

# POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'informazione

Corso di Laurea in  
Ingegneria Energetica



## PULSATING HEAT PIPE: PROGETTAZIONE APPARATO SPERIMENTALE E STUDIO IN MICROGRAVITA'

Relatore: Prof. Lucio Araneo

Co-relatore: Dr. Mauro Mameli

Tesi di Laurea di: Luigi Marelli Matr. 783152

Anno Accademico 2012 - 2013



## Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutti coloro che mi hanno aiutato nella realizzazione di questa tesi di laurea e mi hanno supportato in questi cinque anni di studi universitari:

- Prof. Lucio Araneo: per avermi permesso di partecipare a questo avvincente ed appassionante lavoro, per avermi reso partecipe di ben due campagne di volo parabolico e aver dato la possibilità di provare l'esperienza più unica che rara della microgravità. Per tutte le lunghe chiacchierate durante i viaggi in auto e i numerosi insegnamenti che mi hanno mostrato come lavorare bene ed essere un tecnico d'élite.
- Dr. Mauro Mameli: per tutto il supporto scientifico e tecnico, per la grande passione che mi ha trasmesso e per tutti gli indimenticabili momenti condivisi in laboratorio e non.
- Prof. Marco Marengo e tutto il team dell'Università degli studi di Bergamo: per avermi fatto sentire "a casa" e per tutti i momenti passati insieme a ragionare sul da farsi e sulle questioni tecnico-scientifiche di questo lavoro.
- Novespace ed ESA: per rendere disponibili servizi di elevatissima qualità per la ricerca spaziale e per avermi fatto sentire anche loro "a casa".
- La mia famiglia: per avermi sempre sostenuto nei miei studi ed insegnato che la cultura è l'unica cosa che nessuno potrà mai togliermi. Grazie ai miei genitori, alle mie sorelle, ai loro mariti e a tutti i miei nipoti che rallegrano le mie giornate quando passano a trovarmi.
- Federica: per essere sempre al mio fianco e sopportarmi nei momenti di stress, per ridere alle mie tristi battute e per avere sempre le parole giuste al momento giusto
- I miei amici: per essere sempre al mio fianco, per sostenermi e farmi svagare anche nei momenti più bui e difficili.
- I miei compagni di studi: per aver condiviso con loro momenti faticosi e divertenti, per il confronto e per i momenti passati assieme a studiare e ad imparare.
- Milena Tarantino: perché senza i suoi insegnamenti alle scuole superiori non sarei mai stato così preparato.
- La musica: perché senza imbracciare le mie chitarre non sarei la persona che sono.



## Indice

1	Introduzione.....	1
1.1	Contesto e motivazione dell'esperimento.....	1
1.2	Obiettivi.....	2
1.3	Descrizione generale e campi di applicabilità delle PHP .....	2
1.4	Descrizione termodinamica e funzionamento.....	3
1.4.1	Moto del fluido .....	5
1.4.2	Diametro .....	7
1.4.3	Livello di riempimento .....	11
1.4.4	Fluido di lavoro .....	11
1.4.5	Numero di curve .....	12
1.4.6	Forza di gravità.....	14
1.4.7	Geometrie possibili .....	14
1.5	Descrizione del volo parabolico e del velivolo.....	16
1.5.1	Descrizione ambiente dell'esperimento: interno dell'aereo.....	18
1.5.2	Requisiti fisici e documento medico per poter volare.....	21
2	Descrizione e progettazione dell'apparato sperimentale.....	25
2.1	PHP test cell .....	26
2.1.1	Riempimento PHP .....	27
2.2	Apparato sperimentale .....	27
2.2.1	PHP + heat sink .....	30
2.2.2	Zona Power supply e data logger.....	32
2.2.3	Zona PC e alimentatori.....	33
2.2.4	Parte posteriore .....	33
2.3	Dimensionamento e requisiti di sicurezza imprescindibili .....	33
2.3.1	Analisi rischio .....	34
2.3.2	Riscaldamento.....	35
2.3.3	Fuoriuscita di fluido.....	38

2.3.4	Rischio elettrico.....	38
2.3.5	Conclusioni sicurezza .....	41
2.3.6	Dimensionamento strutturale .....	41
2.3.7	Ingombri e ingegnerizzazione .....	48
2.3.8	Particolare gestione spazi all'interno della gabbia PC .....	51
2.3.9	Procedura cambio orientazione.....	53
2.3.10	Cavi elettrici posizionamento.....	54
2.3.11	Piastra d'alluminio di base .....	55
2.3.12	Fissaggio alla piastra .....	56
2.3.13	Assorbimento potenza elettrica rack.....	56
2.3.14	Reperimento materiali per la costruzione del rack .....	57
2.3.15	Riflessioni logistico-amministrative e progettuali .....	59
2.4	Procedura sperimentale .....	60
2.4.1	Approfondimento sensore di gravità [24] .....	62
2.4.2	Approfondimento sensore di pressione [23] .....	63
2.4.3	Note sistema e logica di acquisizione .....	63
2.4.4	Modifiche apportate per test successivi in ipergravità.....	64
3	Prove a terra .....	67
3.1	Caratterizzazione della PHP in posizione orizzontale da 10W a 100W.....	68
3.2	PHP orizzontale da 100W a 10W .....	71
3.3	PHP verticale da 10 a 100W .....	72
3.4	Particolare attivazione transizione di fase .....	74
3.5	PHP verticale da 100W a 10W .....	75
3.6	Particolare disattivazione transizione di fase .....	76
3.7	Conclusioni prove a terra .....	77
4	58 <sup>a</sup> campagna di volo parabolico (filling ratio 50%) .....	79
4.1	Prove in volo .....	79
4.2	Primo giorno di volo parabolico, PHP in posizione verticale con potenza crescente da 40W a 90W .....	80

4.2.1	PHP verticale 40W, parabola singola .....	80
4.2.2	Serie di parabole con PHP verticale a 40W.....	82
4.2.3	Serie di parabole con PHP verticale a 90W.....	84
4.2.4	Conclusioni.....	86
4.3	Secondo giorno di volo parabolico, PHP verticale con potenza da 100W a 50W	86
4.3.1	Parabola singola con PHP verticale a 100W .....	87
4.3.2	Serie di parabole con PHP verticale a 100W.....	88
4.3.3	Serie di parabole con PHP verticale a 90W.....	90
4.3.4	Serie di parabole con PHP verticale a 80W.....	92
4.3.5	Conclusioni.....	94
4.4	Terzo giorno di volo parabolico, salita con PHP in orizzontale .....	94
4.4.1	Singola parabola con PHP orizzontale a 50W .....	94
4.4.2	Serie di parabole con PHP orizzontale a 50W.....	96
4.5	Conclusioni campagna di volo parabolico.....	98
5	Transitori di volo simulati a terra.....	101
5.1	PHP da 40W a 100W .....	101
5.1.1	PHP da 40W a 100W, confronto dei due comportamenti dinamici ....	105
5.1.2	Transitorio a terra cambiando orientazione con PHP a 40W .....	106
5.1.3	Transitorio in volo cambiando regime di gravità con PHP a 40W .....	107
5.1.4	Transitorio a terra cambiando orientazione con PHP a 90W .....	108
5.1.5	Transitorio in volo cambiando il regime gravitazionale con PHP a 90W	109
5.2	PHP da 100W a 40W, confronto tra i due comportamenti dinamici.....	110
5.2.1	Transitorio a terra cambiando orientazione con PHP a 100W .....	114
5.2.2	Transitorio in volo variando il regime gravitazionale con PHP a 100W	115
5.2.3	Transitorio a terra cambiando orientazione con PHP a 90W .....	116
5.2.4	Transitorio in volo variando il regime gravitazionale con PHP a 90W.	117
5.2.5	Transitorio a terra cambiando orientazione con PHP a 80W .....	118

5.2.6	Transitorio in volo ottenuto cambiando il campo gravitazionale con PHP a 80W	119
5.3	Conclusioni simulazioni transitori .....	119
5.4	Esaurimento transitori realizzati con cambio di orientazione .....	120
5.4.1	Esaurimento transitorio con potenza a 50W .....	122
5.4.2	Esaurimento transitorio con potenza a 70W .....	124
5.4.3	Esaurimento transitorio con potenza a 90W .....	125
5.4.4	Conclusioni .....	125
5.5	Analisi spettrali pressione .....	126
6	59 <sup>a</sup> campagna di volo parabolico (filling ratio 70%).....	127
6.1	Primo giorno di volo parabolico PHP verticale da 50W a 100W.....	127
6.1.1	PHP verticale a 50W.....	128
6.1.2	PHP verticale a 80W.....	130
6.1.3	PHP verticale a 100W.....	132
6.2	Secondo giorno di volo parabolico, PHP verticale da 100W a 50W .....	134
6.2.1	PHP verticale a 100W.....	134
6.2.2	PHP verticale a 90W.....	136
6.3	Terzo giorno di volo parabolico, diversi percorsi per arrivare a 70W.....	138
6.4	Confronti resistenze termiche .....	139
6.5	Sviluppi futuri.....	141
7	Conclusioni generali.....	143
	Bibliografia .....	147
	Appendice A (PHP verticale Q up, 50%)	
	Appendice B (PHP verticale Q down, 50%)	
	Appendice C (PHP orizzontale Q up, 50%)	
	Appendice D (transitori simulati Q up)	
	Appendice E (transitori simulati Q down)	
	Appendice F (spettri pressione e gravità)	
	Appendice G (PHP verticale Q up, 70%)	



Appendice H (PHP verticale Q down, 70%)

Appendice I (PHP verticale varie potenze, 70%)

## Lista delle figure

### Capitolo 1

Figura 1-1 Rappresentazione semplificata su un diagramma pressione-entalpia dei possibili stati termodinamici presenti all'interno della pulsating heat pipe .....	5
Figura 1-2 Schema funzionale di una PHP .....	6
Figura 1-3 Pulsating heat pipe formata da serpentino in rame .....	7
Figura 1-4 Andamento diametro massimo secondo il criterio di Garimella con accelerazione di gravità pari a 0.1g e velocità pari a 0.12 m/s .....	10
Figura 1-5 Andamento diametro massimo secondo il criterio di Bond con accelerazione di gravità pari a 0.1 m/s <sup>2</sup> .....	10
Figura 1-6 Resistenza termica delle PHP in funzione del numero di curve [16].....	13
Figura 1-7 Temperatura di innesco del moto nel serpentine di rame in funzione del numero di curve [16] .....	13
Figura 1-8 Vari esempi di geometrie possibili per le PHP dai brevetti di Ackachi [7], interessante notare la loro flessibilità. ....	15
Figura 1-9 Traiettoria e accelerazione dell'aereo in funzione del tempo durante una parabola .....	17
Figura 1-10 Traiettoria, altitudine e accelerazione dell'aereo in funzione del tempo ..	18
Figura 1-11 Suddivisione degli spazi all'interno dell'aereo.....	19
Figura 1-12 Sezione e quote della parte di aereo dedicate all'alloggiamento degli esperimenti .....	20
Figura 1-13 Interno dell'aereo senza imbottitura sul pavimento con quote delle distanze tra i binari per fisaaggio .....	20
Figura 1-14 Particolare degli attacchi per i rack ai binari, possono essere inseriti con un passo pari a 1'' .....	21

### Capitolo 2

Figura 2-1 Rack completo montato sull'aereo con dimensioni e peso.....	25
Figura 2-2 Geometria dettagliata della PHP .....	26

Figura 2-3 Raffigurazione schematic del rack con tutta la sua componentistica alla fine della sua progettazione e dimensioni della piastra .....	28
Figura 2-4 Disegno CAD del rack con PHP in posizione orizzontale.....	29
Figura 2-5 Disegno CAD del rack con PHP in posizione verticale.....	29
Figura 2-6 Disegno CAD del rack con tutte e tre le gabbie posizionate sulla piastra ....	29
Figura 2-7 PHP con relative array di alette e incavo per permetterne l'alloggiamento	30
Figura 2-8 Disegno CAD del contenitore della PHP.....	31
Figura 2-9 Disegno CAD dell'involucro della.....	31
PHP con relativo supporto verticale .....	31
Figura 2-10 Disegno CAD dell'involucro della PHP con relativo supporto orizzontale..	31
Figura 2-11 Gabbia di protezione per la PHP e tutto il suo involucro compreso di ventilatori, la lamiera forata protegge da intrusioni accidentali permettendo la circolazione dell'aria .....	32
Figura 2-12 Gabbia per proteggere alimentatore dei riscaldatori e data logger, a lato non sono presenti lamiere forate per permetterne l'accesso.....	32
Figura 2-13 Gabbia di protezione per il PC, lo spazio vuoto sotto il monitor è stato impiegato per alloggiare parte della strumentazione rimanente .....	33
Figura 2-14 Grafico rischio-danno [13] .....	35
Figura 2-15 Particolare riscaldatore nella zona di evaporazione della PHP .....	35
Figura 2-16 Termoprotettore.....	36
Figura 2-17 Schema elettrico, particolare riscaldatori e termoprotettori.....	37
Figura 2-18 Schema elettrico completo del rack .....	40
Figura 2-19 Rappresentazione schematica di un rack collegato alla relative piastra di supporto.....	42
Figura 2-20 Particolare fissaggio gabbia alla piastra d'alluminio con entrambi i sistemi citati .....	45
Figura 2-21 Particolare collegamento della gabbia alla piastra tramite bullone e profilo forato. In viola foro di fissaggio della piastra agli attacchi presenti sui binari dell'aereo assieme al distanziale .....	45
Figura 2-22 Particolare distanziale per passaggio vite che blocca la piastra ai binari dell'aereo. In questa foto è tenuto bloccato da un bullone con vite montata nel verso contrario a quello che avrebbe sull'aereo. ....	46
Figura 2-23 Calcolo lastra sostegno .....	47
Figura 2-24 Schema foro-lastra.....	47
Figura 2-25 Particolare sistema di fissaggio utilizzato per power supply e data logger	49
Figura 2-26 Particolare modifica nel retro dell'alimentatore delle resistenze .....	50
Figura 2-28 Particolare gestione spazi dietro il PC .....	52

Figura 2-29 Particolare collegamento involucro PHP, castelletto ventilatori e supporti antivibranti.....	54
Figura 2-30 Particolare fusibile all'interno dell'apposito contenitore .....	55
Figura 2-31 Particolare profili di alluminio sottostanti alla piastra per permettere il bloccaggio delle teste delle viti.....	56
Figura 2-32 Grafico rappresentante la Potenza totale assorbita dal rack in funzione della Potenza fornita ai riscaldatori .....	57
Figura 2-33 Schema logico di funzionamento del rack .....	62
Figura 2-34 Particolare del support aggiunto per sopportare il peso in ipergravità .....	65
Figura 2-35 centrifuga per test in ipergravità .....	65

### Capitolo 3

Figura 3-1 PHP in posizione verticale.....	68
Figura 3-2 PHP in posizione orizzontale.....	68
Figura 3-3 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale (salita).....	70
Figura 3-4 Pressione rilevata dal sensore nel tempo.....	70
Figura 3-5 Temperature evaporatore, condensatore, particolare attivazione transizione di fase a 20W.....	71
Figura 3-6 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale (discesa) .....	72
Figura 3-7 Pressione rilevata dal sensore nel tempo.....	72
Figura 3-8 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale (salita).....	73
Figura 3-9 Pressione rilevata dal sensore nel tempo.....	74
Figura 3-10 Temperature evaporatore, condensatore, particolare attivazione transizione di fase a 50W .....	75
Figura 3-11 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale (discesa) .....	76
Figura 3-12 Pressione rilevata dal sensore nel tempo.....	76
Figura 3-13 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo, particolare disattivazione transizione di fase a 20W .....	77

### Capitolo 4

Figura 4-1 PHP in posizione verticale.....	79
Figura 4-2 PHP in posizione orizzontale.....	79

Figura 4-3 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 40W .....	81
Figura 4-4 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	81
Figura 4-5 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 40W .....	81
Figura 4-6 Temperature all'evaporatore, condensatore e ambiente nel tempo per PHP verticale a 40W .....	83
Figura 4-7 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	83
Figura 4-8 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 40W .....	83
Figura 4-9 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 90W .....	85
Figura 4-10 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	85
Figura 4-11 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 90W .....	85
Figura 4-12 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 100W .....	87
Figura 4-13 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	87
Figura 4-14 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 100W .....	87
Figura 4-15 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 100W .....	89
Figura 4-16 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	89
Figura 4-17 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 100W .....	89
Figura 4-18 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 90W .....	91
Figura 4-19 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	91
Figura 4-20 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 90W .....	91
Figura 4-21 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 80W .....	93
Figura 4-22 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	93
Figura 4-23 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 80W .....	93
Figura 4-24 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 50W .....	95
Figura 4-25 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	95
Figura 4-26 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 50W .....	95
Figura 4-27 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 50W .....	97
Figura 4-28 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	97
Figura 4-29 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 50W .....	97

Figura 4-30 Resistenza termica equivalente nei test a terra (1-g) in verticale ed orizzontale (V-H) confrontata con quella ricavata nel terzo giorno di volo parabolico (PF-III).....	99
---	----

## Capitolo 5

Figura 5-1 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo, transitori simulati a terra.....	102
Figura 5-2 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo.....	103
Figura 5-3 Pressione rilevata dal sensore nel tempo.....	104
Figura 5-4 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 40W .....	106
Figura 5-5 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio in volo e PHP a 40W .....	107
Figura 5-6 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 90W .....	108
Figura 5-7 Temperature evaporatore, condensatore e ambiente per transitorio in volo e PHP a 90W.....	109
Figura 5-8 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo, transitori simulati a terra.....	111
Figura 5-9 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo.....	112
Figura 5-10 Pressione rilevata dal sensore nel tempo.....	113
Figura 5-11 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 100W.....	114
Figura 5-12 Temperature evaporatore, condensatore e ambiente per transitorio in volo e PHP a 100W.....	115
Figura 5-13 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 90 .....	116
Figura 5-14 Temperature evaporatore, condensatore e ambiente per transitorio in volo e PHP a 90W.....	117
Figura 5-15 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 80W.....	118
Figura 5-16 Temperature evaporatore, condensatore e ambiente per transitorio in volo e PHP a 80W.....	119
Figura 5-17 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitori lunghi .....	120
Figura 5-18 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo.....	121
Figura 5-19 Pressione rilevata dal sensore nel tempo.....	122

Figura 5-20 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente, particolare esaurimento transitorio con PHP a 50W .....	123
Figura 5-21 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente, particolare esaurimento transitorio con PHP a 70W .....	124
Figura 5-22 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente, particolare esaurimento transitorio con PHP a 90W .....	125

## Capitolo 6

Figura 6-1 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 50W .....	129
Figura 6-2 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	129
Figura 6-3 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 50W .....	129
Figura 6-4 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 80W .....	131
Figura 6-5 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	131
Figura 6-6 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 80W .....	131
Figura 6-7 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 100W .....	133
Figura 6-8 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	133
Figura 6-9 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 100W .....	133
Figura 6-10 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 100W .....	135
Figura 6-11 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	135
Figura 6-12 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 1000W .....	135
Figura 6-13 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 90W .....	137
Figura 6-14 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	137
Figura 6-15 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 90W .....	137
Figura 6-16 Resistenza termica PHP in volo a 1g e 0g con Q up .....	140
Figura 6-17 Resistenza termica PHP in volo a 1g e 0g con Q down .....	140

## Capitolo 7

Figura 7-1 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 100W durante una parabola .....	143
Figura 7-2 Resistenza termica della PHP misurata nelle prove e in microgravità con PHP in orizzontale.....	144

Figura 7-3 Resistenza termica della PHP rilevata durante le due campagne di volo parabolico a 1g e a 0g con orientazione verticale .....	145
Figura 7-4 Resistenza termica della PHP rilevata durante le due campagne di volo parabolico a 1g e a 0g con orientazione verticale .....	145

## Appendice A

Figura 1 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 50W .....	1
Figura 2 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo.....	1
Figura 3 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 50W.....	1
Figura 4 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 60W .....	3
Figura 5 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo... ..	3
Figura 6 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 60W.....	3
Figura 7 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 70W.....	5
Figura 8 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo.....	5
Figura 9 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 70W.....	5
Figura 10 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo, particolare uscita terza parabola.....	6
Figura 11 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo, particolare uscita terza parabola.....	6
Figura 12 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 80W.....	8
Figura 13 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	8
Figura 14 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 80W.....	8

## Appendice B

Figura 1 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 70W .....	2
Figura 2 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	2
Figura 3 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 70W.....	2
Figura 4 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 60W .....	4
Figura 5 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	4
Figura 6 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 60W.....	4

Figura 7 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 50W .....	5
Figura 8 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	5
Figura 9 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 50W.....	5

## Appendice C

Figura 1 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 60W .....	2
Figura 2 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	2
Figura 3 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 60W.....	2
Figura 4 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 70W .....	3
Figura 5 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	3
Figura 6 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 70W.....	3
Figura 7 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 80W .....	4
Figura 8 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	4
Figura 9 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 80W.....	4
Figura 10 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 90W .....	5
Figura 11 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	5
Figura 12 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 90W.....	5
Figura 13 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 100W .....	7
Figura 14 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	7
Figura 15 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 100W.....	7

## Appendice D

Figura 1 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 50W .....	1
Figura 2 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio in volo e PHP a 50W .....	2
Figura 3 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 60W .....	3
Figura 4 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio in volo e PHP a 60W .....	4



Figura 5 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 70W .....	5
Figura 6 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio in volo e PHP a 70W .....	6
Figura 7 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 80W .....	7
Figura 8 Temperature evaporatore, condensatore e ambiente per transitorio in volo e PHP a 80W .....	8

## Appendice E

Figura 1 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 70W .....	1
Figura 2 Temperature evaporatore, condensatore e ambiente per transitorio in volo e PHP a 70W .....	2
Figura 3 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 60W .....	3
Figura 4 Temperature evaporatore, condensatore e ambiente per transitorio in volo e PHP a 60W .....	4
Figura 5 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 50W .....	5

