batterie di piccola capacità come quelle di Ingenuity in meno di un Sol. Negli altri casi l'energia estratta non risulta sufficiente. Ovviamente, in un caso ideale, le batterie dell'elicottero marziano, caricandosi in sole 5/6 ore garantirebbe un funzionamento sicuramente migliore i tempi di volo giornalieri. Per generare più potenza si potrebbe pensare di aumentare l'area del disco rotorico o aumentare la quota di installazione del disco stesso, poichè all'aumentare della quota aumenta anche la velocità del vento. Questo però farebbe da una parte diminuire il tempo di ricarica delle batterie, ma dall'altra parte potrebbe essere problematico per via delle dimensioni del rotore che diventerebbero ingombranti aumentando così l'inerzia. Un'altra modalità che consentirebbe di estrarre più potenza e quindi più energia, sarebbe quello di installare delle turbine in serie in zone più ventose, in modo tale da costruire un vero e proprio parco eolico.

Dai risultati ottenuti inoltre si potrebbe pensare di utilizzare la potenza estratta dal vento marziano per alimentare singole strumentazioni utilizzate come payload scientifici equipaggiati su lander o rover marziani. Certamente, la potenza che idealmente si potrebbe estrarre dal rotore, risulta essere molto bassa e la turbina quindi non si dimostra sufficiente da sola a garantire un sostentamento energetico di payload come MOXIE o SHERLOC montate su Perseverance, ma adatta a payload come PanCam, Mini-TES e piccoli spettrometri.

Infine, per completare lo studio di fattibilità si è deciso di calcolare la *producibilità energetica*, che mira a ricavare la produzione di energia espresso in KWh durante un determinato periodo di studio. Per stimare la producibilità energetica ideale durante il mese marziano, non è sufficiente ricavare una velocità media e quindi una potenza media, ma bisogna possedere dei dati istantanei di velocità e conoscerne la loro distribuzione di Weibull che ci indica con che probabilità una determinata velocità si presenta durante il periodo analizzato. La relazione utilizzata per questo calcolo è la seguente:

$$E = 738.6 \cdot \int P(v) \cdot \frac{\text{prob}(\%(v))}{100} dv \quad (3.19)$$

dove i termini dell'integrale rappresentano:

- **738.6** sono le ore presenti in un mese marziano rapportato al mese terrestre;

- $P(v)$ è la potenza espressa in KW ad una determinata velocità istantanea rilevata nel sito;
- $\text{prob}(\%(v))$ è la probabilità che la velocità che produce la potenza istantanea di cui al punto precedente si verifichi. Questa probabilità viene ricavata dal diagramma di Weibull ricavato in precedenza;

Nel caso studio analizzato, la producibilità energetica risulta essere di circa 8,98 KWh prodotta in un mese. Essa è circa due ordini di grandezza più piccola rispetto alla producibilità energetica ideale prodotta dalla stessa turbina sulla Terra che è di circa 150 KWh in un mese. Questo risultato è conforme a quanto detto in precedenza, poichè a causa della bassissima densità atmosferica media marziana che è circa 100 volte più piccola di quella terrestre, anche l'energia ricavata sulla superficie marziana è nettamente più piccola.