## Appendice F

Figura 1 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 40W .....	1
Figura 2 Spettro pressione per PHP a 40W .....	2
Figura 3 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 50W .....	3
Figura 4 Spettro pressione per PHP a 50W .....	4
Figura 5 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 60W .....	5
Figura 6 Spettro pressione per PHP a 60W .....	6
Figura 7 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 70W .....	7
Figura 8 Spettro pressione per PHP a 70W .....	8
Figura 9 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 80W .....	9
Figura 10 Spettro pressione per PHP a 80W .....	10
Figura 11 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 90W .....	11
Figura 12 Spettro pressione per PHP a 80W .....	12
Figura 13 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 50W .....	13
Figura 14 Spettro pressione per PHP a 50W .....	14
Figura 15 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 60W .....	15

Figura 16 Spettro pressione per PHP a 60W .....	16
Figura 17 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 70W .....	17
Figura 18 Spettro pressione per PHP a 70W .....	18
Figura 19 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 80W .....	19
Figura 20 Spettro pressione per PHP a 80W .....	20
Figura 21 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 90W .....	21
Figura 22 Spettro pressione per PHP a 90W .....	22
Figura 23 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 100W .....	23
Figura 24 Spettro pressione per PHP a 100W .....	24

## Appendice G

Figura 1 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 60W .....	1
Figura 2 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	1
Figura 3 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 60W .....	1
Figura 4 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 70W .....	2
Figura 5 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	2
Figura 6 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 70W .....	2
Figura 7 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 90W .....	3
Figura 8 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	3
Figura 9 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 90W .....	3

## Appendice H

Figura 1 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 80W .....	1
Figura 2 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	1
Figura 3 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 80W .....	1
Figura 4 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 70W .....	2
Figura 5 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	2
Figura 6 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 70W .....	2
Figura 7 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 60W .....	3
Figura 8 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	3
Figura 9 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 60W .....	3

Figura 10 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 50W .....	4
Figura 11 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo .....	4
Figura 12 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 50W.....	4

## Appendice I

Figura 1 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 70W.....	1
Figura 2 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo.....	1
Figura 3 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 70W.....	1
Figura 4 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 100W.....	2
Figura 5 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo.....	2
Figura 6 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 100W.....	2
Figura 7 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 70W.....	3
Figura 8 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo.....	3
Figura 9 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 70W.....	3
Figura 10 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 40W.....	4
Figura 11 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo.....	4
Figura 12 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 40W.....	4
Figura 13 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 70W.....	5
Figura 14 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo.....	5
Figura 15 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 70W.....	5



## Abstract

In questo lavoro di tesi vengono descritti i test svolti su una pulsating heat pipe (PHP) a terra e in condizioni di microgravità. Per effettuare questo genere di prove si è reso necessario progettare un particolare apparato sperimentale in modo da poter partecipare alle campagne di volo parabolico (in questo caso due). All'interno di questo elaborato sono descritti tutti i passaggi che hanno portato alla realizzazione di tale apparato (rack), che sono volti a rispettare elevati standard di sicurezza di tipo aeronautico. A livello scientifico è presente un'analisi sperimentale della pulsating heat pipe. I dati raccolti in volo durante la prima campagna vengono confrontati con quelli registrati dalle prove a terra; successivamente, nella seconda campagna, la PHP è testata con lo stesso apparato ma con una diversa percentuale di riempimento. I risultati ottenuti portano delle nuove e interessanti informazioni riguardo l'influenza della gravità sul comportamento termico della PHP. Tutti i suggerimenti tecnici riportati nella parte sulla realizzazione del rack, forniscono interessanti spunti sulle metodologie di lavoro da seguire per produrre apparati sperimentali di elevata qualità.



# 1 Introduzione

## 1.1 Contesto e motivazione dell'esperimento

I grandi progressi dell'elettronica negli ultimi 30 anni stanno portando ad incrementare sempre di più le prestazioni delle apparecchiature sviluppate, con esse però crescono anche i flussi termici da dissipare per poter mantenere le temperature di lavoro entro dei campi accettabili e non compromettere la funzionalità dei sistemi. Queste necessità indirizzano la ricerca verso un continuo studio e sviluppo di sistemi sempre più sofisticati per dissipare il calore in eccesso. Tra le varie tecnologie studiate grande rilevanza è occupata dagli heat pipes, in italiano tubi di calore, i quali sfruttano la transizione di fase liquido-vapore per asportare grandi quantità di energia grazie all'effetto del passaggio di fase e ai moti convettivi. Questi ultimi si instaurano per via della formazione di una fase con massa volumica decisamente differente dall'altra e sono possibili grazie alla presenza di un campo di forze, tipicamente quello gravitazionale. Dagli anni '90 circa parte dell'attività di ricerca in questo campo si è anche indirizzata verso un sistema denominato "pulsating heat pipe" (PHP). Questo sistema a tubi di calore è composto da un serpentino di rame con le due estremità collegate o no, il cui principio di funzionamento si basa sull'instabilità del moto del fluido all'interno del serpentino: quando si innesca l'ebollizione il sistema raggiunge uno pseudo stato stazionario governato dall'instabilità. Proprio a causa dell'instabilità non si è ancora riusciti a formulare un modello teorico che sia in grado di descriverne in maniera efficace il principio di funzionamento. La strada che si è percorsa, e che si sta percorrendo tutt'ora, è quindi quella dell'investigazione sperimentale. Si è notato che tra i vari parametri analizzati che influenzano il comportamento e le prestazioni della pulsating heat pipe è presente l'inclinazione del vettore gravità rispetto ai tubi, per questo è possibile intuire che il campo gravitazionale in generale possa avere un qualche effetto sul funzionamento di questo dispositivo. Prima d'ora mai era stata testata una pulsating heat pipe, nelle configurazioni descritte in questo elaborato, in assenza di gravità per studiarne il funzionamento e ricavare dei parametri utili per consentirne eventualmente il dimensionamento a fini aerospaziali.

## 1.2 Obiettivi

Gli obiettivi che ci si è proposti di raggiungere sono quelli di una maggiore comprensione del funzionamento della pulsating heat pipe e delle sue reazioni a vari campi di gravità in modo da poter determinare delle correlazioni che possano essere utili per un suo corretto dimensionamento. Principalmente si vuole verificare che in un ampio campo di condizioni operative una pulsating heat pipe abbia le stesse prestazioni termiche in assenza di gravità come a terra posizionata in orizzontale. Ci si è anche prefissati di verificare il comportamento nelle situazioni di transitorio, confrontando i dati raccolti nel passaggio ad una situazione di assenza di gravità con una sua simulazione realizzata a terra. Grazie alle campagne di volo parabolico organizzate da Novespace, è possibile testare esperimenti in condizioni di microgravità su un aereo che compie particolari manovre. Per fare ciò è necessario progettare un apparato sperimentale con peculiari caratteristiche in modo da consentire lo svolgimento dell'attività sperimentale, rispettando le normative di sicurezza e prevenendo ogni eventuale danno minimizzando i rischi dovuti alle attività svolte. La qualità, la praticità e la versatilità sono le prime caratteristiche che l'apparato dovrebbe rispettare.

## 1.3 Descrizione generale e campi di applicabilità delle PHP

La "Pulsating heat pipe" (d'ora innanzi chiamata con l'acronimo PHP) è un sistema di scambio termico bifase passivo rientrante nella categoria dei tubi di calore. Il funzionamento è garantito dall'ebollizione di un fluido al suo interno che asporta calore dalla zona di evaporazione. Le prestazioni sono garantite dall'interazione di tre fenomeni fisici:

- Cambiamento di fase
- Forze di capillarità
- Forza di gravità

L'insieme sopra indicato provoca circolazione/oscillazione del fluido all'interno del tubo di rame, favorendo l'asportazione del calore grazie al cambiamento di fase che ottimizza l'operazione sfruttando l'entalpia di evaporazione del fluido. La PHP può essere utilizzata in innumerevoli campi, la sua vocazione principe è, tuttavia, la dissipazione di calore da una fonte che necessita di non superare una massima temperatura di funzionamento per non incorrere in gravi danni da surriscaldamento e rimanere compromessa nel funzionamento. Le esigenze



tecnico-economiche degli ultimi tempi si stanno facendo sempre più stringenti per ciò che riguarda l'affidabilità, la semplicità di produzione e il costo dei dispositivi da utilizzare nelle varie applicazioni; un sistema come quello qui analizzato risponde molto bene alle richieste sopra elencate. Le PHP, a differenza dei tradizionali tubi di calore, non necessita all'interno del sistema di un materiale che permetta il ritorno di liquido condensato per capillarità nella zona di evaporazione. I materiali porosi attualmente utilizzati sono molto delicati, spesso durante la fase produttiva tendono a rompersi: si ha quindi una perdita del prodotto ancora prima della messa in opera. Non essendo presenti parti meccaniche in movimento e materiali particolari, possiamo affermare senza remore che un sistema di questo tipo, senza materiali per far ritornare il liquido, si presta molto bene ad applicazioni dove sono richieste peculiari capacità di robustezza ed affidabilità. Come già detto, il raffreddamento di componentistica elettronica sembra esserne il terreno naturale di utilizzo, oppure in campo aerospaziale o automobilistico dove si possono riscontrare elevate variazioni di accelerazioni in più direzioni. Sarebbero possibili anche altre applicazioni nel campo del raffreddamento in generale e del recupero di calore. Il punto di forza delle PHP è proprio la capacità di asportare grandi quantità di calore con superfici ridotte sfruttando proprio l'entalpia di evaporazione della transizione di fase. Il limite principale è però l'incapacità di mantenere isoterma la superficie da raffreddare: il continuo passaggio di fase liquida e vapore nelle zone di interesse porta continue oscillazioni nel campo di temperatura.

#### **1.4 Descrizione termodinamica e funzionamento**

Il fluido utilizzato (Fc-72 [28]) è un refrigerante per applicazioni a bassa pressione, infatti la pressione di saturazione a temperatura ambiente è 0.234 bar. Una volta raggiunte le condizioni di saturazione si ha nella zona di evaporazione la transizione di fase. Essendo presente un'alternanza delle fasi liquido e vapore, la formazione di quest'ultimo nella parte più calda tenderà a pompare il liquido presente nella zona di condensazione nei canali a fianco e viceversa. Si genera un meccanismo fortemente instabile che asporta calore dalla zona di evaporazione; nello stesso tempo all'interno del condensatore, tramite un altro sistema di dissipazione (nel nostro caso un array di alette con dei ventilatori), il calore viene evacuato dal fluido. Quest'ultimo torna alla fase liquida ed è di nuovo spinto nella parte calda del sistema. Questo tipo di comportamento è però molto complicato da studiare a livello teorico; non è ancora presente un modello esaustivo, il miglior metodo per studiare questi

fenomeni è al momento l'investigazione sperimentale. Non è possibile descrivere il comportamento del sistema tramite un unico stato termodinamico: il gradiente termico tra evaporatore e condensatore porta infatti il sistema ad assumere un grande numero di punti di non equilibrio. La situazione è allora caratterizzata da una continua serie di oscillazioni che dipendono dalla quantità di fluido nel sistema e dal flusso termico. All'interno della PHP è presente alternanza di fase liquido e vapore, per permetterne il corretto funzionamento si deve mantenere questa discontinuità e la consistenza di tappi di liquido che possono scorrere nel tubo liberamente. All'aumentare dei flussi termici il moto tende a diventare anulare o semi-anulare: un film di liquido si forma sulla parete e il vapore può muoversi nella parte centrale del tubo, di conseguenza il pompaggio del liquido perde efficacia e le prestazioni termiche peggiorano. Sempre all'aumentare della potenza fornita all'evaporatore si può arrivare, all'innescarsi dell'ebollizione nucleata, al cosiddetto "dry-out", ossia nella parte calda rimane solo vapore che ostruisce il ritorno del liquido dal condensatore sfavorendo la trasmissione del calore; si dirà che la PHP è andata in crisi termica. Immaginando di trovarci in una situazione in cui la PHP si trovi a temperatura costante in condizioni di saturazione, possiamo assumere che il vapore in fase di formazione si trovi nel punto A del diagramma in figura 1. Tuttavia, a causa del continuo afflusso di calore, il vapore tende a spostarsi verso il punto B dato che, grazie all'apporto energetico, aumentano pressione e temperatura muovendosi su un'isocora. Esso può anche venire a contatto col condensato, il quale tenderà a raffreddarlo asportando energia e portandolo verso il punto C del diagramma: temperatura e pressione saranno in diminuzione. A tutto questo va inoltre aggiunto il contributo di altre fluttuazioni dovute al fatto che il sistema studiato è reale e non puramente ideale come sopra supposto da questa analisi semplificativa proposta da Karimi e Culham [13]

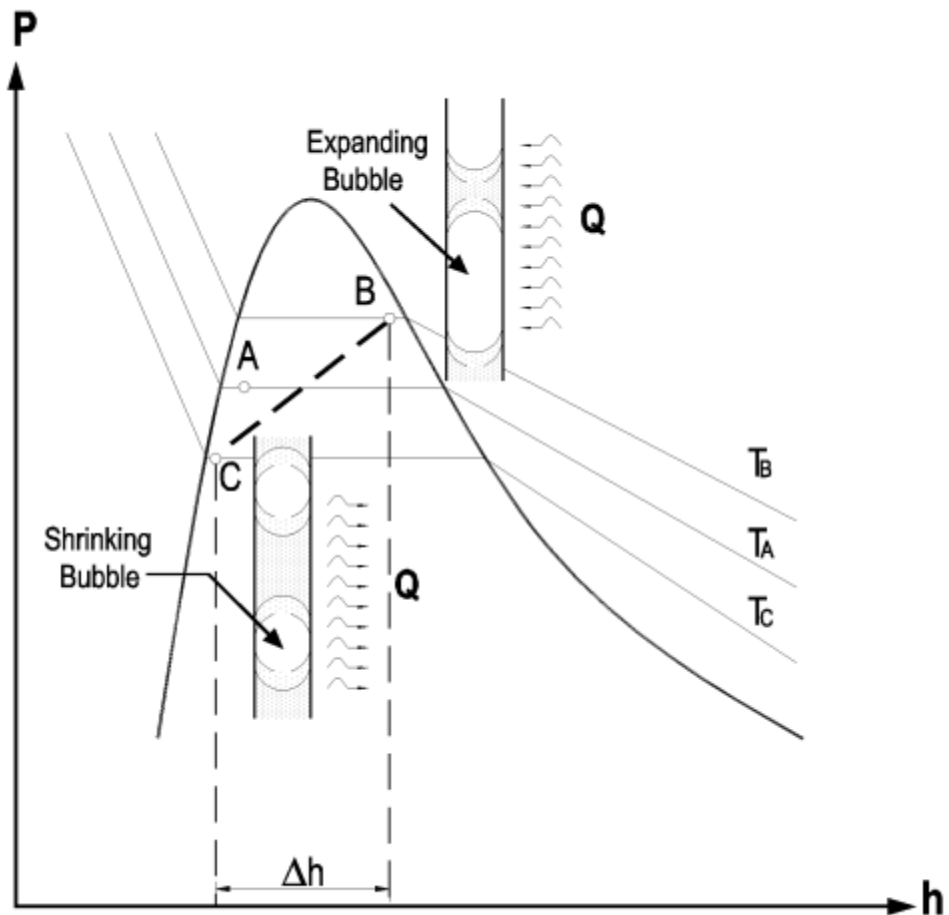


Figura 1-1 Rappresentazione semplificata su un diagramma pressione-entalpia dei possibili stati termodinamici presenti all'interno della pulsating heat pipe

### 1.4.1 Moto del fluido

La circolazione di fluido nel condotto è garantita dall'espansione del fluido provocata dalla transizione di fase. L'aumento di massa volumica provocato dalla formazione della fase vapore crea un aumento di pressione locale che quindi permette di vincere gli attriti fluidodinamici. In secondo luogo la forza di gravità provoca convezione naturale favorendo la salita delle bolle di vapore e la ridiscesa del liquido. La pressione capillare  $\Delta P_c$  ha anch'essa un ruolo fondamentale. Questa differenza di pressione si forma grazie alla diversa curvatura del menisco provocata dalla polarizzazione delle molecole. Diverse curvature in varie zone del serpentino di rame contribuiscono alla circolazione

del fluido, sebbene in quantità decisamente minori rispetto agli altri due termini appena descritti. Il contributo di questo fenomeno risulta essere inferiore di circa due ordini di grandezza. Essa ha tuttavia la peculiare funzione di permettere la formazioni di strutture coerenti di liquido che generano un'alternanza delle due fasi: senza questa condizione non sarebbe possibile instaurare un regime di moto a tappi. Inoltre bisogna considerare tutti i numerosi contributi alle oscillazioni provocate dalle innumerevoli instabilità all'interno del sistema, che non sono ricavabili per via teorica in maniera efficace. Per permettere in ogni caso al fluido di muoversi grazie ai numerosi contributi appena descritti, è necessario lavorare sulla costruzione del dispositivo rispettando vari criteri geometrici e termodinamici. Si può così garantire un importante ruolo a tutte le forze in gioco e favorire l'instabilità.

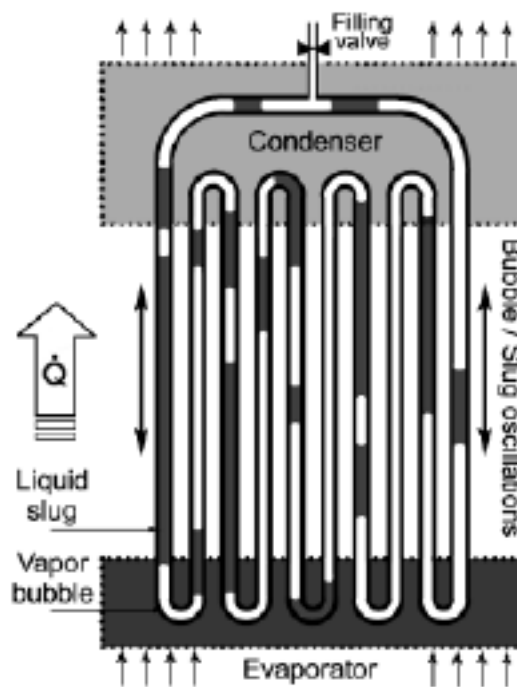


Figura 1-2 Schema funzionale di una PHP

La PHP analizzata è composta da una serpentina in rame di diametro esterno pari a 2mm e interno di 1.1mm con le due estremità collegate e 16 curve, al suo interno è parzialmente riempita da un fluido, nel nostro caso il refrigerante FC72 ( $C_6F_{14}$ ) [28], esso si trova quindi in fase liquida e vapore. Tutto ciò è stato realizzato grazie ad una complessa procedura di degasamento sul fluido e di svuotamento della PHP fino a una pressione di 0.01 Pa; questo processo è fondamentale affinché il fluido si trovi in condizioni di saturazione a temperatura ambiente. All'interno del nostro sistema si possono distinguere

due importanti aree: la zona di evaporazione nella parte bassa e quella di condensazione formata da tutta l'area rimanente. La prima delle due è direttamente a contatto coi riscaldatori mentre la seconda è accoppiata ad un sistema di dissipazione (nel nostro caso un array di alette).



Figura 1-3 Pulsating heat pipe formata da serpentina in rame

### 1.4.2 Diametro

Il diametro della serpentina deve essere di dimensioni tali da poter permettere alle forze di capillarità di giocare una parte rilevante, grazie ad esse è infatti favorito il trasporto di fluido all'interno del condotto. Qualora le dimensioni non permettano alla capillarità di agire significativamente si avrebbe un diverso tipo di sistema che funziona solo grazie all'ausilio della forza gravitazionale detto "termosyphon". Il criterio presentato da Kew-Cornwell[16], usato anche da Akachi et al. [8], calcola un diametro limite al di sopra del quale le forze di capillarità non hanno più un impatto significativo vanificando il meccanismo principale di trasporto delle PHP. Questo criterio (per brevità chiamato criterio di Bond) ha validità in condizioni statiche: definisce la condizione limite per la quale si può formare una struttura coerente di liquido nel canale senza che si rompa il menisco per via della forza di gravità, provocando stratificazione delle diverse fasi in funzione delle masse volumiche. Esso può essere ricavato da un bilancio di forze considerando forza peso e capillarità, introducendo il gruppo adimensionale  $Bo$ , numero di Bond:

$$Bo = \frac{g D^2 (\rho_l - \rho_v)}{\sigma} [-]$$

Equazione 1-1 Numero di Bond

Con:

- $g$  accelerazione di gravità [ $m/s^2$ ]
- $D$  diametro [m]
- $\rho_l$  massa volumica del fluido in fase liquida [ $kg/m^3$ ]
- $\rho_v$  massa volumica del fluido in fase vapore [ $kg/m^3$ ]
- $\sigma$  tensione superficiale [N/m]

Essendo il criterio verificato per  $Bo < 4$  si ricava che il diametro  $D_{max}$  massimo ammissibile è:

$$D_{max} = 2 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} [m]$$

Equazione 1-2 Diametro massimo ammissibile secondo il criterio di Bond

Con:

- $\sigma$  tensione superficiale [N/m]
- $g$  accelerazione di gravità [ $m/s^2$ ]
- $\rho_l$  massa volumica del fluido in fase liquida [ $kg/m^3$ ]
- $\rho_v$  massa volumica del fluido in fase vapore [ $kg/m^3$ ]

Ricordando che la PHP utilizzata da noi ha un diametro interno pari a 1.1mm ed utilizza come fluido il refrigerante FC72, note le proprietà del fluido refrigerante, il criterio di Bond viene rispettato a terra fino a quando la temperatura del fluido raggiunge i 110°C.