Capitolo 4

Conclusioni e sviluppi futuri

Al termine di questo studio di fattibilità si è potuto constatare che il vento sulla superficie di Marte è sempre presente, con intensità variabile e che in condizioni medie si avvicina a quello terrestre, anche in assenza di forti sistemi ventosi come tempeste. La potenza estratta da un ipotetico rotore eolico posto su una zona pianeggiante della superficie marziana è piuttosto bassa per via della densità media del pianeta che risulta essere circa 100 volte più piccola di quella terrestre. Ciò nonostante, si potrebbe pensare di proseguire lo studio svolgendo delle simulazioni CFD per costruire delle curve $C_p - TSR$ sperimentali per poter ricavare delle prestazioni più veritiere svincolandosi dalle ipotesi fatte in precedenza, cercando di ottimizzare le prestazioni e mitigare così problematiche legate al bassissimo numero di Reynolds. Quanto detto si potrebbe effettuare attraverso l'uso di particolari profili alari opportunamente progettati per bassi numeri di Reynolds. I vantaggi dell'uso dell'eolico sul pianeta rosso potrebbero essere innanzitutto legati alla sua fruibilità continua durante l'intera giornata inclusa la fase di eclissi. Questo risulterebbe estremamente utile a livello di supporto energetico ai pannelli solari in futuro, poichè questi ultimi possiedono lo svantaggio di ricoprirsi, col tempo, di polvere sottile che aumenta il fattore di opacità del pannello stesso facendo diminuire le loro prestazioni. Nonostante la poca potenza estraibile i rotori eolici, potrebbero essere posizionati in serie costruendo un vero e proprio parco eolico sulla superficie marziana aumentando la producibilità energetica mensile e quindi annua. E' da considerare che seppure di piccole entità le potenze coinvolte queste sono quasi sempre disponibili e con un opportuno sistema integrato di accumulo di energia, questa fonte di energia potrebbe, al fabbisogno, rendersi molto utile. Si potrebbe pensare inoltre di utilizzare questa tipologia di macchine soprattutto in zone

montuose o in zone polari in vista di missioni con touch down nei circoli polari marziani dove il sole, a causa dell'inclinazione dell'asse marziano, sarà presente ad intervalli proibitivi al semplice uso di pannelli solari. Ci si astiene nel dire che questa tecnologia, se ottimizzata, possa essere sostitutiva ai pannelli solari o agli MMRTG ma sicuramente potrebbe essere una valida opzione ad esempio per la carica di batterie disposte appositamente ad uso emergenziale nel caso di tempeste di sabbia o malfunzionamenti degli MMRTG.

Ringraziamenti

Al prof. Gaetano Iuso, il mio relatore, la persona che mi ha dato sin da subito fiducia, che va oltre il puro livello accademico. La ringrazio perchè mi ha insegnato a credere in me stesso, a portare avanti le mie idee. Mi ha aiutato ad avere passione verso questo lavoro, mi ha dato l'opportunità di toccare con mano l'ingegneria e di dirigere per più di due anni il nostro Team. Sì, dico il Nostro perchè in poco tempo il laboratorio si è trasformato da un piccolo luogo di lavoro ad un vero e proprio punto ritrovo dove abbiamo avuto l'opportunità di lavorare con entusiasmo e volontà, dove i colleghi si sono trasformati col tempo in amici.

Arriviamo a Noi. Sono passati circa sette anni da quando ho lasciato il mio paese, luogo natale e culla delle mie esperienze. Questa volta a differenza della laurea triennale vorrei ringraziare in solo colpo tutti quanti perchè genitori, mio fratello, la mia ragazza, amici e parenti possiedono un posto particolare nel mio cuore e a mio parere sono una differente forma dello stesso amore. Vi voglio dire grazie, un grazie sincero per tutto quello che avete fatto per me: per avermi spronato, aiutato, sopportato e ascoltato. Sin dall'inizio avete accettato la mia partenza e qualcuno di voi mi ha detto: "Francesco ingegneria aerospaziale a Torino, ma sei sicuro? è complicato". Bene, a distanza di sette anni ho imparato tante cose e tante ne imparerò, la vita è piena di sorprese, ma una di queste suppongo sia più importante: se segui la tua passione tutto sembrerà più semplice. Non esiste niente più complicato di qualcos'altro. Sin da piccolo ho sognato le stelle, lo spazio, studiarlo e io l'ho fatto. Studiandolo ho scoperto un'altra cosa estremamente importante: anche nella sua complessità e nel suo mistero, lo spazio è semplice e da questa semplicità è nata la vita come la conosciamo. Per questo non ho molte parole per voi, anche perchè, lo sapete, non sono un asso nel parlare e nello scrivere, ma vorrei donarvi una parola molto semplice che potrebbe raccogliere tutto l'universo in sole tre parole e che possono arrivare anche lassù: Vi voglio bene!

Codici Matlab

```
1 clear
   close all
3  clc

5  % usare filesep
   all_csv=dir( ['file_CSV_sol' filesep '*.csv']);
7  n_sol=length(all_csv);

9  for i = 1:n_sol
   full_csv_name{i} = [all_csv(i).folder filesep all_csv(i).name];
11 Sol(i)=str2num(cell2mat(extractBetween(all_csv(i).name,'calib_','_')));
   end
13
   figure
15 tiledlayout(6,5)
   %Le analisi partono da Sol50
17 for i=1:n_sol
   temp=importdata(full_csv_name{i});%prende tutti i dati del CSV in questione
19 wind_horiz{:,i}=temp.data(:,1);
   wind_dir{:,i}=temp.data(:,3);
21 Temperature{:,i}=temp.data(:,6);
   Time{:,i}=arrayfun(@(x) extractBetween(x,'T','Z'),temp.textdata(2:end,5),'UniformOutput',false);
23 temp2=cellfun(@(x) char(x),Time{:,i},'UniformOutput',false);
   temp3=datevec(cell2mat(temp2),'HH:MM:SS.FFF');
25 time{:,i}=temp3(:,4)+(temp3(:,5)/60)+(temp3(:,6)/3600);
   nexttile
27 x=time{:,i};
```

```

y=wind_horiz{:,i};
29 plot(x,y, ' . ')
    title(['Sol_' num2str(Sol(i))])
31 xlabel('Hours')
    ylabel('wind_speed [m/s]')
33 axis([0 24 0 20])
    media(i)=mean(wind_horiz{:,i}, 'omitnan');
35 end

37 figure
    tiledlayout(6,5)
39 for i=1:n_sol
    nexttile
41 x1=time{:,i};
    y1=Temperature{:,i};
43 plot(x1,y1, ' . ')
    title(['Sol_' num2str(Sol(i))])
45 xlabel('Hours')
    ylabel('Temperature [K]')
47 axis([0 24 0 290])
    media_t(i)=mean(Temperature{:,i}, 'omitnan');
49 end

51 %Average Temperature interpolation

53 figure
    xx11=Sol(1):0.001:Sol(end);
55 xx22=Sol(1):1:Sol(end);
    c1=ones(length(xx22));
57 S1=makima(Sol,media_t,xx11);
    plot(Sol,media_t, 'ob',xx11,S1, '- ')
59 hold on
    plot(xx22,mean(media_t)*c1, '-b', 'LineWidth', 2)
61 xlabel('Sol')

```

```

ylabel('Temperature_Average_[K]')
63 xlim([Sol(1) Sol(end)])
    title('Monthly_average_temperature(K)')
65

67 % PDF wind speed
    figure
69 tiledlayout(6,5)
    for i=1:n_sol
71
        % Force all inputs to be column vectors
73 local = wind_horiz(:,i);

75 % Prepare figure

77 LegHandles = []; LegText = {};

79 nexttile
    hold on;
81 % --- Plot data originally in dataset "Sol wind speed"
    [CdfF,CdfX] = ecdf(local,'Function','cdf'); % compute empirical cdf
83 BinInfo.rule = 1;
    [~,BinEdge] = internal.stats.histbins(local,[],[],BinInfo,CdfF,CdfX);
85 [BinHeight,BinCenter] = ecdfhist(CdfF,CdfX,'edges',BinEdge);
    hLine = bar(BinCenter,BinHeight,'hist');
87 set(hLine,'FaceColor','none','EdgeColor',[0.333333 0 0.666667],...
        'LineStyle','-','LineWidth',1);
89 xlabel('Data');
    ylabel('Density')
91 LegHandles(end+1) = hLine;
    LegText{end+1} = 'Sol_wind_speed_probability';
93

    % Create grid where function will be computed
95 XLim = get(gca,'XLim');