Un altro interessante criterio simile a questo è stato ricavato più recentemente da Harichian e Garimella [14] che considera gli effetti delle forze di inerzia e viscosità:

$$Ga = \sqrt{Bo} \times Re_l \leq 160 [-]$$

Equazione 1-3 Numero di Garimella

$$d_{Ga} \leq \sqrt{\frac{160\mu_l}{\rho_l U_l}} \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_l - \rho_v) \cdot g}} \quad [\text{m}]$$

Equazione 1-4 Diametro massimo ammissibile secondo criterio di Garimella

Con:

- $Re_l$  numero di Reynolds riferito alla fase liquida [-]
- $Bo$  numero di Bond [-]
- $\mu_l$  viscosità del fluido in fase liquida [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]
- $U_l$  velocità liquido [ $\text{m/s}$ ]
- $\sigma$  tensione superficiale [ $\text{N/m}$ ]
- $\rho_l$  massa volumica del fluido in fase liquida [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $\rho_v$  massa volumica del fluido in fase vapore [ $\text{kg/m}^3$ ]
- $g$  accelerazione di gravità [ $\text{m/s}^2$ ]

Esso rimane valido nel caso analizzato per un intervallo di temperature inferiori a circa  $90^\circ\text{C}$ . Entrambi i criteri hanno però un difetto: derivano da un bilancio tra forze di capillarità e gravità, non possono essere applicati in contesti in cui la gravità non sia presente o comunque trascurabile. È comunque utile individuare dei primi diametri limite da poter utilizzare in microgravità inserendo all'interno di essi un valore molto basso di  $g$  pari a  $0.1 \text{ m/s}^2$ , valore medio di accelerazione che si ottiene durante i voli parabolici, e supponendo una velocità del fluido pari a  $0.12 \text{ m/s}$  come rilevato dalle analisi visive di Gu et al [10-11].

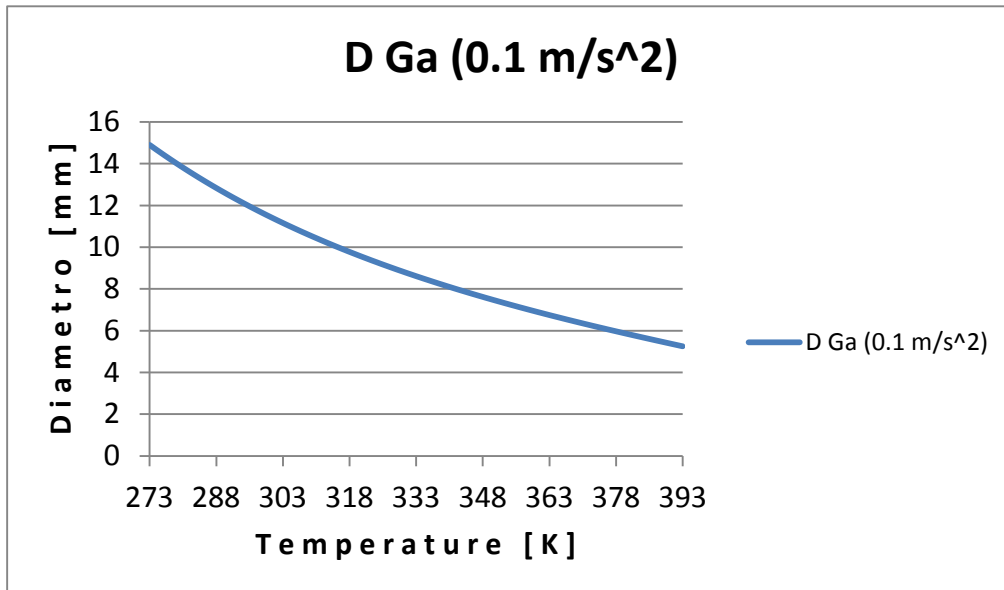


Figura 1-4 Andamento diametro massimo secondo il criterio di Garimella con accelerazione di gravità pari a 0.1g e velocità pari a 0.12 m/s

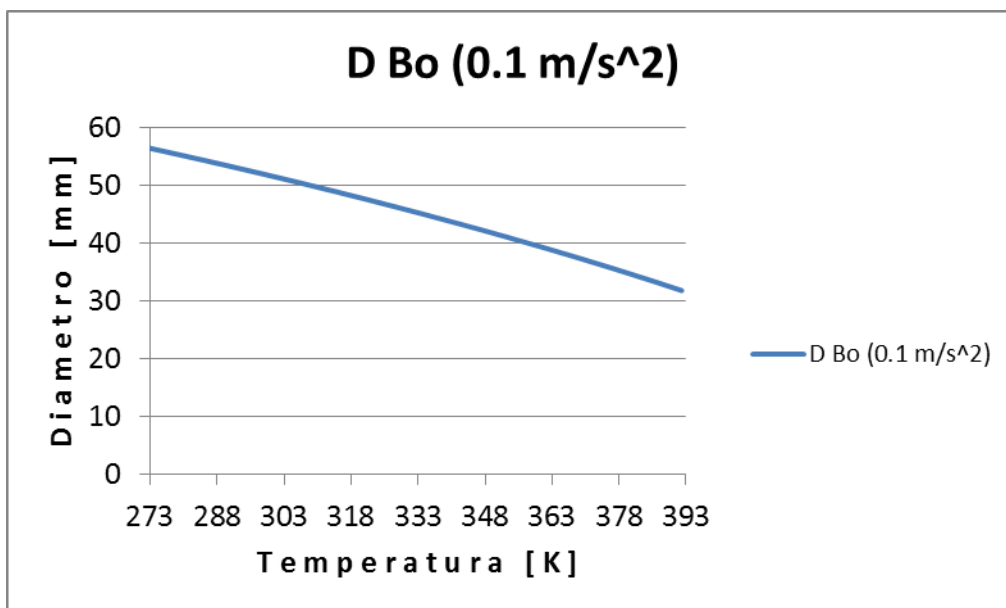


Figura 1-5 Andamento diametro massimo secondo il criterio di Bond con accelerazione di gravità pari a 0.1 m/s<sup>2</sup>



Possiamo supporre con una certa sicurezza che al di sotto del diametro limite il moto sia “a tappi”, cioè composto da un’alternanza di fase liquida e vapore. Vicino a questo limite iniziano a registrarsi dei comportamenti differenti. Come possiamo verificare dai grafici di questo capitolo, i diametri limite in condizioni di microgravità sono molto grandi rispetto ai valori con  $g$  pari a  $9.81 \text{ m/s}^2$ : è quindi necessario pensare in futuro a dei criteri più adatti.

### **1.4.3 Livello di riempimento**

Altri test sul rapporto di riempimento svolti da Khandekar et al. [15] portano alla determinazione della quantità ottima di fluido da inserire nel serpentino. Un rapporto di riempimento pari al 100% (tutto il volume occupato da liquido) conduce il sistema a funzionare come un termosiphon monofase. La circolazione è allora favorita dalle variazioni di massa volumica provocata dalla temperatura, ma senza portare ad alcuna transizione di fase. Un rapporto di riempimento pari allo 0% (assenza di fluido) riduce il sistema a funzionare come puramente conduttivo (sfrutterebbe la sola conduzione longitudinale delle pareti di fluido). I due estremi considerati conducono comunque a una situazione con prestazioni peggiori rispetto a quelle ottenute dal rapporto ottimo di riempimento. Secondo gli studi in letteratura tale valore di ottimo può variare dal 20% all’80% in funzione del fluido utilizzato. Nelle due situazioni analizzate in questo elaborato sono presenti un rapporto di riempimento pari al 50% nella prima campagna di volo parabolico per poi passare successivamente al 70%.

### **1.4.4 Fluido di lavoro**

In letteratura sono presenti numerosi studi del comportamento delle PHP in funzione del fluido di lavoro utilizzato. Generalmente è saggio usare sostanze che lavorino bene in una banda di temperature comprese tra  $50\text{-}150^\circ\text{C}$ . Le prestazioni variano in funzione della tensione di vapore, del calore latente, della viscosità e della conduttività dello stesso. In particolare la viscosità provoca delle variazioni negli sforzi tangenziali e quindi nelle perdite di carico, le altre proprietà portano al cambiamento delle sue prestazioni termiche. Nel caso in analisi, come già anticipato, il fluido utilizzato è il refrigerante FC72 ( $\text{C}_6\text{F}_{14}$ ). Chiaramente la variazione di alcune caratteristiche può dare differenti risultati, importante è la viscosità per quanto riguarda l’attrito, la tensione superficiale per la transizione di fase e l’angolo di bagnabilità, formato tra

fluido e superficie, per quanto concerne la capillarità. Essendo il fluido un termovettore è buona norma assicurarsi che esso abbia un'elevata entalpia di evaorazione per poter massimizzare l'effetto dovuto alla transizione di fase ed un'elevata conduttività termica.

#### 1.4.5 Numero di curve

Per permettere alla PHP di innescare l'instabilità è necessario che la geometria con cui viene realizzata preveda un numero minimo di curve. In letteratura, secondo gli studi di Charoensawan and Terdtoon [16], sono necessarie almeno 5 curve per far funzionare il dispositivo. Secondo il sopracitato articolo l'attivazione avviene a temperature dell'evaporatore tanto più basse quanto più alto è il numero di curve presenti nella geometria; inoltre più aumenta la temperatura all'evaporatore e più aumenta il diametro, più diminuisce il numero critico di curve che servono all'attivazione. Nel caso in oggetto, per garantire un buon funzionamento, sono state previste 16 curve in modo da favorire il più possibile l'instabilità del fluido nel serpentino di rame e non avere problemi di innesco dovuti ad una geometria sfavorevole. Generalmente all'aumentare del numero di curve si ha una lieve diminuzione della resistenza termica della PHP, per un numero di curve inferiore a 5 nessuna PHP testata da Charoensawan and Terdtoon [16] ha iniziato a funzionare, la loro resistenza termica era molto alta e tendente a infinito, non era permessa l'oscillazione e/o la circolazione del fluido all'interno del serpentino di rame. È comunque importante sottolineare che tutti i test svolti da Charoensawan and Terdtoon [16] prendono in considerazione solo PHP posizionate in orizzontale e quindi in layout non favorevole per il funzionamento. Per quanto riguarda i fluidi, sempre in questo articolo, sono stati analizzati acqua ed etanolo, entrambi in PHP con diametri interni pari 1mm e 2mm e con diverse lunghezze dell'evaporatore, parametro equivalente alla variazione di potenze termiche fornite al fluido. Possiamo infatti calcolare il flusso termico areico radiale  $q''$  come:

$$q'' = \frac{q}{2n\pi D_i L_e} \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Equazione 1-5 Flusso termico areico al riscaldatore

Con:

- $q$ : potenza fornita dai riscaldatori [W]
- $n$ : numero di curve [-]

- $D_i$ : diametro interno [m]
- $L_e$ : lunghezza evaporatore [m]

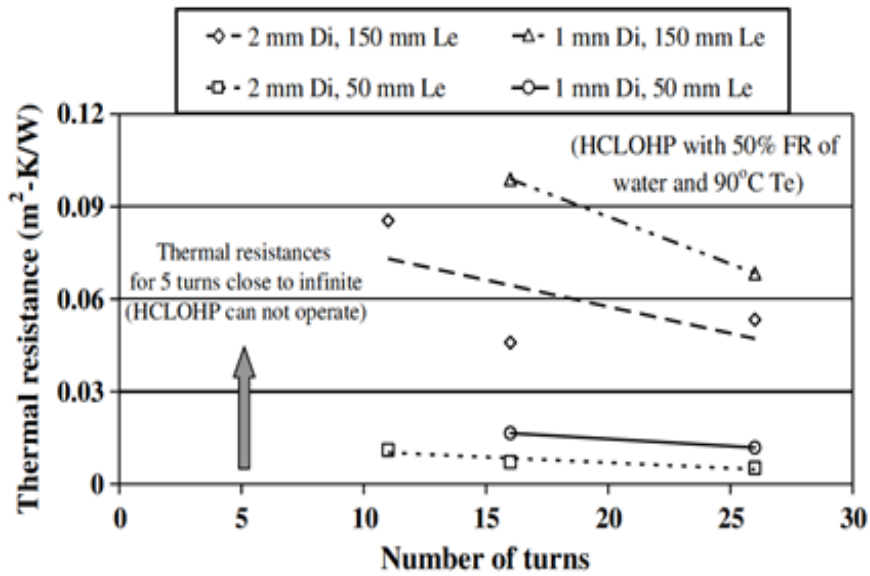


Figura 1-6 Resistenza termica delle PHP in funzione del numero di curve [16]

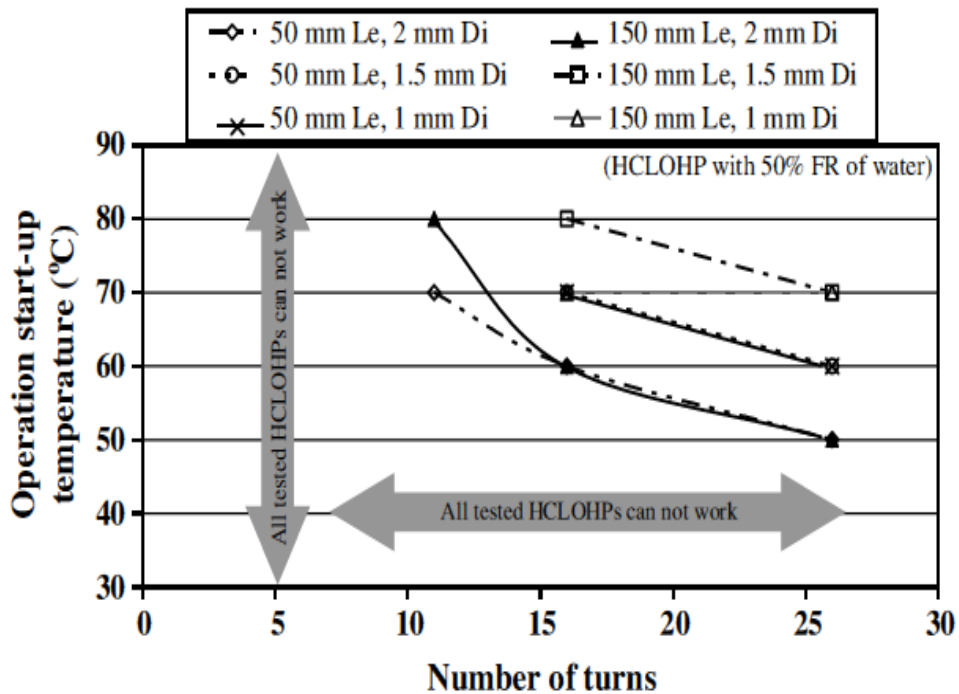


Figura 1-7 Temperatura di innesco del moto nel serpentine di rame in funzione del numero di curve [16]

#### **1.4.6 Forza di gravità**

È nota da precedenti esperienze l'influenza del vettore gravità sulla PHP, sebbene l'effetto di tale campo di forza sia ancora argomento da investigare ampiamente, le diverse inclinazioni dei sistemi rispetto al vettore gravità modificano le prestazioni di scambio termico del sistema come investigato recentemente da Mameli et al [6-12-9]. In passato è già stata testata una PHP in microgravità in un volo parabolico da Gu et al. [10-11], ma con una geometria diversa rispetto a quella presa ora in considerazione in questo elaborato; in ogni caso il dispositivo descritto da Gu sembra comportarsi meglio in condizioni di microgravità. Quest'ultimo è però orientato in partenza nella maniera più sfavorevole possibile: evaporatore in alto e condensatore in basso. Nel nostro caso si ottengono risultati completamente diversi partendo da un'orientazione verticale con evaporatore nella parte bassa e condensatore in alto; lo scambio termico è ampiamente favorito dalla forza di gravità: il condensato a maggior massa volumica tende infatti a precipitare in basso mentre le bolle di vapore si muovono più facilmente per convezione naturale rispetto a una situazione in cui l'accelerazione di gravità non sia presente e tutto il moto sia a carico della pressione di capillarità.

#### **1.4.7 Geometrie possibili**

Sono anche stati testati vari tipi di geometria che comunque rispettino i limiti per permettere alle forze di capillarità di agire, ad esempio geometrie a "spaghetti" o serpentine a sviluppo tridimensionale. Importante, quando si parla di geometria, è il collegamento tra le due estremità che può essere presente o assente: se si collegano i due estremi della serpentina il fluido oltre ad oscillare può anche ricircolare. La discreta libertà di scelta tra le varie geometrie è un grandissimo vantaggio che possiede questa tecnologia per poter minimizzare gli ingombri ed ottimizzare la dissipazione del calore anche tramite meccanismi ausiliari che possono essere distanti dalla fonte di calore. Alcuni esempi interessanti arrivano dai brevetti di Akachi [7]:

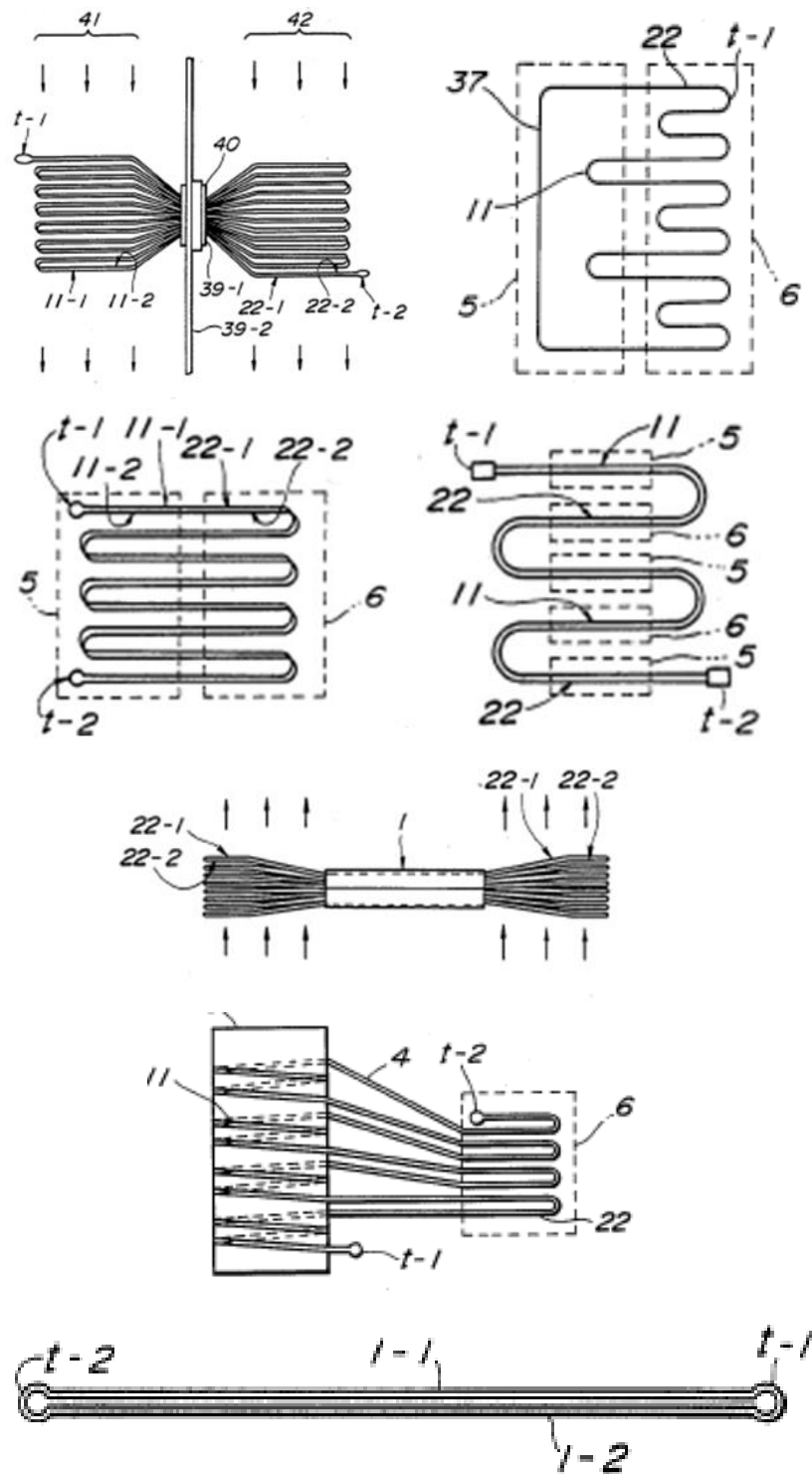


Figura 1-8 Vari esempi di geometrie possibili per le PHP dai brevetti di Ackachi [7], interessante notare la loro flessibilità.

## 1.5 Descrizione del volo parabolico e del velivolo

Uno dei metodi per poter ricreare condizioni di assenza di peso, per un tempo apprezzabile e con tutta la strumentazione, è quello di sfruttare delle particolari manovre svolte da un aereo, per questo vengono organizzate in Europa da Novespace, in collaborazione con ESA, campagne di volo parabolico a bordo di un Airbus A300.

La manovra eseguita dal pilota non è delle più semplici, si deve infatti garantire massima pulizia nell'esecuzione per avere una microgravità ottimale. Partendo da una situazione di volo orizzontale la manovra consiste di questi tre passaggi ciascuno della durata di circa 20s:

- cabrata fino al raggiungimento di un angolo di inclinazione pari a  $47^\circ$ , in questo tratto della manovra si raggiunge un'accelerazione pari a circa 1.8g. E' quindi possibile osservare anche il comportamento di esperimenti in condizioni di ipergravità.
- Picchiata e contemporanea progressiva diminuzione della spinta dei motori fino al minimo possibile portando quindi l'aereo in una situazione di caduta libera che descrive appunto una traiettoria parabolica. In questa fase l'abitacolo dell'aereo si trova in assenza di peso essendo appunto in caduta libera e su un sistema di riferimento inerziale.
- Una volta raggiunta un'inclinazione di  $47^\circ$  verso il basso l'aereo ritorna a cabrare per portarsi di nuovo in posizione orizzontale. Anche in questa fase l'accelerazione di gravità è pari a 1.8g.

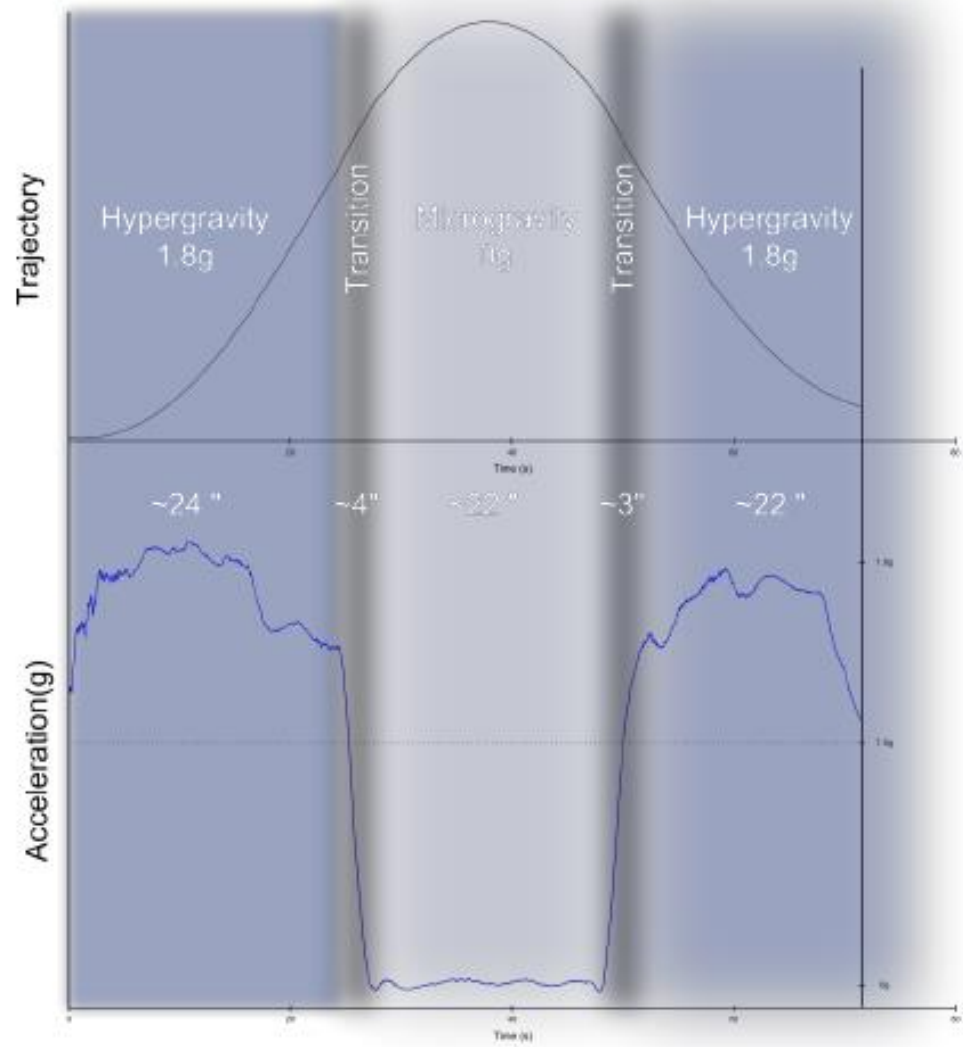


Figura 1-9 Traiettorie e accelerazioni dell'aereo in funzione del tempo durante una parabola

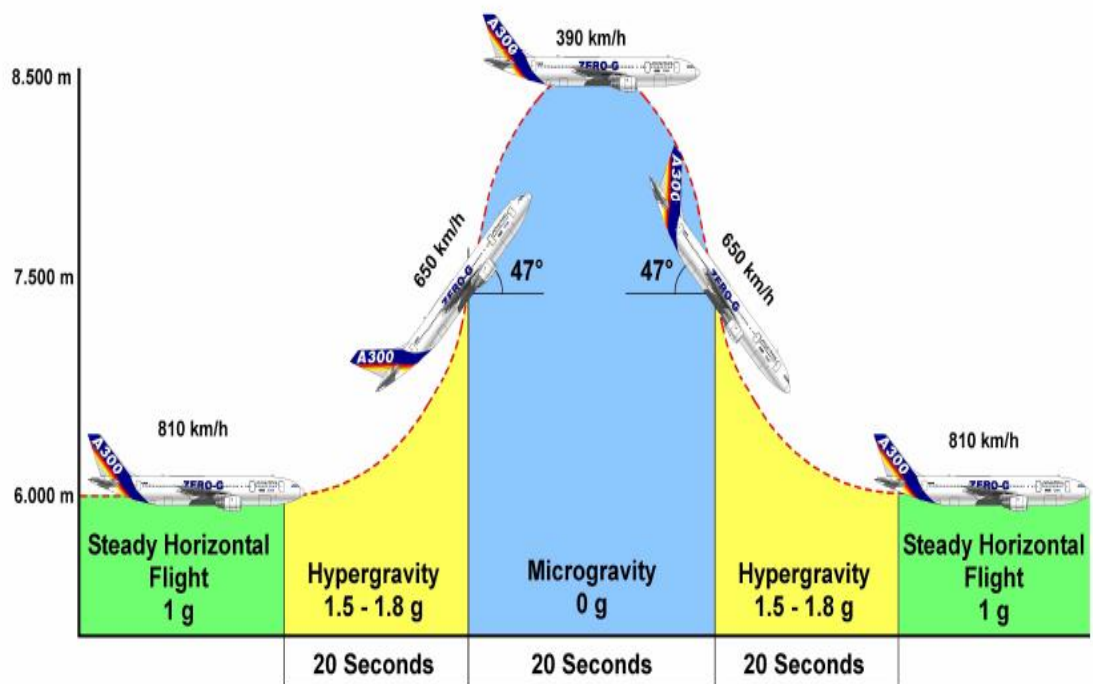


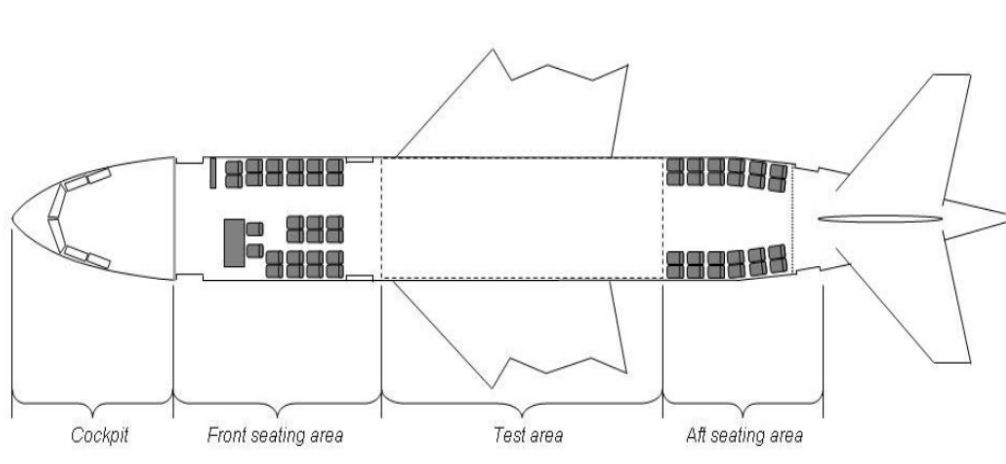
Figura 1-10 Traiettoria, altitudine e accelerazione dell'aereo in funzione del tempo

### 1.5.1 Descrizione ambiente dell'esperimento: interno dell'aereo

L'interno dell'aereo, a parte la cabina di pilotaggio, è suddivisa in tre parti:

- Una zona anteriore con sedili per permettere agli operatori di rimanere seduti durante decollo e atterraggio.
- Una parte centrale imbottita di pannelli protettivi e con gli appositi binari per permettere il posizionamento degli esperimenti e il lavoro di acquisizione dati.
- Una parte posteriore sempre destinata a sedili per operatori durante le fasi di decollo e atterraggio.





**Figura 1-11 Suddivisione degli spazi all'interno dell'aereo**

L'ambiente all'interno dell'aereo si trova mediamente, durante il volo, a una temperatura di 18°C e a una pressione di 800 kPa. Chiaramente queste condizioni al contorno fornite da Novespace sono molto approssimative, si può infatti constatare dalle prove sperimentali che la temperatura all'interno dell'aereo è più alta e comunque piuttosto variabile.

Importante è osservare la disposizione dei binari per i sedili sui quali è possibile collegare i rack: sui binari sono installati dei piedini per imbullonare le strutture che possono avere un passo pari a 1". I rack devono essere vincolati o tramite una piastra d'alluminio o tramite delle fasce da collegare ai binari sulle quali non appoggia l'intera struttura, ma solo parte del perimetro di base. Per esperimenti con attrezzature di dimensioni ridotte è comunque consigliabile una piastra come quella da noi utilizzata. La progettazione delle strutture per contenere gli esperimenti deve rispettare criteri di sicurezza molto rigidi. All'interno del manuale Rules and Guidelines fornito da Novespace [13] sono presenti numerose regole per minimizzare i rischi di avere danni, dato che, a bordo di un aereo, qualsiasi incidente risulterebbe ampiamente amplificato.

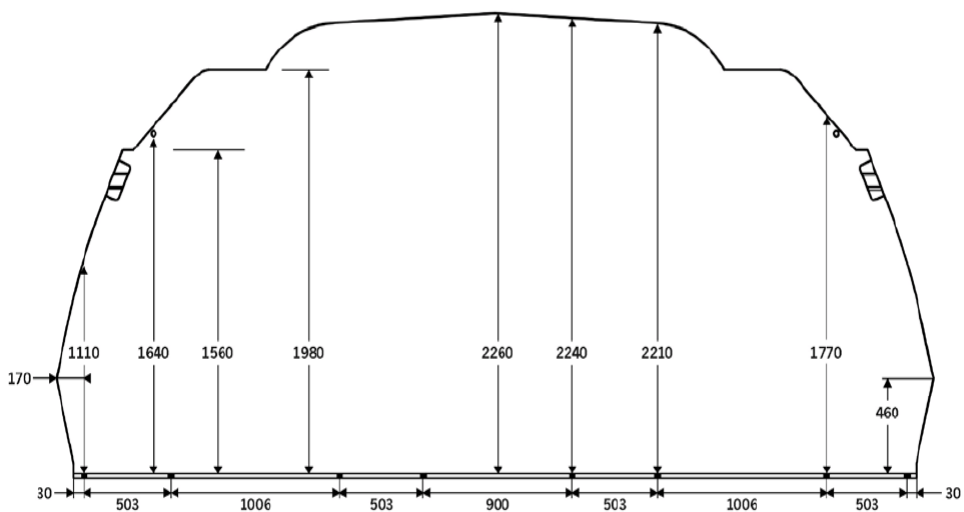


Figura 1-12 Sezione e quote della parte di aereo dedicate all'alloggiamento degli esperimenti

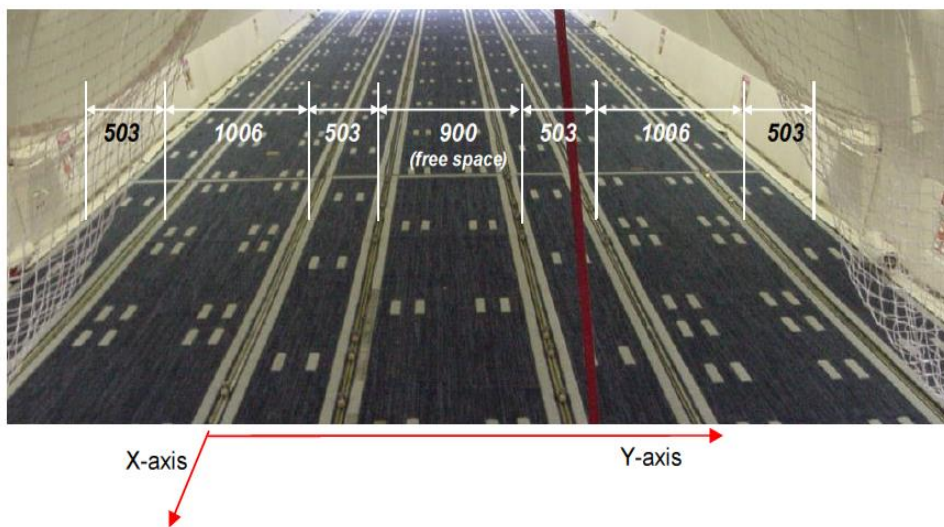


Figura 1-13 Interno dell'aereo senza imbottitura sul pavimento con quote delle distanze tra i binari per fisaaggio



Figura 1-14 Particolare degli attacchi per i rack ai binari, possono essere inseriti con un passo pari a 1''

### 1.5.2 Requisiti fisici e documento medico per poter volare

Per poter partecipare alla campagna di volo parabolico i partecipanti ai voli devono necessariamente sottoporsi ad approfondite visite mediche affinché possa essere verificata la loro buona salute. Un'attività come questa ha, come qualsiasi tipo di operazione umana, un certo livello di rischio per l'incolumità degli operatori che vi partecipano. In una campagna di un volo parabolico nessuno è mai rimasto gravemente compromesso, tuttavia capita a circa il 10% dei passeggeri di rimanere eccessivamente stressati dai continui cambi di accelerazione e quindi di riscontrare in maniera più o meno acuta gli stessi sintomi che si presentano assieme al mal di mare e al mal d'auto per via di un'elevata stimolazione dei labirinti nell'orecchio interno. Durante la fase di ipergravità l'attività cardiaca aumenta anche del 70%, innalzando così il rischio di problemi cardiovascolari; anche la respirazione è più difficoltosa, per questo è consigliato di rimanere sdraiati durante questa fase della manovra in modo da minimizzare gli stimoli. L'istruzione principale da seguire è comunque quella di non muovere assolutamente la testa durante le fasi di ipergravità per evitare di stimolare ulteriormente i labirinti già parecchio stressati. Nelle fasi di microgravità il rischio principale è quello di urtare accidentalmente persone o cose, per questo la cabina dell'aereo è completamente rivestita di pannelli protettivi e sono presenti ovunque cinghie per aggrapparsi e vincolarsi correttamente. Sebbene possa sembrare strano una delle principali cause di problemi è dovuta all'eccessivo divertimento, la peculiare sensazione dell'assenza di gravità può galvanizzare facilmente e portare ad ignorare le regole da rispettare per la propria sicurezza e quella degli altri. Ad ogni modo è presente a bordo un medico con tutti i dispositivi necessari per gestire un'emergenza medica in modo da tutelare la salute degli operatori. I casi in cui un candidato non sia idoneo al volo o richiedano esami più approfonditi sono

quelli che presentano un o più dei problemi sotto elencati e riportati nel documento medico di Novespace [17].

Problemi cardiaci:

- Infarto
- Malfunzionamenti delle arterie coronaria
- Battiti cardiaci irregolari
- Cardiogramma irregolare
- Problemi di pressione alta non ben controllati
- Esecuzione di un bypass nei sei mesi precedenti al volo
- Problemi alle valvole atriali e ventricolari
- Recente cambiamento della cura per controllare la pressione alta

Problemi polmonari:

- Deficienze respiratorie
- Asma
- Pneumotorace

Problemi endocrinologi:

- Diabete di tipo 1 o 2 che richiede l'iniezione di insulina

Problemi reumatologici:

- Deficienze nelle capacità di movimento
- Fragilità ossea
- Problemi alle ossa o alle articolazioni che possono accentuarsi nei casi di cadute

Problemi oftalmologici

- Gravi miopie o problemi di vista che possono compromettere un'urgente evacuazione

Problemi psichiatrici

- Psicosi
- Attacchi d'ansia
- Attacchi di panico

- Claustrofobia
- Paura di volare
- Paura dell'altezza

Problemi neurologici:

- Attacchi epilettici
- Malattie neurologiche in generale
- Ictus
- Attacchi di emicrania

Problemi gastrointestinali:

- Ulcera
- Gravi ernie
- Riflussi acidi non curati o curati ma persistenti

Varie:

- Recenti operazioni chirurgiche (3 mesi prima del volo)
- Disabilità fisiche o mentali che possano compromettere un'eventuale evacuazione
- Alcolismo o consumo di droghe
- Donne gravide
- Utilizzo di medicine con importanti effetti collaterali



## 2 Descrizione e progettazione dell'apparato sperimentale

Per poter imbarcare un esperimento sull' Airbus A300 di Novespace e poterlo quindi testare in microgravità in tutta sicurezza, è necessario progettare un "rack", cioè una struttura che lo contenga. Ovviamente tutta la strumentazione necessaria per il corretto svolgimento dell'attività sperimentale deve essere fissata in maniera corretta e garantire resistenza strutturale: in casi di emergenza gli impianti elettrici, termici o in pressione devono soddisfare elevati standard di sicurezza. Il rack dell'esperimento utilizzato è stato realizzato dovendo rispettare limiti di peso ed ingombro imposti da Novespace ed ogni attività è stata messa in sicurezza utilizzando le norme imposte nella guida fornita "Rules and Guidelines"[13] che impone standard di sicurezza di tipo aeronautico

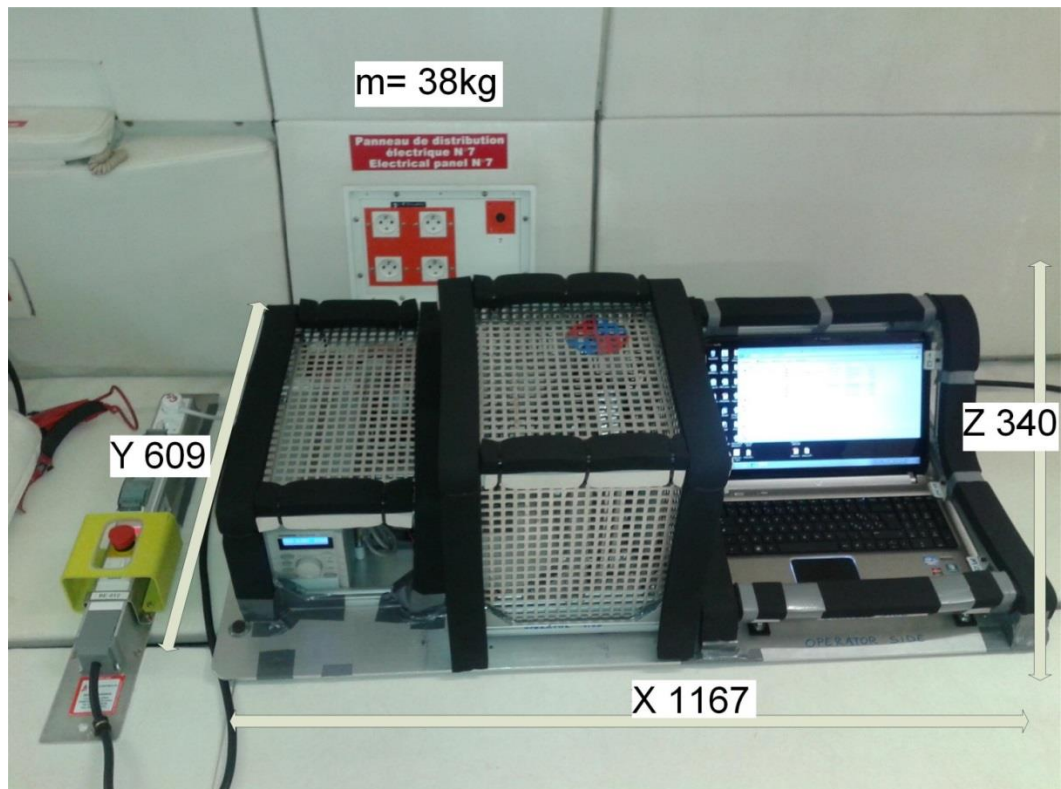


Figura 2-1 Rack completo montato sull'aereo con dimensioni e peso.

## 2.1 PHP test cell

Il cuore dell'esperienza è composto dalla PHP realizzata con un serpentino di rame di diametro interno pari a 1.1mm e diametro esterno 2mm, parzialmente riempito con del refrigerante FC-72 [28]. Le due estremità sono collegate per permettere la ricircolazione del fluido oltre all'oscillazione. Nella figura sotto vengono rappresentati tutti i particolari geometrici compresa la disposizione delle termocoppie, il posizionamento del sensore di pressione e dell'ingresso usato per il riempimento.

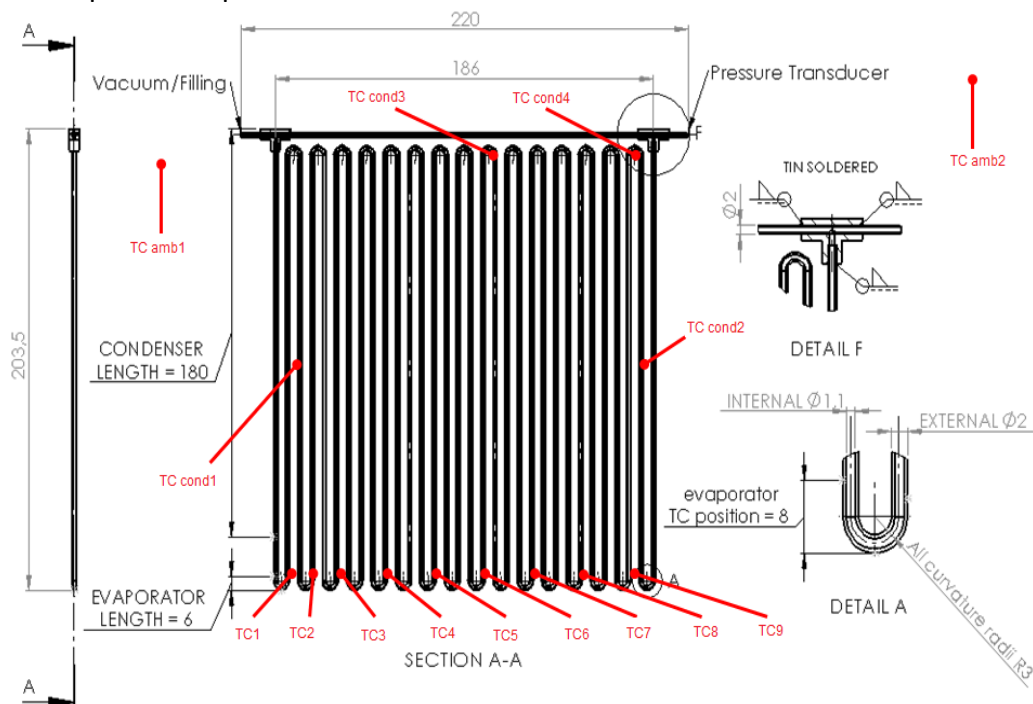


Figura 2-2 Geometria dettagliata della PHP

La parte bassa, come anticipato all'interno del capitolo 1.4.1, è la zona di evaporazione e sono presenti le termocoppie denominate da TC1 a TC9. Essa è racchiusa da due coperchi realizzati in PEEK (Polietereterchetone) [19], un materiale plastico resistente alle alte temperature, in modo da isolare la zona calda e permettere al calore prodotto dalle resistenze di essere trasmesso integralmente al serpentino di rame. Le termocoppie TC\_cond1 e TC\_cond2 misurano la temperatura del condensatore circa a metà della lunghezza dei tubi, TC\_cond3 e TC\_cond4 nella parte alta. Non sono presenti zone adiabatiche, il condensatore è racchiuso tra una piastra di alluminio e un array di alette per smaltire il calore in arrivo dai riscaldatori. Nella parte alta della



PHP sono presenti l'ingresso per il sensore di pressione e quello per il riempimento. Il sensore di pressione rileva la pressione in un solo punto del condensatore che però non è rappresentativa di tutto il sistema per via del non equilibrio intrinseco presente all'interno della PHP. TC\_amb1 misura la temperatura ambiente in aspirazione ai ventilatori, TC\_amb2 la temperatura dell'aria in espulsione.