```

```

XLim = XLim + [-1 1] * 0.01 * diff(XLim);
97 XGrid = linspace(XLim(1),XLim(2),100);

99
% --- Create fit "Normal distribution"
101
% Fit this distribution to get parameter values
103 % To use parameter estimates from the original fit:
%      pd1 = ProbDistUnivParam('normal',[ 5.46243503214, 1.942761569589])
105 pd1 = fitdist(local, 'normal');
YPlot = pdf(pd1,XGrid);
107
hLine = plot(XGrid,YPlot,'Color',[1 0 0],...
109 'LineStyle','-', 'LineWidth',2,...
'Marker','none', 'MarkerSize',6);
111 LegHandles(end+1) = hLine;
LegText{end+1} = 'Normal□distribution';
113
%--- Create fit 'weibull distribution'
115 pd3 = fitdist(local, 'weibull');
YPlot = pdf(pd3,XGrid);
117
hLine = plot(XGrid,YPlot,'k',...
119 'LineStyle','-', 'LineWidth',2,...
'Marker','none', 'MarkerSize',6);
121 LegHandles(end+1) = hLine;
LegText{end+1} = 'Weibull□distribution';
123
% --- Create fit "Sol PDF fitting"
125 pd2 = fitdist(local,'kernel','kernel','normal','support','unbounded');
YPlot = pdf(pd2,XGrid);
127 hLine = plot(XGrid,YPlot,'Color',[0 0 1],...
'LineStyle','-', 'LineWidth',2,...
129 'Marker','none', 'MarkerSize',6);

```

```

LegHandles(end+1) = hLine;
131 LegText{end+1} = 'Sol_PDF_fitting';
    title(['Sol_' num2str(Sol(i))])
133 axis([0 24 0 0.4])
    %Adjust figure
135 %axis([])
    box on;
137 hold off;
    end
139

141 %Average speed interpolation
    figure
143 xx1=Sol(1):0.001:Sol(end);
    xx2=Sol(1):1:Sol(end);
145 c=ones(length(xx2));
    S1=makima(Sol,media,xx1);
147 plot(Sol,media,'ob',xx1,S1,'-')
    % hold on
149 % plot(xx2,mean(media)*c,'-b','LineWidth',2)
    xlabel('Sol')
151 ylabel('Wind_Speed_Average_[m/s]')
    xlim([Sol(1) Sol(end)])
153 title('Monthly_average_wind_speed')

155 %PDF wind direction
    figure
157 tiledlayout(6,5)
    for i=1:n_sol
159
        % Force all inputs to be column vectors
161 local = wind_dir{:,i};

163 % Prepare figure

```

```

165 LegHandles = []; LegText = {};

167 nexttile
    hold on;

169 % --- Plot data originally in dataset "Sol wind direction"
    [CdfF,CdfX] = ecdf(local,'Function','cdf'); % compute empirical cdf
171 BinInfo.rule = 1;
    [~,BinEdge] = internal.stats.histbins(local,[],[],BinInfo,CdfF,CdfX);
173 [BinHeight,BinCenter] = ecdfhist(CdfF,CdfX,'edges',BinEdge);
    hLine = bar(BinCenter,BinHeight,'hist');
175 set(hLine,'FaceColor','none','EdgeColor',[0.333333 0 0.666667],...
    'LineStyle','-','LineWidth',1);
177 xlabel('Data');
    ylabel('Density')
179 LegHandles(end+1) = hLine;
    LegText{end+1} = 'Sol_wind_direction_probability';

181
    % Create grid where function will be computed
183 XLim = get(gca,'XLim');
    XLim = XLim + [-1 1] * 0.01 * diff(XLim);
185 XGrid = linspace(XLim(1),XLim(2),100);

187
    % --- Create fit "Normal distribution"

189
    % Fit this distribution to get parameter values
191 % To use parameter estimates from the original fit:
    %      pd1 = ProbDistUnivParam('normal',[ 5.46243503214, 1.942761569589])
193 pd1 = fitdist(local, 'normal');
    YPlot = pdf(pd1,XGrid);

195
    hLine = plot(XGrid,YPlot,'Color',[1 0 0],...
197 'LineStyle','-','LineWidth',2,...

```



```

    'Marker','none', 'MarkerSize',6);
199 LegHandles(end+1) = hLine;
    LegText{end+1} = 'Normal_distribution';
201
    % --- Create fit "Sol PDF fitting"
203 pd2 = fitdist(local,'kernel','kernel','normal','support','unbounded');
    YPlot = pdf(pd2,XGrid);
205 hLine = plot(XGrid,YPlot,'Color',[0 0 1],...
    'LineStyle','-', 'LineWidth',2,...
207 'Marker','none', 'MarkerSize',6);
    LegHandles(end+1) = hLine;
209 LegText{end+1} = 'PDF_fitting';
    title(['Sol_' num2str(Sol(i))])
211 axis([0 360 0 0.05])
    %Adjust figure
213 box on;
    hold off;
215 end

217
    figure
219 tiledlayout(6,5)
    for i=1:n_sol
221
        % Force all inputs to be column vectors
223 local = wind_horiz(:,i);

225 % Prepare figure
        LegHandles = []; LegText = {};
227
        nexttile
229 hold on;

231 % --- Plot data originally in dataset "wind_horiz data"