### 2.1.1 Riempimento PHP

Un'ardua problematica è rappresentata dal riempimento della PHP. Prima di tutto si è creato un vuoto molto spinto al suo interno dato che la presenza di incondensati nel serpentino avrebbe portato a problemi di funzionamento. Si sono raggiunte pressioni dell'ordine di  $1 \cdot 10^{-6}$  bar grazie a una pompa da vuoto di tipo turbo molecolare. Una volta inserito il refrigerante si è presentato il problema della chiusura a tenuta del tubo di rame. Alla fine la questione è stata risolta chiudendo l'ingresso che è servito per riempirlo tramite una crimpatrice che, grazie alla grande pressione provocata, ha creato un'unione a tenuta dei due lembi di materiale.

## 2.2 Apparato sperimentale

Per permettere all'esperimento di funzionare sono necessarie le seguenti apparecchiature:

- riscaldatori formati da quattro resistenze in parallelo resistenze: Thermocoax Single core 1Nc Ac, 0.5 mm external diameter [19]
- alimentatore delle resistenze (power supply, Ps): GW Instek 3610A [20]
- quattro ventilatori: ebmpapst 8412N/2GH-214 [21]
- alimentatore dei ventilatori GBC 34.0110.60 [22]
- termocoppie di tipi "T" cioè rame-costantina
- Sensore di pressione: Kulite, ETL/T 312, 1.2bar A [23]
- Sensore di gravità: Dimension Engineering DE-ACCM3D [24]
- data logger (DI): NI-cRIO-9073, NI-9214 [25]
- alimentatore per data logger GBC 34.0110.65 [26]
- PC HP Pavillon con software Labview per controllo e acquisizione
- Alimentatore PC acquistato assieme al PC
- Multipresa commerciale GBC 22.0576.05 [27]

Tutta questa componentistica necessita di essere saldamente ancorata per sopportare le variazioni di accelerazione durante il volo rispettando criteri di sicurezza, vincoli di spazio e peso. Le strutture sono composte da profili di alluminio assemblabili prodotti e certificati da Item [29]. Il dimensionamento delle strutture è realizzato permettendo loro di sopportare un'accelerazione pari a 9g nelle direzioni X e Y dell'aereo nel caso in cui quest'ultimo si trovasse a dover effettuare un atterraggio di emergenza. Essendo il nostro esperimento una riserva da far volare qualora altri rack fossero incompleti o impossibilitati, il dimensionamento a 9g è realizzato lungo i due assi X e Y dell'aereo poiché non era nota l'orientazione con cui sarebbe stato fissato ai supporti. A seguito di queste richieste è stato necessario ancorare saldamente tutti i componenti ad una piastra di alluminio e proteggerli con delle gabbie per evitare urti accidentali : il controllo dei movimenti delle persone e degli oggetti durante un volo parabolico è, infatti, piuttosto complesso e anche gli operatori più esperti possono trovarsi momentaneamente in fluttuazioni ingestibili. Tutte le strutture sono poi imbottite appunto per evitare infortuni agli sperimentatori presenti sull'aereo.

La disposizione sulla piastra di alluminio dei vari componenti è la seguente:

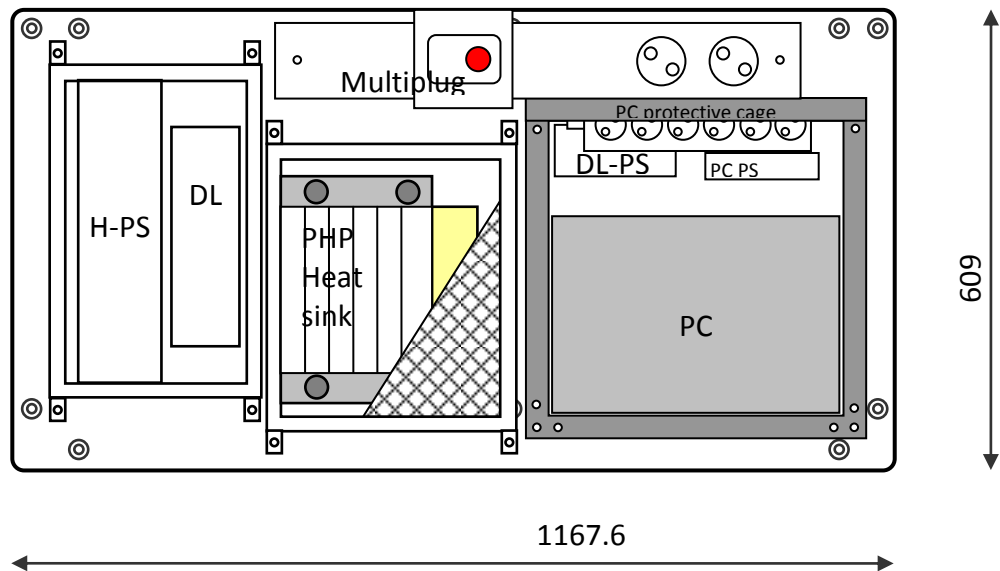


Figura 2-3 Raffigurazione schematic del rack con tutta la sua componentistica alla fine della sua progettazione e dimensioni della piastra

L'obiettivo è stato quello di minimizzare gli ingombri e quindi il peso.

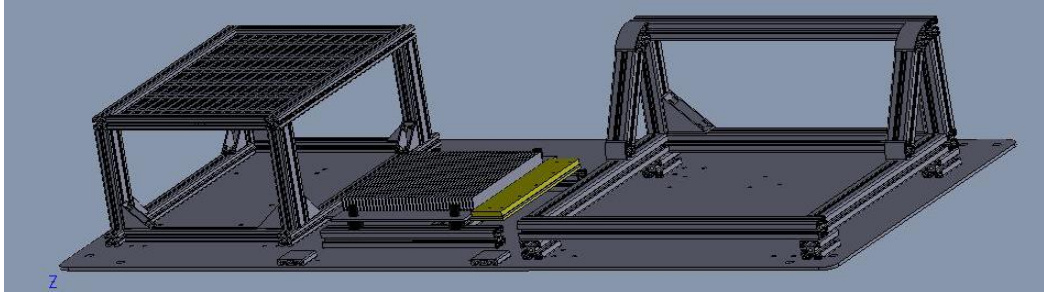


Figura 2-4 Disegno CAD del rack con PHP in posizione orizzontale

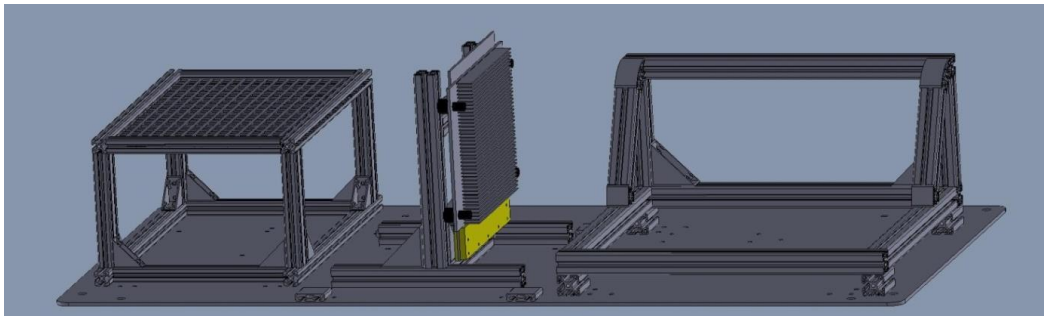


Figura 2-5 Disegno CAD del rack con PHP in posizione verticale

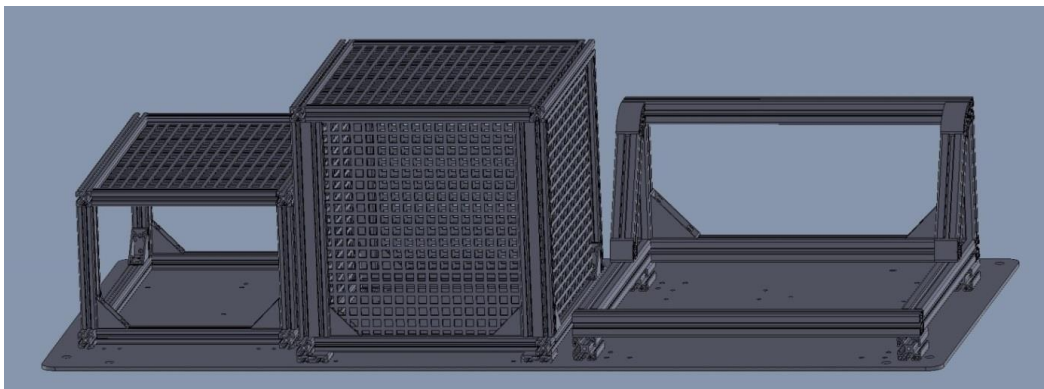


Figura 2-6 Disegno CAD del rack con tutte e tre le gabbie posizionate sulla piastra

### 2.2.1 PHP + heat sink

La parte principale dell'esperimento è composto dalla PHP, nella parte bassa (evaporatore) essa è riscaldata tramite delle resistenze elettriche; sempre in questa zona sono anche presenti nove termocoppie per monitorare le temperature nella zona di evaporazione. Tutta la restante parte del serpentino di rame è zona di condensazione. La PHP stessa è incorporata tra due piastre di alluminio, una delle quali ha sopra un array di alette. La parte interna del serpentino di rame è anche messa in collegamento con un sensore di pressione per misurare la pressione del sistema nella parte alta. La zona delle resistenze è chiusa, invece, tra due strati di PEEK [18], cioè plastica resistente alle alte temperature per isolare la zona calda dell'esperimento ed evitare scottature in caso di contatto accidentale. All'interno di questa plastica sono anche inseriti dei termoprotettori [30] collegati in serie con l'alimentatore, tarati in modo da aprire il circuito e quindi interrompere il riscaldamento qualora si dovessero superare i 140°C nella zona più calda. L'alloggiamento della PHP è collegato all'apposito supporto tramite dei giunti antivibranti. Sulla struttura contenente la PHP è posizionato un sensore di gravità per rilevare le variazioni di accelerazione del sistema e le vibrazioni presenti provocate, soprattutto, dai ventilatori.

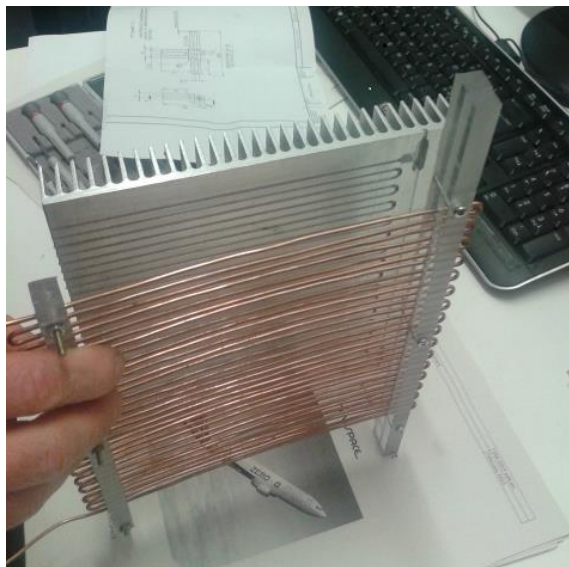


Figura 2-7 PHP con relative array di alette e incavo per permetterne l'alloggiamento

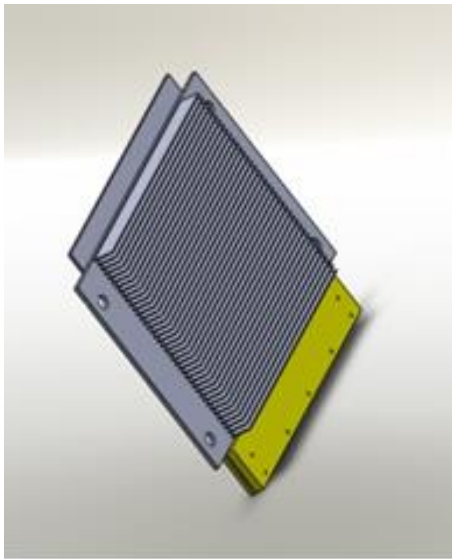


Figura 2-8 Disegno CAD del contenitore della PHP

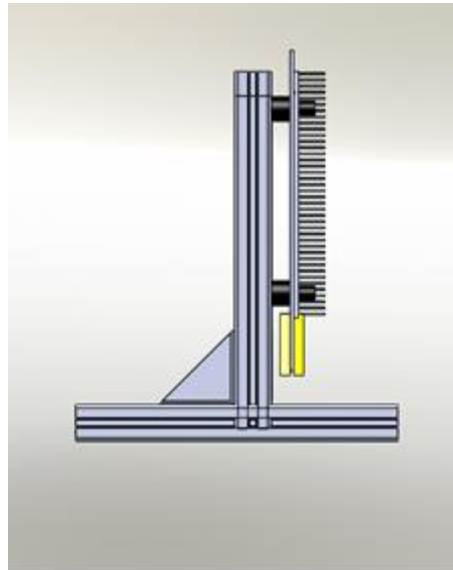


Figura 2-9 Disegno CAD dell'involucro della PHP con relativo supporto verticale

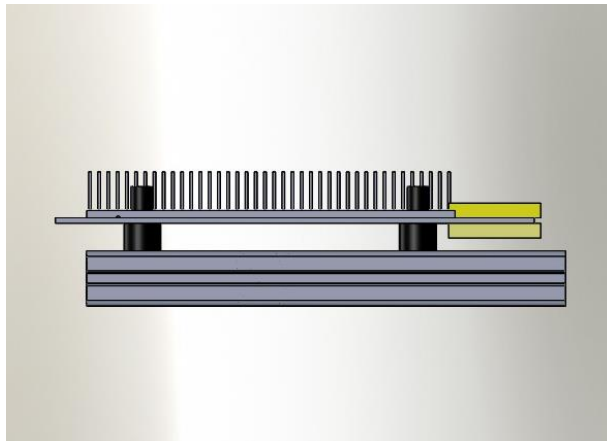


Figura 2-10 Disegno CAD dell'involucro della PHP con relativo supporto orizzontale

Tutto questo è racchiuso da una gabbia protettiva con una lamiera forata per impedire danni o infortuni provocati da urti accidentali.



Figura 2-11 Gabbia di protezione per la PHP e tutto il suo involucro compreso di ventilatori, la lamiera forata protegge da intrusioni accidentali permettendo la circolazione dell'aria

### 2.2.2 Zona Power supply e data logger

A sinistra sulla piastra in alluminio, sempre in una gabbia con funzione protettiva, sono collocati l'alimentatore programmabile per i riscaldatori dell'evaporatore e l'acquisitore dati collegato alle termocoppie, al sensore di pressione e al sensore di gravità.

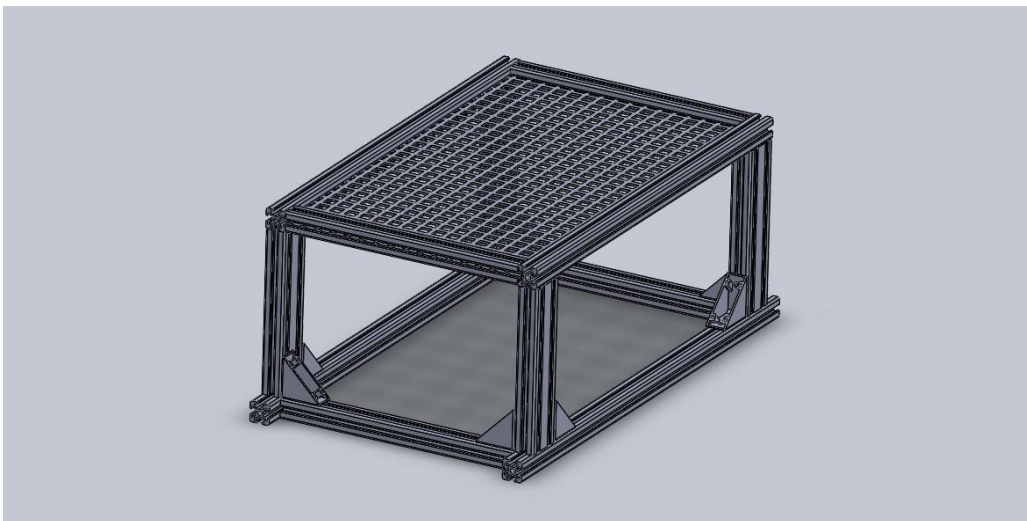


Figura 2-12 Gabbia per proteggere alimentatore dei riscaldatori e data logger, a lato non sono presenti lamiera forate per permetterne l'accesso

### 2.2.3 Zona PC e alimentatori

A destra abbiamo una particolare gabbia di alloggiamento per il PC col rispettivo alimentatore. Sempre in questa zona è posizionata la multipresa commerciale a 220V per fornire energia a tutti le apparecchiature sul rack, l'alimentatore del data logger e l'alimentatore dei ventilatori.

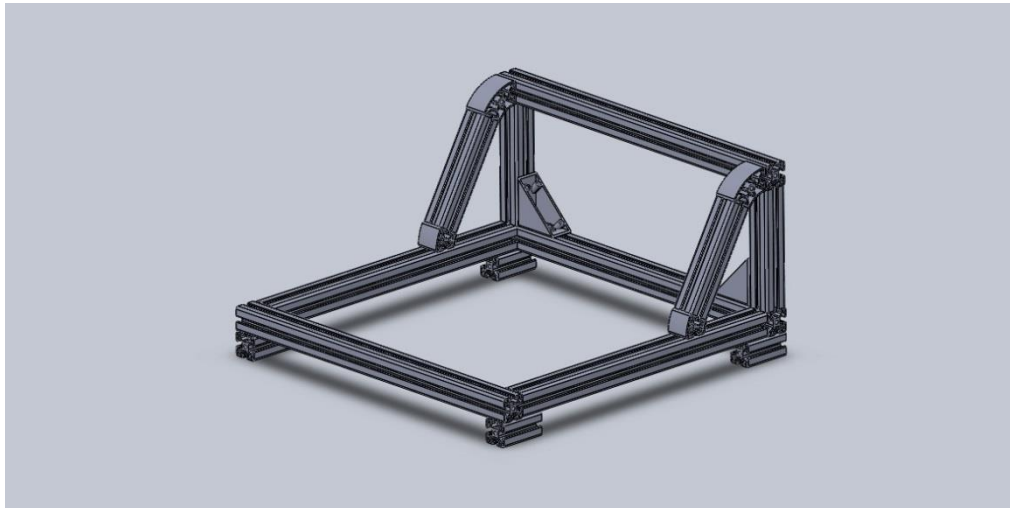


Figura 2-13 Gabbia di protezione per il PC, lo spazio vuoto sotto il monitor è stato impiegato per alloggiare parte della strumentazione rimanente

### 2.2.4 Parte posteriore

Nella parte posteriore della piastra era stato previsto l'eventuale l'alloggiamento della multipresa di Novespace, che contiene al suo interno tutti i sistemi di sicurezza elettrici per la tensione di rete (fusibile ed interruttore differenziale) ed il pulsante rosso di stop generale. Tuttavia, al momento dell'imbarco sull'aereo, è stato preferito collocarla a lato esterna alla piastra: il pulsante di emergenza sarebbe stato in una posizione poco pratica da raggiungere, in caso di emergenza sarebbe risultato difficoltoso intervenire celermente per via degli ingombri delle gabbie. Sempre nella parte posteriore è installata una canalina di plastica per permettere il passaggio dei cavi di alimentazione e l'alloggiamento dei relativi fusibili.

## 2.3 Dimensionamento e requisiti di sicurezza imprescindibili

Il criterio principe durante il processo di dimensionamento è quello di rispettare i vincoli di peso imposti da Novespace per permettere

all'esperimento di volare. La primaria preoccupazione, nel nostro caso, è di non superare i 50 kg di peso complessivo all'imbarco. Oltre a tutto ciò è indispensabile seguire meticolosamente il libretto "Rules and guidelines" redatto da Novespace [13], un manuale di norme di sicurezza e di buona progettazione per permettere a tutti gli sperimentatori di costruire dei rack il più possibili sicuri (nei limiti della ragionevolezza). Per dimostrarne la sicurezza si realizza un documento che viene continuamente aggiornato, chiamato "Experimet safety data package" (ESDP); all'interno di esso si devono mostrare tutte le soluzioni tecniche adottate e la loro messa in sicurezza. Il rack è stato poi oggetto di una meticolosa ispezione un mese prima della campagna: il responsabile della sicurezza Novespace ha ritenuto opportuno accertarsi di persona della qualità dell'apparato sperimentale durante la sua realizzazione. Tutti gli esperimenti che volano per la prima volta sono oggetto di controlli più approfonditi in modo da appurare con certezza la sicurezza di nuove attività. L'analisi del rischio è una delle principali attività durante la progettazione, questa è accompagnata anche da una certa preoccupazione riguardo la certezza di portare l'esperimento a termine nonostante i possibili problemi che potrebbe incontrare. In caso di guasto e perdita della possibilità di sperimentare si dovrebbe aspettare la successiva campagna con conseguente grave perdita di tempo nella ricerca e nell'analisi dei risultati.

### **2.3.1 Analisi rischio**

Un primo concetto davvero molto importante con cui ci si scontra nell'attività di progettazione è quello di rischio, quest'ultimo è diverso dal pericolo, il quale incombe ogni volta che si svolge un'attività umana. Secondo il manuale di Novespace "Rules and Guidelines" [13], può essere definito come il prodotto tra la probabilità che un evento si verifichi e il danno che ne potrebbe conseguire. Da qui si deduce che l'obiettivo per mettere un qualsiasi progetto in sicurezza è proprio la minimizzazione del rischio. A questo punto è allora necessario individuare tutte le attività indispensabili per il corretto svolgimento dell'esperimento che avrebbero potuto arrecare danni a persone o cose.



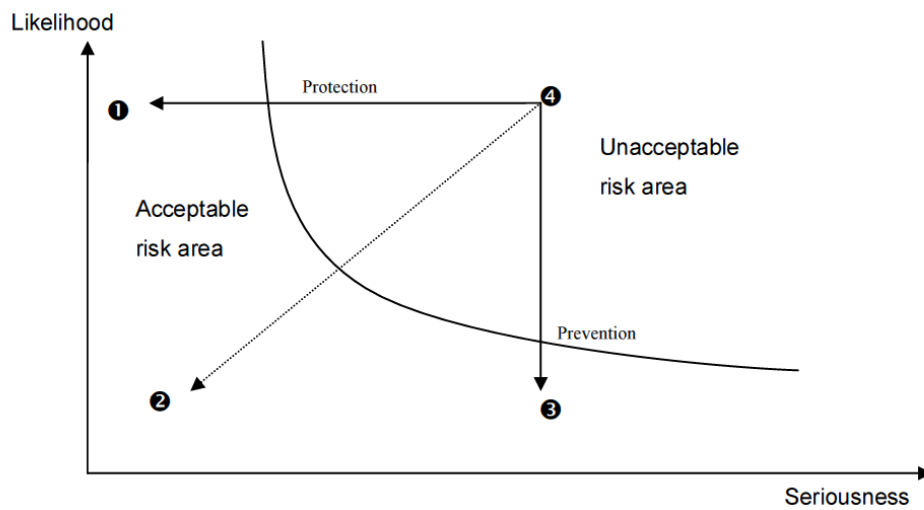


Figura 2-14 Grafico rischio-danno [13]

### 2.3.2 Riscaldamento

La prima attività importante e pericolosa è il riscaldamento della zona di evaporazione. Quest'ultima si svolge attraverso quattro resistenze in parallelo Termocoax [19] avvolte sulle curve di un lato della PHP.

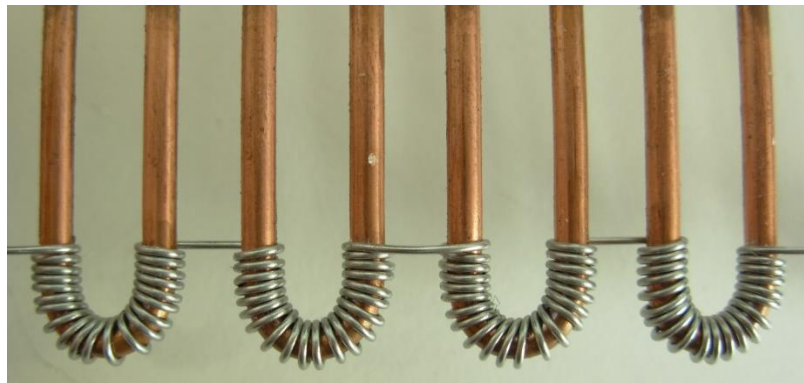


Figura 2-15 Particolare riscaldatore nella zona di evaporazione della PHP

Le temperature nella zona di evaporazione sono chiaramente le più alte raggiunte all'interno del sistema. Per evitare di toccare valori troppo elevati sono realizzati due tipi di controllo differenti:

- Controllo a livello di software
- Controllo tramite termoprotettori

Il primo di questi due è implementato proprio nel software di controllo: programmando Labview in modo da togliere l'alimentazione qualora le temperature misurate da almeno una termocoppia nella zona di evaporazione, superino il valore di 120°C. Questo sistema è stato testato in numerose occasioni prima del volo per verificarne l'affidabilità. Il secondo, composto da dei termoprotettori [30], funziona con sistema meccanico: essi sono collegati in serie con il circuito di alimentazione delle resistenze e programmati per aprire il circuito nel caso in cui rilevino una temperatura pari a 140°C. Nonostante tutte queste precauzioni è assodato che, a terra, con la PHP in posizione orizzontale (quindi nel layout che porta ad avere le peggiori prestazioni termiche), e una potenza termica pari a 100W fornita all'evaporatore (la massima che potevamo imporre dal software di controllo), non si superano mai nemmeno i 120°C. Chiaramente è poi necessario contenere tutta questa zona tramite un sistema che impedisca di avere temperature superficiali elevate e a rischio scottatura. Per questo motivo si racchiudono la zona di evaporazione con del PEEK [18], cioè materiale plastico resistente ad alte temperatura, solitamente intorno ai 250°C ma nel nostro caso anche 340°C, con buone proprietà di isolamento e facilmente lavorabile. In questo modo si può consentire la fuoriuscita dei cavi per le termocoppie e gli alimentatori oltre che il posizionamento dei termoprotettori. Grazie al contenimento appena descritto è possibile toccare senza scottarsi la parte esterna della zona di evaporazione a mani nude in tutta sicurezza. Il resto del corpo è formato da alluminio dato che nella parte di condensazione si sono sempre misurate temperature decisamente più basse, attorno ai 40°C, anche con ventilatori spenti sfruttando solo effetto di convezione naturale o di inerzia termica.

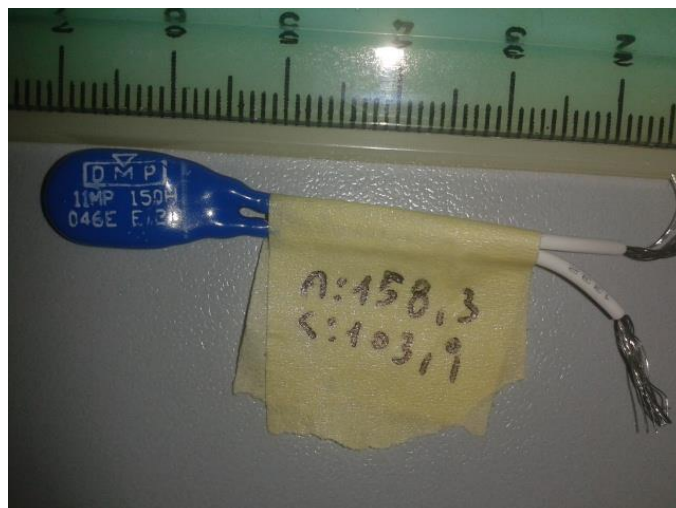


Figura 2-16 Termoprotettore

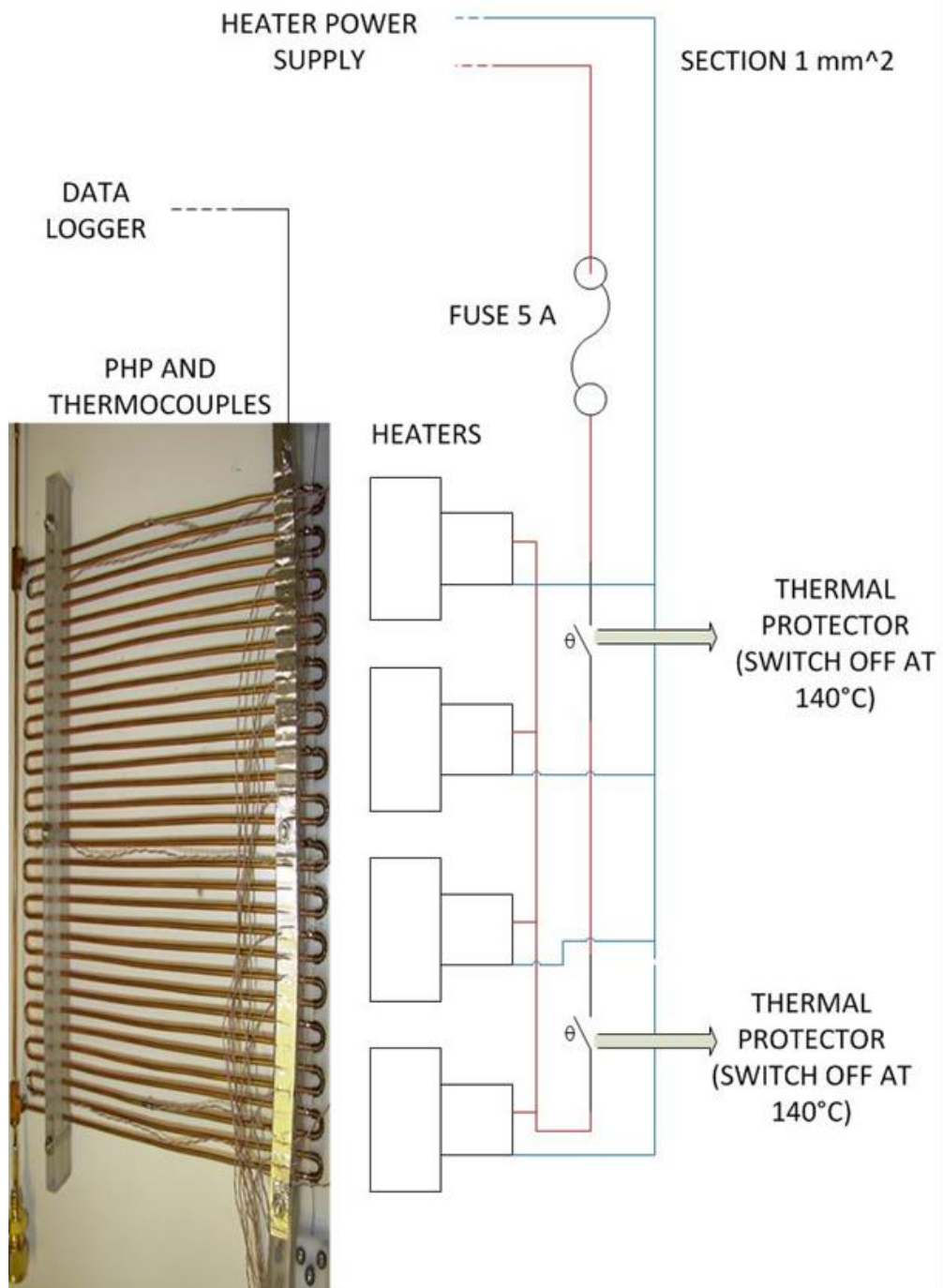


Figura 2-17 Schema elettrico, particolare riscaldatori e termoprotettori

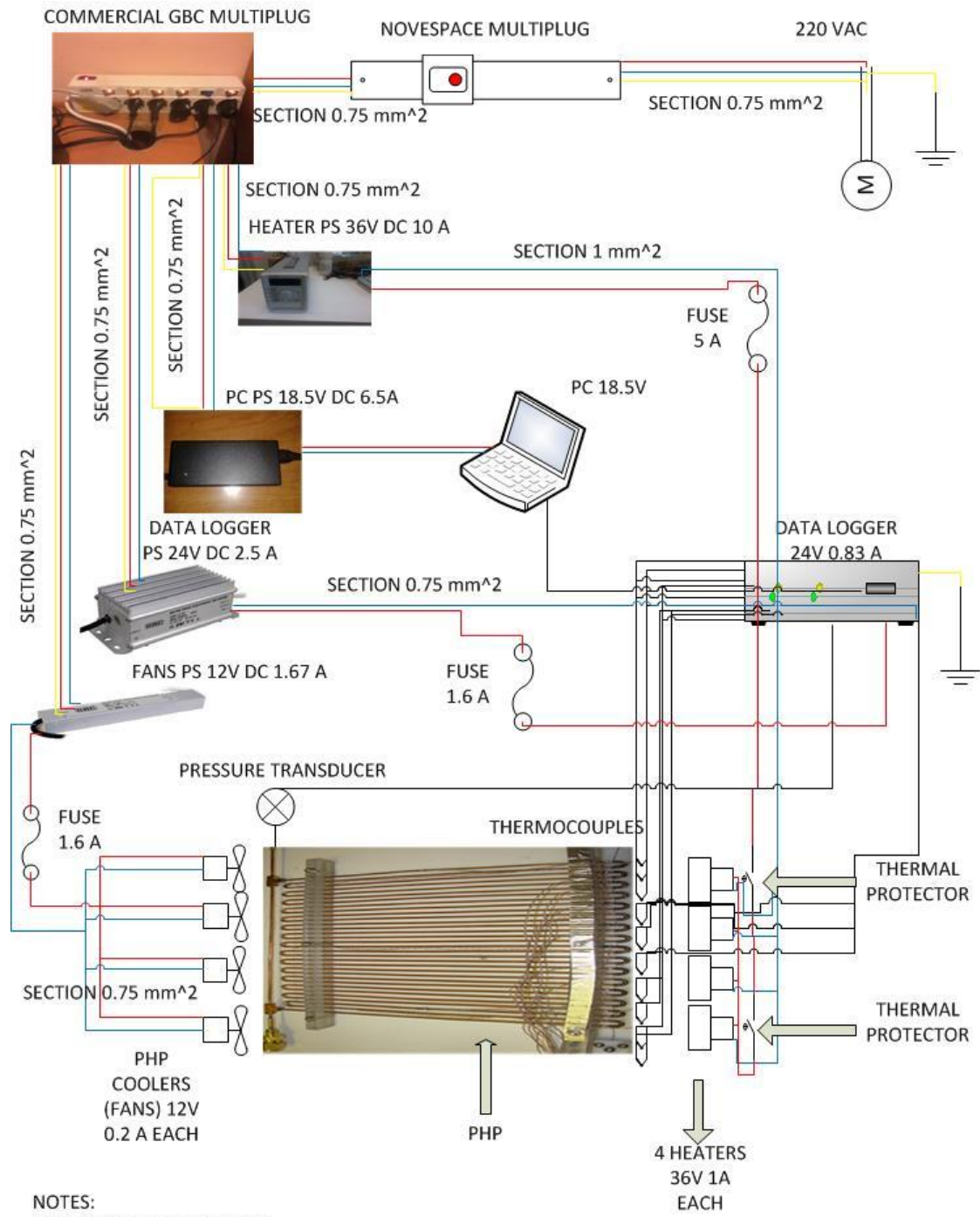
### 2.3.3 Fuoriuscita di fluido

Un altro problema al quale si rischia di andare incontro è la possibile fuoriuscita di fluido dal serpentino in rame. Le normative di Novespace [13] impongono sempre e comunque un doppio contenimento a tenuta per evitare la dispersione di qualsiasi fluido all'interno della cabina dell'aereo, questo a maggior ragione nel caso in cui sia infiammabile o pericoloso per la salute. Il refrigerante utilizzato, l'FC72 [28], potrebbe essere infiammabile e irritante anche se in realtà piuttosto modestamente. Il primo contenimento è già garantito dal serpentino stesso, il secondo contenimento è realizzato tramite il PEEK [18], la piastra posteriore di alluminio e quella superiore con il rispettivo array da alette. In caso di accidentale foratura del serpentino di rame il nostro fluido si troverebbe, nella zona misurata, ad una pressione inferiore a quella ambiente per tutte le condizioni operative. Ad ogni modo l'array di alette e la piastra di alluminio sul retro, uniti da dei bulloni, conterrebbero la fuoriuscita di fluido. Si è optato per la semplice unione delle piastre e del PEEK tramite viti per evitare l'esplosione del recipiente nel caso di fuoriuscita fluido e fallimento dei due controlli di temperatura. In questo caso, poiché il secondo contenimento è a tenuta per i liquidi ma non per i gas, il refrigerante in fase vapore sfiaterebbe all'esterno. Quest'ultima operazione, in un caso così catastrofico, è ritenuta più sicura rispetto alla possibile pressurizzazione indesiderata del contenitore.

### 2.3.4 Rischio elettrico

Utilizzando apparecchiature alimentate da corrente elettrica è indispensabile prendere tutte le precauzioni del caso per evitare infortuni o rischio di morte. La parte più pericolosa è sicuramente la zona di evaporazione della PHP per via dei suoi riscaldatori. Al fine di evitare tensioni troppo elevate (ricordando che i danni alle persone sono causati da alti valori di tensioni e in parte molto minore dalle correnti), sono presenti quattro resistenze da 36  $\Omega$  ciascuna in parallelo. Grazie a questa soluzione si possono fornire 100W di potenza elettrica interamente convertita in termica impiegando al massimo tensioni di 36V. Per la sicurezza e non incorrere in gravi danni alle persone bisognerebbe evitare di superare i 24V, tuttavia è meglio cercare di avvicinarsi al risultato ottimale con gli strumenti a disposizione (non è comunque vietato dal "Rules and guidelines" avere alte tensioni in gioco). Per ogni alimentatore non originale, cioè non progettato direttamente dalla casa costruttrice del dispositivo per quello specifico componente, bisogna accoppiare un fusibile rapido per interrompere il flusso di corrente in caso di cortocircuito. Si è resa

necessaria questa precauzione per gli alimentatori dei ventilatori, delle resistenze e del data logger [20-21-25]. Viste le correnti circolanti nei vari sistemi sono presenti fusibili da 1.6A per quanto riguarda ventilatori e data logger, da 5A per le resistenze del riscaldatore. I cavi, per avere valori di resistenza accettabili, sono dimensionati con sezioni di  $0.75 \text{ mm}^2$  dappertutto tranne che per il tratto dall'alimentatore alle resistenze dell'evaporatore: qui è necessariamente presente una sezione pari a  $1 \text{ mm}^2$ . Tutti gli alimentatori sono messi a terra attraverso la multipresa commerciale [27], la quale è a sua volta a terra tramite la multipresa di Novespace. Dentro quest'ultima è presente l'interruttore differenziale già dimensionato per tenere in sicurezza i vari impianti collegabili ad essa. La PHP non è messa a terra ed è elettricamente isolata da tutto il resto del sistema, essendo sospesa tramite supporti in gomma. In tal modo un eventuale contatto elettrico dei riscaldatori non interrompe il funzionamento dell'esperimento, e ci vorrebbero due contatti per far scattare il blocco dell'esperimento



NOTES:  
 PHP: PULSATING HEAT PIPE  
 PS: POWER SUPPLY  
 THERMAL PROTECTORS: THEY SWITCH OFF AT 140°C

Figura 2-18 Schema elettrico completo del rack

### **2.3.5 Conclusioni sicurezza**

La sicurezza e la minimizzazioni dei rischi è una parte ampiamente trattata nel processo di dimensionamento che ha avuto una grande rilevanza in termini di tempo e sforzi durante la progettazione. È comprensibilissima l'importanza data a questa tematica all'interno di un'attività come quella del volo parabolico, le imposizioni del "Rules and guidelines" sono state studiate con cura ma la loro applicazione non è comunque prescindibile dall'utilizzo del buon senso. Ogni singolo precetto è applicato in maniera critica e questo dovrebbe farsi sempre e comunque in ogni attività umana, le norme di sicurezza sono realizzate per tutelare la salute degli operatori, un occhio tecnico e critico dovrebbe comunque guardare al di là di esse e verificare che le regole svolgano adeguatamente il loro dovere. Qualsiasi attività umana porta con sé dei rischi, è però nostra principale priorità osservare accuratamente ogni dettaglio portando anche coscienza degli eventuali eccessi normativi. Osservazioni critiche sono presenti laddove sembrava che ci fossero delle falle o delle imposizioni poco sensate nelle regole. Esempi lampanti sono quelli riguardanti il fissaggio della piastra di alluminio solo in quattro punti e dell'impossibilità di forare i profili delle gabbie e delle strutture per gli ancoraggi a terra (vedi "dimensionamento strutturale"). Possiamo infine affermare che seguire le norme imposte porta nella maggior parte dei casi ad un risultato ottimale, tuttavia non possiamo prescindere da un'osservazione critica delle attività svolte e da una valutazione razionale caso per caso dei vari esperimenti; possiamo infatti aprire nuovi orizzonti alle regole e renderle più efficaci portando suggerimenti e snellendo quelle più ridondanti rendendo più ragionevole la progettazione.