```

```

[CdfY,CdfX] = ecdf(local,'Function','cdf'); % compute empirical function
233 hLine = stairs(CdfX,CdfY,'Color',[0.333333 0 0.666667],'LineStyle','-','LineW
xlabel('Data');
235 ylabel('Cumulative▯probability')
LegHandles(end+1) = hLine;
237 LegText{end+1} = 'wind_horiz▯data';

239 % Create grid where function will be computed
XLim = get(gca,'XLim');
241 XLim = XLim + [-1 1] * 0.01 * diff(XLim);
XGrid = linspace(XLim(1),XLim(2),100);
243

245 % --- Create fit "Weibull Distribution"

247 % Fit this distribution to get parameter values
% To use parameter estimates from the original fit:
249 % pd1 = ProbDistUnivParam('weibull',[ 6.102311987066, 2.947600851491])
pd1 = fitdist(local, 'weibull');
251 YPlot = cdf(pd1,XGrid);
hLine = plot(XGrid,YPlot,'Color',[1 0 0],...
253 'LineStyle','-','LineWidth',2,...
'Marker','none','MarkerSize',6);
255 LegHandles(end+1) = hLine;
LegText{end+1} = 'Weibull▯Distribution';

257

% --- Create fit "Normal Distribution"

259

% Fit this distribution to get parameter values
% To use parameter estimates from the original fit:
261 % pd2 = ProbDistUnivParam('normal',[ 5.46243503214, 1.942761569589])
pd2 = fitdist(local, 'normal');
263 YPlot = cdf(pd2,XGrid);
hLine = plot(XGrid,YPlot,'Color',[0 0 1],...
265

```

```

'LineStyle','-', 'LineWidth',2,...
267 'Marker','none', 'MarkerSize',6);
    LegHandles(end+1) = hLine;
269 LegText{end+1} = 'Normal_Distribution';
    axis([0 24 0 1])
271 % Adjust figure
    box on;
273 hold off;

275 end

277
    %calcolo delle potenze estraibili
279 cp=0.49;
    A=10;
281 rho=0.02;
    figure
283 tiledlayout(6,5)
    for i=1:n_sol
285 nexttile
        P(:,i)=0.5*rho*A*cp*media(:,i).^3;
287 plot(media(:,i),P(:,i),'.')
        title(['Sol_' num2str(Sol(i))])
289 xlabel('wind_speed[m/s]')
        ylabel('Power[W]')
291 media_p(i)=mean(P(:,i),'omitnan');
    end

293
    figure
295 tiledlayout(6,5)
    for i=1:n_sol
297 nexttile
        P1(:,i)=0.5*rho*A*cp*wind_horiz(:,i).^3;
299 plot(wind_horiz(:,i),P1(:,i),'.')

```

```

title(['Sol_' num2str(Sol(i))])
301 xlabel('wind_speed[m/s]')
    ylabel('Power[W]')
303 end

305 %potenza media

307 figure
    xxx111=Sol(1):0.001:Sol(end);
309 xxx222=Sol(1):1:Sol(end);
    c22=ones(length(xxx222));
311 S1=makima(Sol,media_p,xxx111);
    plot(Sol,media_p,'ob',xxx111,S1,'-')
313 hold on
    plot(xxx222,mean(media_p)*c22,'-b','LineWidth',2)
315 xlabel('Sol')
    ylabel('Power[W]')
317 xlim([Sol(1) Sol(end)])
    title('Monthly average of the power')
319

    %Raynolds a monte della pala

321

    mu=1.13236e-05;
323 L=1;
    rho=0.02;

325 figure
    xxx111=Sol(1):0.001:Sol(end);
327 xxx222=Sol(1):1:Sol(end);
    Re(:,:)=L*rho*media(:,:)/mu;
329 c22=ones(length(xxx222));
    S11=makima(Sol,Re(:,:),xxx111);
331 plot(Sol,Re(:,:),'ob',xxx111,S11,'-')
    hold on
333 plot(xxx222,mean(Re(:,:))*c22,'-b','LineWidth',2)