### **2.3.6 Dimensionamento strutturale**

Ogni oggetto utilizzato per portare a termine l'esperimento deve essere ben fissato per ovvi motivi data la continua variazione di accelerazione dell'ambiente. Tutto è quindi ancorato con la dovuta cautela alla piastra di alluminio spessa 5mm che ha la funzione di base. Ogni vite utilizzata, per rispettare le regole di Novespace, è selezionata in modo da essere marchiata di classe almeno 8.8, i dadi usati sono tutti di tipo autobloccante per evitare svitamenti provocati da vibrazioni. Qualora fosse servito un corpo completamente filettato, in commercio è usuale trovare viti di questa classe o superiore ma solo con una parte di corpo filettata: non sarebbe stato possibile completare successivamente il filetto poiché questa operazione avrebbe compromesso la classe di resistenza, la sezione resistente si sarebbe infatti modificata. La piastra d'alluminio è fissata sugli appositi binari presenti

sull'aereo, essi sono gli stessi a cui precedentemente erano collegati i sedili. Il fissaggio dell'esperimento deve essere effettuato tramite quattro viti M10 lunghe 125mm agli attacchi appositi direttamente forniti da Novespave sui binari dedicati. La condizione peggiore a cui può essere sottoposta una struttura è quella causata da un atterraggio di emergenza che provocherebbe un'accelerazione pari a 9g nella direzione X dell'aereo. Nel caso del nostro lavoro, non sapendo l'esatta orientazione con la quale sarebbe stato disposto il nostro rack, è prevista la resistenza alla condizione catastrofica in entrambe le direzioni X e Y. Tutti i calcoli sono stati effettuati noti i pesi dei singoli componenti e del rack completo, pari a 38kg. I massimi carichi sopportabili dalle viti sono pari a:

- Sforzo di taglio:  $F_s=34800$  N
- Sforzo in trazione:  $F_t=58000$  N

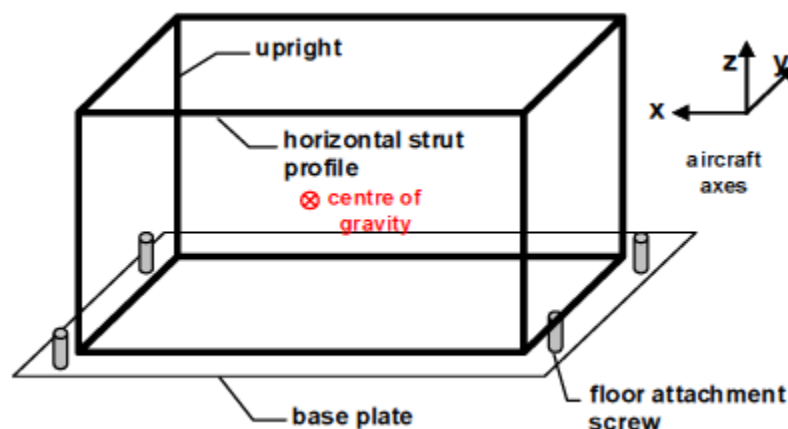


Figura 2-19 Rappresentazione schematica di un rack collegato alla relativa piastra di supporto

Questi valori vanno rispettati con un coefficiente di sicurezza pari al 50%. Bisogna inoltre sottostare ai massimi carichi lineari ammessi da Novespace in funzione dell'altezza del centro di gravità e della distanza tra gli attacchi. Per rispettare queste condizioni i calcoli strutturali sono eseguiti tramite dei fogli di calcolo direttamente forniti da Novespace che seguono la seguente procedura [13]:

- Calcolo della massa dell'esperimento:



$$M = \sum m_{item} \text{ [kg]}$$

Equazione 2-1 Calcolo massa esperimento

- Calcolo dell'altezza del centro di massa:

$$H = \frac{\sum m_{item} H_{item}}{\sum m_{item}} \text{ [m]}$$

Equazione 2-2 Calcolo altezza centro di massa

- Calcolo del carico lineare per ogni attacco:

$$M_{attach} = \frac{M}{N_{attacchi}} \text{ [kg]}$$

Equazione 2-3 Calcolo del carico lineare per ogni attacco

- Calcolo dello sforzo di taglio agli attacchi:

$$F_s = \frac{9gM}{N_{attacchi}} \text{ [N]}$$

Equazione 2-4 Calcolo dello sforzo di taglio agli attacchi

- Calcolo dello sforzo in trazione agli attacchi:

$$F_t = \frac{9gMH}{N_{attacchi\ posteriori}} + 28300 \text{ [N*m]}$$

Equazione 2-5 Calcolo della sforzo in trazione agli attacchi

- Calcolo del momento flettente:

$$M_b = \frac{9gMH}{N_{aste\ verticali}} \text{ [N*m]}$$

Equazione 2-6 Calcolo del momento flettente

- Verifica di rispetto dei limiti imposti per tutti i parametri sopra descritti

Con:

- M: massa dell'esperimento [kg]
- $m_{item}$ : massa dei singoli oggetti che contengono l'esperimento [kg]
- H: altezza centro di massa [m]
- $H_{item}$ : altezza del centro di massa dei singoli oggetti [m]
- $M_{attach}$ : carico per ogni attacco [kg]

- $N_{\text{attacchi}}$ : numero di attacchi [-]
- $F_s$ : sforzo di taglio [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]
- $F_t$ : sforzo di trazione [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]
- $M_b$ : momento flettente [ $\text{N}\cdot\text{m}$ ]

I calcoli sono realizzati per le tre gabbie presenti sul rack e il supporto verticale della PHP:

- Gabbia PC
- Gabbia PHP
- Gabbia Power supply-Data logger
- Supporto verticale PHP

Quest'ultimo rappresenta il caso peggiore a livello strutturale rispetto a quello col supporto per tenerla in orizzontale.

Le regole di Novespace [13] impongono per qualsiasi rack che pesi meno di 50 kg la possibilità di vincolarsi a terra solo con quattro attacchi alla base per fissare la piastra senza imporre vincoli sulla loro distanza. Tuttavia ci si è resi conto, durante la realizzazione, che per dimensioni della piastra piuttosto elevate e pesi concentrati nella parte centrale si rileva una freccia di deformazione eccessiva. Per questa ragione è stato proposto a Novespace di aggiungere almeno altri due attacchi nella parte centrale per evitare questa flessione che potrebbe essere causa di indesiderate vibrazioni od oscillazioni durante il volo, anche fissandone solo uno dei due. È stata presa nota di questa nostra osservazione e probabilmente verrà modificato il regolamento. Un'altra questione di rilevanza riguarda gli attacchi delle gabbie e dei profili dei supporti alla base di alluminio. Secondo le regole di Novespace [13] tutte le strutture devono essere fissate alla base tramite attacchi commerciali certificati dalle stesse aziende che commercializzano i profili, esse sono consigliate direttamente da Novespace (es. Bosch, Item[29]...); è inoltre vietato forare trasversalmente i profili per non comprometterne la rigidità. Si pensa, invece, che mantenere due profili allungati e forati alle estremità per alloggiare la vite di fissaggio passante potrebbe essere una soluzione più robusta rispetto all'utilizzo del semplice "clamp". Per evitare problemi e discussioni alla fine sul rack sono presenti entrambe le soluzioni contemporaneamente. Resta comunque una questione strutturale interessante da analizzare in futuro magari con delle analisi ad elementi finiti.

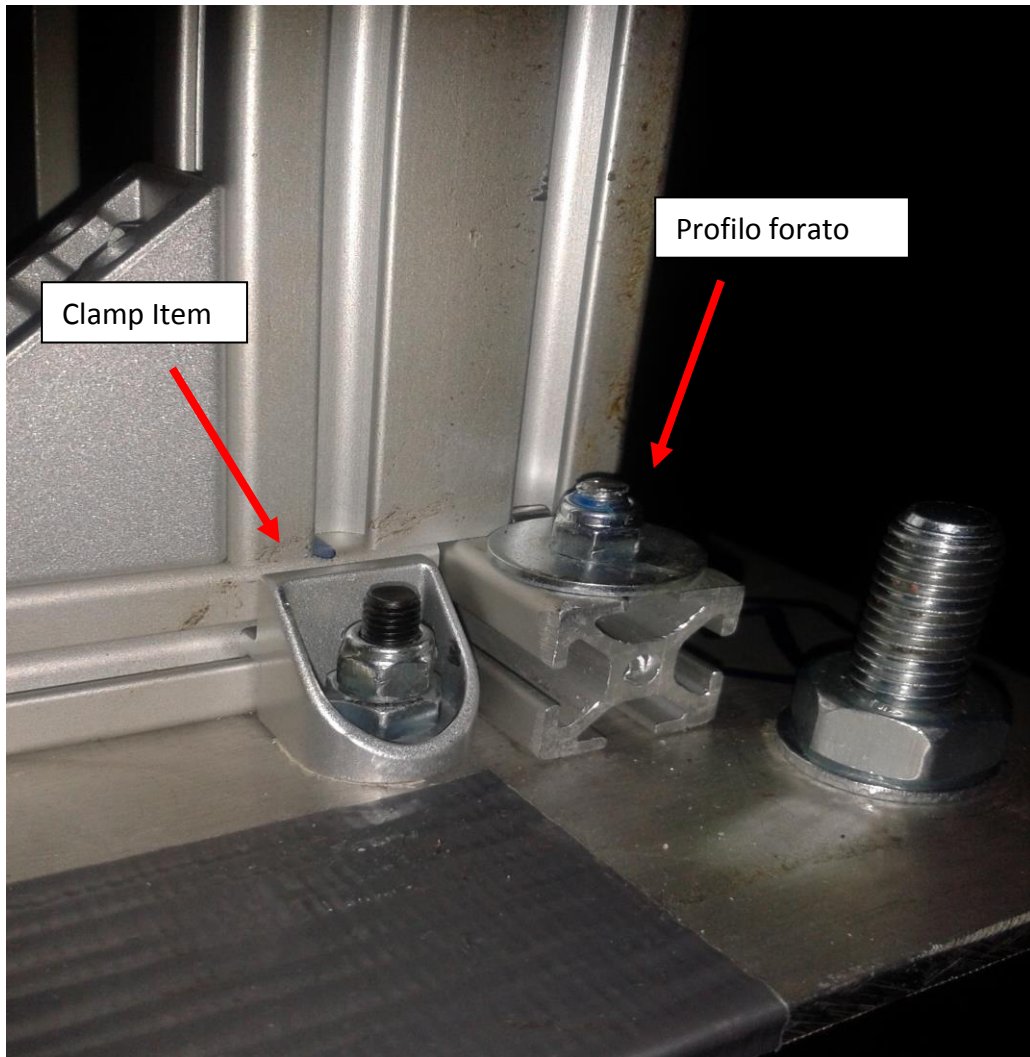


Figura 2-20 Particolare fissaggio gabbia alla piastra d'alluminio con entrambi i sistemi citati

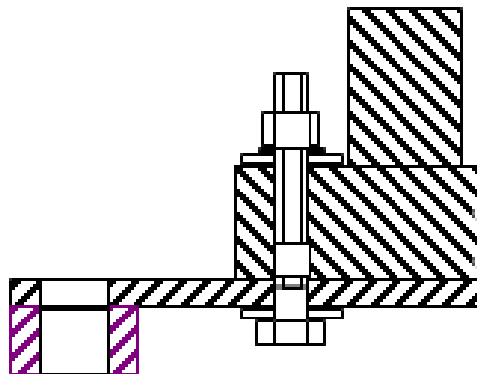


Figura 2-21 Particolare collegamento della gabbia alla piastra tramite bullone e profilo forato. In viola foro di fissaggio della piastra agli attacchi presenti sui binari dell'aereo assieme al distanziale



Figura 2-22 Particolare distanziale per passaggio vite che blocca la piastra ai binari dell'aereo. In questa foto è tenuto bloccato da un bullone con vite montata nel verso contrario a quello che avrebbe sull'aereo.

Nel caso considerato tutte le verifiche strutturali delle gabbie e della piastra sono ampiamente verificate. Qualche problema si presenta col calcolo riguardante il supporto verticale della PHP. Non conoscendo esattamente il peso della PHP durante la fase di assemblaggio e di tutto il suo contenitore (compreso di castelletto e ventilatori) non era facile stimare il carico che avrebbe dovuto sopportare. Alla fine, completato questo assemblaggio e pesato, si è potuto effettuare un calcolo più accurato. I limiti, compresi di coefficienti di sicurezza, sono rispettati per poco: basterebbe qualche decimo di kg in più per uscire. È comunque stata prevista la possibilità di aggiungere una barra laterale che aiuti a diminuire la flessione delle aste verticali sorreggenti l'involucro della PHP. Per questo è anche disponibile un calcolo della sezione necessaria per reggere tutto il momento flettente nel caso peggiore evitando lo strappo del foro.

Resistenza lastra a taglio uguale a quello della forza che effettivamente potrà andarci		
Sigma snervamento vite	900 N/mm <sup>2</sup>	
Sigma rottura	1000 N/mm <sup>2</sup>	
fk n	466.6667 N/mm <sup>2</sup>	resistenza caratteristica a sforzo normale /1,5 per passare a valore ammissibile
fD,V	329.9832 N/mm <sup>2</sup>	resistenza di progetto a sforzo di taglio
A vite	20.1 mm <sup>2</sup>	area resistente da norma per M6
F taglio	135 N	forza che effettivamente dovrà sopportare
Sigma snervamento lastra	510 N/mm <sup>2</sup>	
Sigma lastra ammissibile	340	
H	10 mm	
phi	6.5 mm	
spessore	0.113445	
spessore sicurezza	0.147479	
D medio vite	5.35 mm	da norma UNI 4535
<b>Rifollamento</b>		
P rif	171.0999	
Sezione resistente lastra	1.134454 mm <sup>2</sup>	

Figura 2-23 Calcolo lastra sostegno

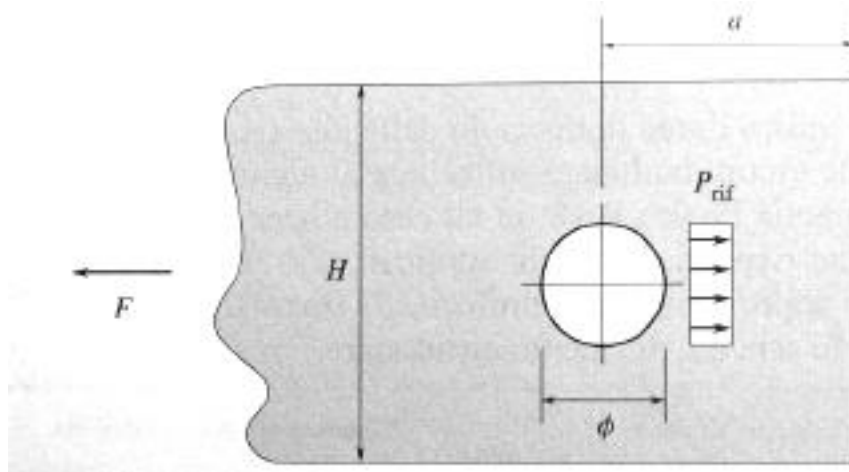


Figura 2-24 Schema foro-lastra

$$Fk_n = \min(0.7 * \sigma_{rottura}; \sigma_{snervamento}) \text{ [Pa]}$$

Equazione 2-7 Resistenza caratteristica a sforzo normale

$$fD, V = \frac{Fk_n}{\sqrt{2}} \text{ [Pa]}$$

Equazione 2-8 Resistenza di progetto a sforzo di taglio

$$\sigma_{\text{lastra ammissibile}} = \frac{\sigma_{\text{snervamento}}}{1.5} \text{ [Pa]}$$

Equazione 2-9 Sforzo ammissibile per lastra

$\emptyset$ : diametro foro alloggiamento vite [m]

H: larghezza lastra [m]

$$\text{Spessore} = \frac{F_{\text{taglio}}}{\sigma_{\text{lastra ammissibile}} * (H - \emptyset)} \text{ [m]}$$

Equazione 2-10 Spessore sezione resistente lastra

$$\text{Spessore sicurezza} = \text{Spessore} * 1.3 \text{ [m]}$$

Equazione 2-11 Spessore con coefficiente di sicurezza

$P_{\text{rif}}$ : pressione di rifollamento [Pa]

$$P_{\text{rif}} = \frac{F_{\text{taglio}}}{\text{Spessore sicurezza} * D_{\text{medio,vite}}} \text{ [Pa]}$$

Equazione 2-12 Calcolo pressione di rifollamento

### 2.3.7 Ingombri e ingegnerizzazione

La decisione della disposizione e del posizionamento di ogni singolo oggetto sulla piastra di alluminio è il risultato di lunghe meditazioni. Sicuramente è necessario compattare il più possibile mantenendo però un adeguato spazio di manovra per permettere di lavorare comodi durante le fasi di assemblaggio e permettere modifiche e/o riparazioni in maniera più agevole possibile. Ci sono alcuni accorgimento che sono particolarmente degni di nota.

Per quanto riguarda la disposizione del Power supply [20] e del Data logger [25] è stato necessario tenere conto del rispettivo fissaggio alla piastra. Non sembrava affidabile sfruttare il foro previsto per l'imbullonamento già presente

all'interno del data logger: non è certificato per sollecitazioni a 9g. Il sistema di fissaggio realizzato è composto da dei cilindretti con delle facce piatte parallele ottenute attraverso fresatura in modo da aderire alle pareti dell'oggetto in questione. All'interno di essi è presente una vite con testa sotto il piastrone, un'altra vite arriva sopra di essa dall'alto, questa ha la testa sopra un profilo Item [29] 20x10 di alluminio forato che afferra dall'alto lo strumento per tenerlo fissato. Le due viti sono allora tenute assieme da un lungo dado che permette una comoda regolazione in altezza. Il sistema permette lo smontaggio dell'alimentatore dal rack senza bisogno di accedere al lato inferiore di esso.

Il power supply [20] è assicurato alla piastra con un sistema analogo a quello del data logger. La sua parte anteriore è posizionata distante dal profilo per lasciare un certo respiro nelle manovre di collegamento del cavo di rete, del sensore di gravità, del sensore di pressione e delle varie termocoppie. Sempre per poter intervenire comodamente si prevede una piastra forata di protezione solamente nella parte superiore e non ai lati.



Figura 2-25 Particolare sistema di fissaggio utilizzato per power supply e data logger

L'attacco sul retro dell'alimentatore col cavo di alimentazione è stato modificato per permettere al cavo di uscire in posizione verticale e non orizzontale in modo da non interferire col profilo: lo strumento è infatti posizionato a pacco col profilo posteriore della gabbia. Nella placca che permette l'uscita dell'alimentazione si è aggiunto un foro nella parte superiore dal quale esce il cavo. La precedente apertura è sigillata con un pezzo di canalina di plastica pressata all'interno e richiusa con del nastro isolante.

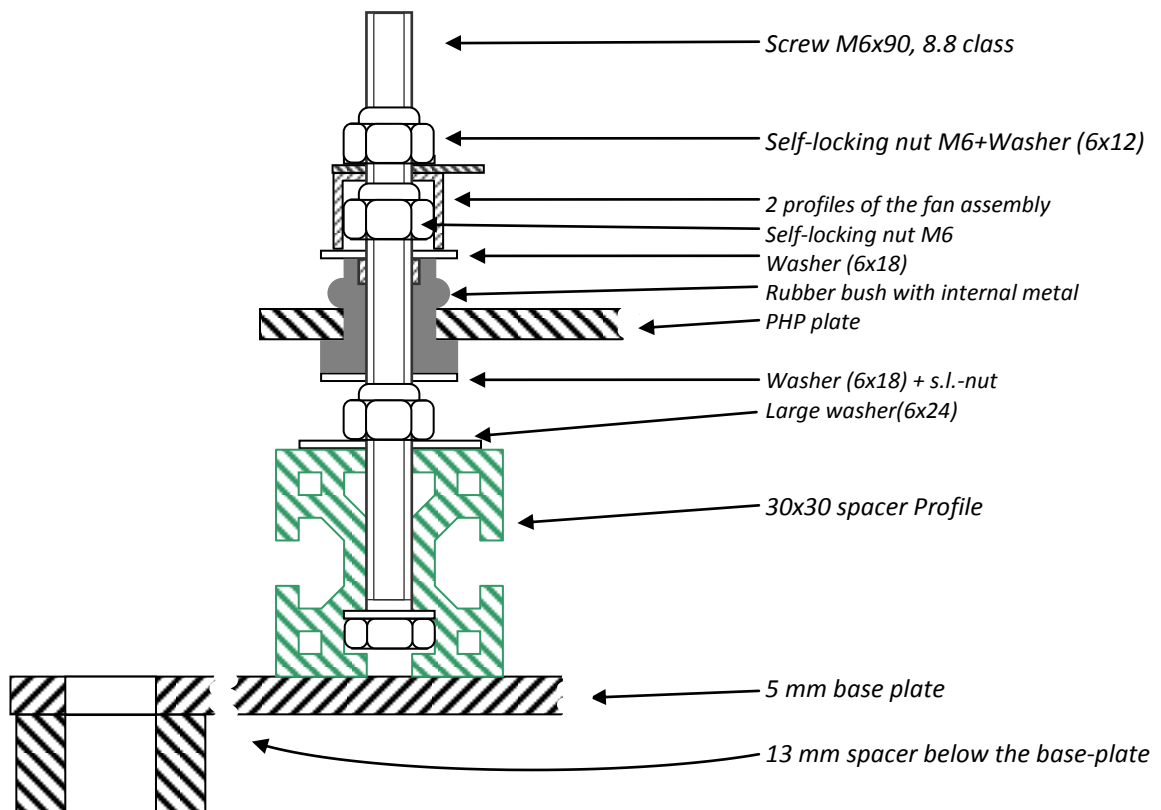


Figura 2-26 Particolare modifica nel retro dell'alimentatore delle resistenze

La gabbia della PHP è tenuta sollevata tramite dei profili fungenti da spessori nelle posizioni di attacco per permettere il passaggio del cordone di cavi contenente le termocoppie e i cavi di alimentazioni delle resistenze, dei ventilatori, del sensore di gravità e di pressione. Questi sono tutti bloccati in vari punti con l'ausilio di fascette e nastro americano per tenerli in posizione e mantenere l'ambiente di lavoro quanto più possibile pulito e ordinato. Particolare nota va dedicata ai supporti in gomma antivibranti che sorreggono la PHP col relativo castello per i ventilatori. Questi ultimi sono anche utili ad isolare elettricamente tutta la PHP coi relativi supporti dalla struttura. In caso di rottura i supporti mantengono comunque il collegamento meccanico poiché al loro interno passano delle viti che sorreggono il carico.

Qui di seguito si può osservare il particolare collegamento della PHP col profilo di sostegno, i supporti antivibranti e il castelletto dei ventilatori.





*I supporti antivibranti dopo essere stati caricati e allargati, il dado stretto simula l'involucro della PHP*

Figura 2-27 Particolare collegamento involucro PHP con support e giunto antivibranti

### 2.3.8 Particolare gestione spazi all'interno della gabbia PC

Il PC è avvolto da una struttura protettiva in modo da mantenerlo al sicuro in caso di urti e col monitor aperto tenuto bloccato da degli angolari. Nello spazio ricavato sotto il monitor si è deciso di alloggiare il rispettivo alimentatore con cavo (accorciato per ridurre gli ingombri) e l'alimentatore del data logger.