```

```
xlabel('Sol')
335 ylabel('Re')
    xlim([Sol(1) Sol(end)])
337 title('Raynolds_number_Monthly_average')

339 % Weibul distribution
    figure
341 wind_tot=cat(1,wind_horiz{:,:});
    a= 6; % Scale factor
343 b=2; % Shape factor (zona pianeggiante)
    q1 = size(wind_tot); % No of wind measurements
345 [h1 X11] = hist(wind_tot,30); % histogram with 30 bins for clear visual
    bar(X11,h1) % Make a histogram plot
347 hold on
    w11=wblpdf(wind_tot,a,b); % Weibull
349 plot(wind_tot,w11*q1,'r.')
    [M,V] = wblstat(a,b);
351 figure
    wblplot(wind_tot)
```

Bibliografia

- [1] [https://it.wikipedia.org/wiki/Marte\(Astronomia\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Marte(Astronomia))
- [2] Donald. K. Yeomans, *ssd.jpl.nasa.gov*, 13 luglio 2006
- [3] NASA, MarsFact Sheet, su *nssdc.gsfc.nasa.gov*, 29 novembre 2007
- [4] Joseph G. O'Rourke e Jun Korenaga, "Terrestrial planet evolution in the stagnant-lid regime: Size effects and the formation of self-destabilizing crust" 14 October 2012
- [5] W. W. Payne, "The Planet Mars, in Popular Astronomy", vol. 3, The SAO/NASA Astrophysics Data System, marzo 1896, pp. 345-348.
- [6] Stuart J. Robbins, "Elemental composition of Mars atmosphere", Western Reserve University Department of Astronomy, 14 settembre 2006.
- [7] "Mars Rovers Spot Water-Clue Mineral", Frost, Clouds. *marsrovers.jpl.nasa.gov*
- [8] "MAVEN Orbit Insertion" <https://mars.nasa.gov/files/mep/MAVEN-Fact-Sheet.pdf>
- [9] *Science* "Global circulation of Mars' upper atmosphere", di M. Benna, S. W. Bougher, Y. Lee, K. J. Roeten, E. Yiğit, P. R. Mahaffy e B. M. Jakosky
- [10] "NASA (Planetary Atmospheres Node)"
<https://atmos.nmsu.edu>
- [11] "MARS Exploration Rovers"
<https://mars.nasa.gov/mer/>

[12] "MARS InSight mission"

<https://mars.nasa.gov/insight/>

[13] "MARS InSight mission"

<https://mars.nasa.gov/insight/weather/>

[14] "MARS 2020 mission Perseverance rover"

<https://mars.nasa.gov/mars2020/>

[15] *"Mars Helicopter Technology Demonstrator" J. (Bob) Balaram ,Timothy Canham ,Courtney Duncan, Matt Golombek, Håvard Fjær Grip, Wayne Johnson, Justin Maki, Amelia Quon, Ryan Stern and David Zhu*

[16] Sony Energy Devices Corporation

"Lithium Ion Rechargeable Battery Technical Information"

[17] Wikipedia

[https://en.wikipedia.org/wiki/Opportunity\(rover\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Opportunity(rover))

[18] Gasdinamica, Problemi svolti e richiami di teoria

Tab.4.1 pag.29 , G. Iuso, F., Quori Levrotto & Bella, Torino, 2000

[19] Wikipedia

<https://en.wikipedia.org/wiki/Perseverance>

[20] Wikipedia

<https://en.wikipedia.org/wiki/Insight>

[21] *"Aerodynamic performance of different airfoils for a future Mars Helicopter", di Lorenzo Bruni, Prof. Gaetano Iuso e Prof. Akira Oyama, luglio 2020, Politecnico di Torino*

[22] *Quaderni di applicazione tecnica N.13,Impianti eolici, ABB*

[23] <https://it.wikipedia.org/wiki/Opportunity>

[24] <https://www.reccom.org/il-futuro-della-colonizzazione-dello-spazio>