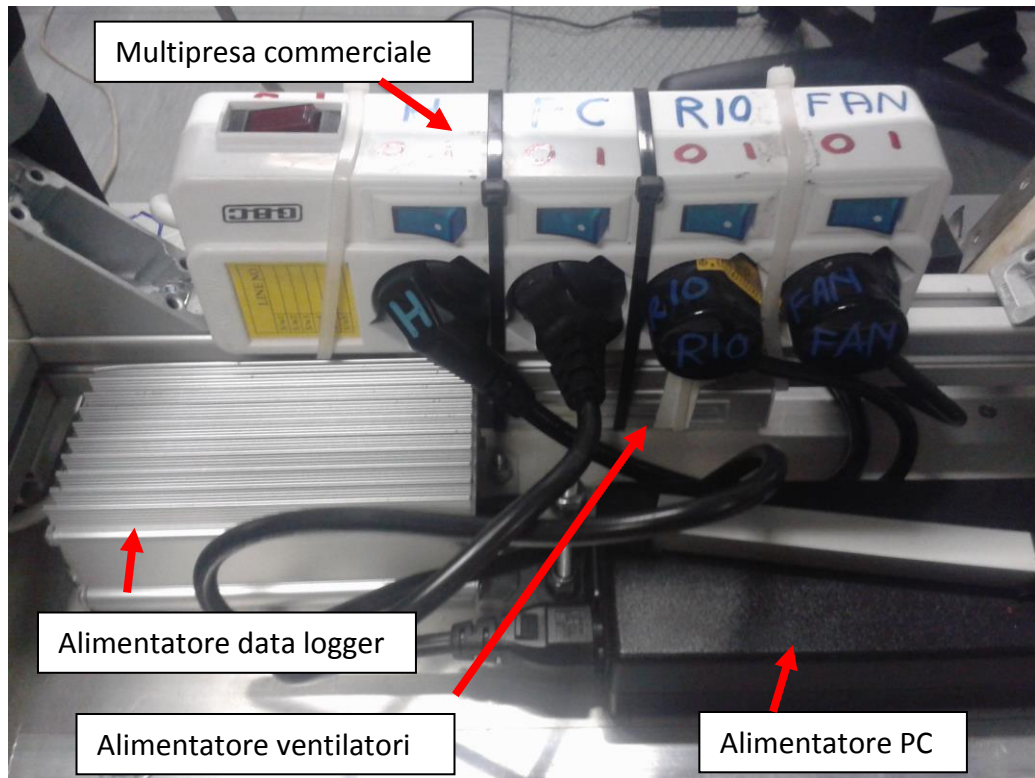


Figura 2-27 Particolare gestione spazi dietro il PC

Il primo alimentatore è vincolato alla piastra mediante un profilo di alluminio che lo tiene pressato grazie a due viti passanti con la testa sotto la piastra e due dadi sopra al profilo. Il secondo possiede già di default delle alette apposte piuttosto robuste per permetterne il fissaggio. L'alimentatore per i ventilatori e la multipresa commerciale sono vincolati tramite fascette fissate direttamente alla struttura protettiva del PC. La multipresa [27] è scelta in modo da avere tutte le prese con singoli interruttori per isolare tutti i circuiti separatamente oltre ad avere un generale per tutto. Tramite degli angolari con imbottitura si tiene in posizione il PC e il suo monitor; inoltre è prevista una piastra modellata per proteggere il cavo di uscita dell'alimentazione del PC da urti e accidentali scollegamenti. La batteria del PC potrebbe comunque mantenere il suo corretto funzionamento per circa un'ora e il data logger [25] continuerebbe ad acquisire, i parametri di potenza possono essere controllati anche manualmente dall'alimentatore[20]. Infine possiamo constatare che si è voluto tutelare al massimo la sicurezza dello svolgimento dell'esperimento e lo sfruttamento di ogni spazio che poteva ospitare qualcosa attorno alla geometria non molto regolare di un PC laptop aperto: anche i cavi troppo lunghi sono stati accorciati per evitare eccessivi avvolgimenti e probabili impigliamenti.

### 2.3.9 Procedura cambio orientazione

È necessario, per le regole della sicurezza di Novespace, descrivere ogni procedura utilizzata che viene inserita nel documento ESDP. Le procedure per passare dal posizionamento verticale della PHP al posizionamento orizzontale sono state applicate durante la campagna per testare entrambe le configurazioni in voli diversi:

- 1) Rimuovere 4 dadi M5 più le rispettive rondelle che fissano la gabbia della PHP
- 2) Rimuovere 4 dadi M5 più 4 dadi M6 (usati come distanziali) e le rispettive rondelle che fissano la gabbia della PHP
- 3) Rimuovere la gabbia della PHP coi suoi 4 angolari
- 4) Rimuovere 4 dadi M6 sopra il castelletto dei ventilatori
- 5) Rimuovere le rondelle sopra il castelletto dei ventilatori
- 6) Rimuovere il castelletto dei ventilatori
- 7) Rimuovere 4 dadi M6 che erano sotto il castelletto dei ventilatori
- 8) Rimuovere 4 rondelle sopra i supporti antivibranti
- 9) Rimuovere l'involucro della PHP dai supporti antivibranti
- 10) Rimuovere i 4 supporti antivibranti dalla lunga vite
- 11) Rimuovere 4 rondelle M6 dalla vite
- 12) Rimuovere 4 dadi M6 dalle viti corte
- 13) Rimuovere 4 rondelle M6 dalle viti corte
- 14) Rimuovere il supporto orizzontale della PHP
- 15) Installare il supporto verticale della PHP
- 16) Installare 4 rondelle M6 sulle viti corte
- 17) Installare 4 dadi M6 sulle viti corte
- 18) Installare 4 rondelle M6 sulle viti lunghe
- 19) Installare i 4 supporti antivibranti
- 20) Installare l'involucro della PHP controllando tutti i cablaggi
- 21) Installare 4 rondelle M6 sopra l'involucro della PHP
- 22) Installare 4 dadi sopra i supporti vibranti avendo cura di non tirarli troppo per non deformare eccessivamente la gomma
- 23) Installare il castelletto dei ventilatori
- 24) Installare le rondelle sopra il castelletto dei ventilatori controllando i cablaggi
- 25) Installare 4 dadi M6 stringendoli con la chiave inglese
- 26) Controllare che i supporti antivibranti siano deformati
- 27) Installare 4 dadi M5 con le relative rondelle per fissare la gabbia della PHP

28) Installare 4 dadi M5 più 4M6 usati come distanziali e relative rondelle per fissare la gabbia della PHP

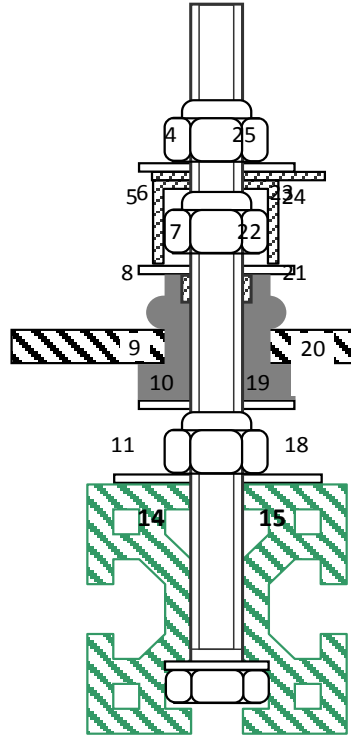


Figura 2-28 Particolare collegamento involucro PHP, castelletto ventilatori e supporti antivibranti

### 2.3.10 Cavi elettrici posizionamento

I cavi elettrici, come segnato nello schema dell'impianto elettrico, hanno tutti quanti una sezione di  $0.75 \text{ mm}^2$ , tranne nel caso di quelli che portano corrente ai riscaldatori che hanno sezione pari a  $1 \text{ mm}^2$  per via della maggior corrente trasportata. Ove possibile i cablaggi sono fatti passare nell'apposita canalina installata nella parte posteriore del rack. In altri punti sono inseriti, grazie all'ausilio di pezzi di tubo di plastica per aria compressa, all'interno delle scanalature dei profili delle gabbie. Sempre nella zona della canalina sono posizionati i fusibili necessari. Essi sono tutti quanti segnati con dei colori per permetterne il veloce ed efficace riconoscimento in caso di sostituzione di emergenza prima del volo; sono poi alloggiati in appositi contenitori trasparenti (classe di protezione IP6) in modo da poterne rendere l'interno il più possibile ispezionabile senza un'apertura obbligatoria.



Figura 2-29 Particolare fusibile all'interno dell'apposito contenitore

Tutti i cavi sono fissati con grande cura in modo da evitare traumi dovuti a strappi accidentali. Questa operazione è frutto di tempo e ragionamento sulla disposizione essendo molto alto il rischio di non portare a termine l'esperimento e perdere qualche giornata per via di problemi di questo genere: una riparazione in volo sarebbe impossibile o comunque molto difficile.

La spina della multipresa è stata sostituita. Secondo le regole Novespace [13] essa deve infatti rispettare gli standard di forma francesi per gli attacchi, avendola acquistata in Italia si è resa necessaria la modifica di questo particolare. Per tutelare ulteriormente la sicurezza, nel momento del rifacimento, si deve lasciare più lungo il cavo della messa a terra: se così non si facesse potremmo incorrere in un guasto da strappo il quale rischierebbe di scollegare la messa a terra senza però far notare dall'esterno un malfunzionamento. Lasciando invece il cavo di terra più lungo tenderà a strapparsi per ultima facendo quindi prima notare il malfunzionamento.

### **2.3.11 Piastra d'alluminio di base**

La piastra che serve come supporto di fissaggio per le gabbie e tutta la strumentazione è anch'essa frutto di lunghe meditazioni per quanto riguarda le sue dimensioni. Esse cercano sempre di rispettare i criteri d'ingombro e peso ottimizzando il posizionamento dei fori per il fissaggio. Alla fine è stata usata una piastra rettangolare di 1167.6x609mm con angoli arrotondati. La disposizione dei fori è pensata per poter permettere di girare eventualmente la gabbia del PC e poter aggiungere degli altri clamp al fine di migliorare il fissaggio. Prima di effettuare i fori è stata provata la disposizione completa delle gabbie e degli strumenti su una piastra di compensato per controllare tutti gli ingombri e le disposizioni per evitare di sbagliare o essere poco precisi e ricorrere a brutali operazioni allargamento.

### 2.3.12 Fissaggio alla piastra

Il fissaggio di tutto gli oggetti alla piastra è realizzato tramite viti M5 o M6 in funzione della situazione, le teste sono posizionate sotto la piastra e i dadi avvitati da sopra permettendo quindi il fissaggio dell'oggetto desiderato. Ovunque siano presenti delle viti vicine ed allineate le teste sono incastrate all'interno di alcuni profilini di alluminio che hanno la funzione di impedire la rotazione delle teste tenendole ferme: è così possibile svitare e riavvitare ogni dado sopra alla piastra senza necessità di tenere la chiave sotto la piastra. Ciò è stato pensato nell'ottica di poter intervenire sul rack anche quando già fissato sull'aereo.

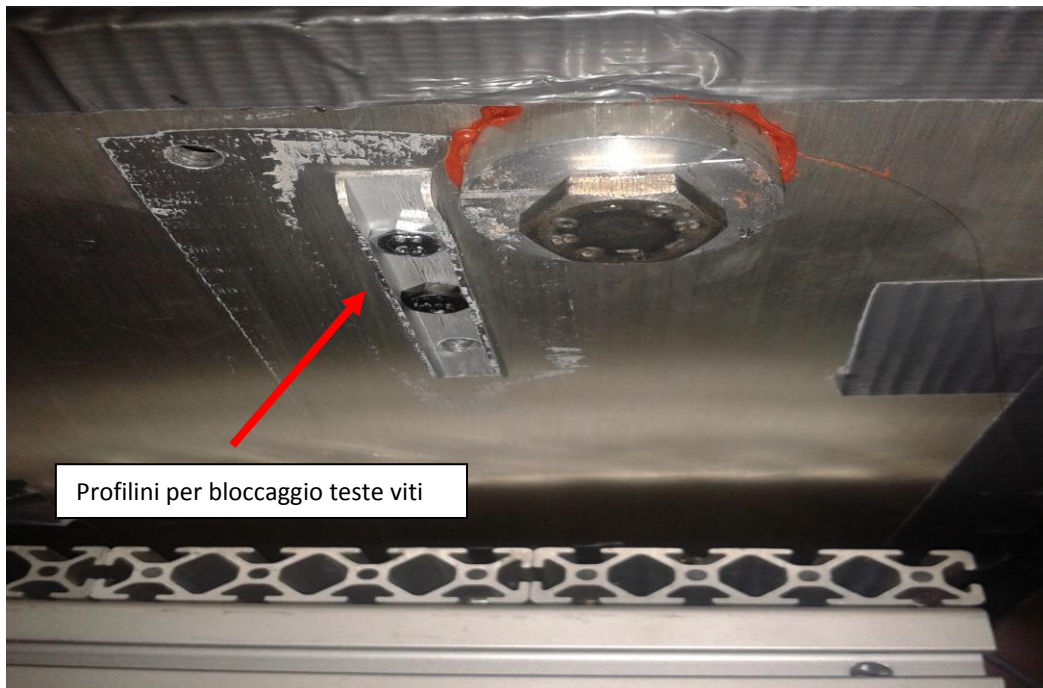


Figura 2-30 Particolare profili di alluminio sottostanti alla piastra per permettere il bloccaggio delle teste delle viti

### 2.3.13 Assorbimento potenza elettrica rack

Per esigenza di Novespace è importante conoscere esattamente la curva di assorbimento elettrico di tutto il rack funzionante a tutti i livelli di potenza fornita alle resistenze. Per questo è stata misurata e, tramite interpolazione lineare, possediamo ora una curva di assorbimento. In questo modo è possibile evitare di collegare il rack a pannelli dell'aereo che rischiano di essere sovraccaricati provocando problemi al funzionamento di tutti gli esperimenti.

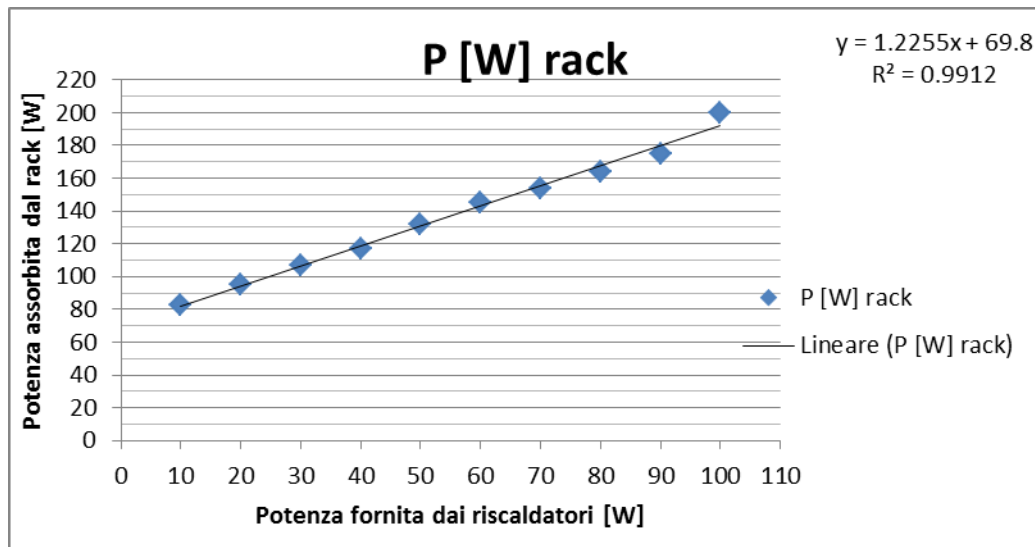


Figura 2-31 Grafico rappresentante la Potenza totale assorbita dal rack in funzione della Potenza fornita ai riscaldatori

### 2.3.14 Reperimento materiali per la costruzione del rack

Durante la progettazione una buona parte del tempo è stata impiegata nella ricerca e nel recupero di tutti i materiali e gli strumenti necessari per poter completare il rack. Alcuni strumenti erano già disponibili nei laboratori del Politecnico di Milano e dell'università di Bergamo. Tra questi, per fortuna, erano già presenti il PC e il data logger [25]. Per quanto possibile l'intenzione iniziale era quella di avere un backup per ogni strumento, essendo però l'impresa di per sé ardua, i tempi ristretti e le ispezioni l'hanno resa impossibile. In aggiunta le lungaggini burocratiche hanno peggiorato i tempi di consegna dei materiali ordinari e l'elevato costo di un data logger [25] di riserva avrebbe reso l'operazione impossibile. Le prime cose che è stato necessario reperire sono i profili di alluminio per assemblare le strutture delle gabbie. Secondo le regole di Novespace [13] è obbligatorio usare dei profili certificati. Nel nostro caso abbiamo scelto i profili d'alluminio prodotti dalla società Item [29] della serie 5 e 6, cioè con sezioni 20x20mm e 30x30 mm rispettivamente. Una volta deciso il numero di profili necessario e le varie misure, tramite il sito internet [29] è stato possibile effettuare l'ordine. Oltre allo stretto necessario sono state ordinate delle barre aggiuntive delle due serie, in modo da poter ricavare pezzi aggiuntivi in caso di variazioni e/o imprevisti. La Item avrebbe potuto fornire già tutti i profili tagliati e forati per permettere l'accesso delle chiavi a brugola per serrare i set di attacco universale, oltre che a mandare i fori interni dei profili già filettati. I costi elevati hanno però indotto ad eseguire in laboratorio queste ultime lavorazioni. L'ordine comprende anche squadre e

angolari per rafforzare le strutture. Si è presentata inoltre la necessità di comperare delle maschere utensili per forare. Dal sito Item [24] è stato anche utile poter scaricare i file CAD dei vari pezzi ordinati, grazie a questa possibilità si è semplificato molto l'ottenimento dei disegni accurati e ben fatti per le varie strutture. E' stato così facile avere un'efficace anteprima di quello che sarebbe uscito una volta montato il tutto (vedi varie rappresentazioni CAD). Qualche nota in più va dedicata alla ricerca della lamiera forate. Item fornisce un unico tipo di lastra forata che però non rispecchiava i requisiti di leggerezza e possibilità di passaggio dell'aria attraverso di essa. Non sapendo con precisione quale sarebbe stato il peso finale in questa fase si è cercato di prendere componentistica il più possibile leggera nei limiti del ragionevole e compatibile con le possibilità economiche. Il compromesso migliore lo si sarebbe ottenuto utilizzando lamiera con un rapporto vuoto/pieno intorno al 45% e con uno spessore di circa 3mm. A questo punto è stata svolta una ricerca più approfondita interpellando varie aziende della zona:

- Mevaco [31]
- Graepel [32]
- Rmig [33]
- Gatti Precorvi [34]
- L.P.S. lamiere preforate speciale [35]
- Actis Furio [36]

Il problema col quale ci si scontra è la necessità di ordinare solo grandi quantitativi. Tutti coloro che forniscono lamiera forate su misura e in piccole quantità, invece, hanno dei prezzi esagerati in confronto al budget stabilito e al costo effettivo della produzione dell'oggetto in questione per via della possibilità di personalizzare. Infine, a livello di peso, abbiamo dovuto accettare  $4.6 \text{ kg/m}^2$  invece di  $4 \text{ kg/m}^2$ , ordinando da da Ambrogio Colombo S.r.l. [39]. Per quanto riguarda il materiale elettrico è stata effettuata una ricerca in rete con relativo ordine sui siti internet di RS [37] e GBC [38]. Sono stati ordinati tutti i fusibili coi relativi portafusibili, le rispettive scorte di emergenza e la multipresa. In principio quest'ultima era stata prevista con 5 prese disponibili, successivamente, per questione di ingombri e posizionamento, è stata sostituita con una da 4, numero minimo indispensabile per alimentare tutto il necessario. Particolare attenzione è prestata per i fusibili, quelli ad uso automobilistico non sarebbero stati accettati dalle regole di Novespace [13]. Erano anche stati proposti dei portafusibili con led segnalatore in caso di guasto, questi sarebbero stati il meglio per individuare malfunzionamenti,



tuttavia sono stati rifiutati perché non rapidi. I termoprotettori [30] sono stati oggetto di una travagliata ricerca, in primo luogo essi dovevano funzionare nel campo di temperature a noi interessato, inoltre avrebbero dovuto avere dimensioni compatte dato che sono stati inseriti all'interno del PEEK [18] nella zona dei riscaldatori. Inoltre tutte le aziende produttrici forniscono solo grandi quantità, così, grazie alla richiesta di campionario gratuito, si è riusciti ad ottenere la piccola quantità desiderata (AGG) . Sono inoltre stati ordinati tutti gli attacchi necessari per effettuare i collegamenti. I cavi sono stati terminati grazie a dei capicorda a crimpare anch'essi ordinati da RS [37]. Gli attacchi a mammut sono stati scartati per via della possibile erosione del cavo provocata dalle vibrazioni.

### **2.3.15 Riflessioni logistico-amministrative e progettuali**

Come nota finale a questa fase logistico-amministrativa e della produzione di tutto l'apparato, si può affermare che tutte le operazioni di ricerca dei materiali e dei prodotti necessari per svolgere una qualsiasi attività di laboratorio con la peculiarità di creare sistemi quasi unici nel loro genere sia di fondamentale importanza. Spesso è trascurata la ricerca approfondita dei componenti che si ha intenzione di acquistare e l'analisi delle schede tecniche non è ottimale. Una buona impostazione di questo tipo di attività, seppur non prettamente tecnica, deve comunque essere ben padroneggiata da un buon ingegnere, una figura senza adeguate conoscenze tecniche non sarebbe in grado di rispondere celermente e direttamente a delle possibili variazioni del prodotto trattato in fase di valutazione. L'analisi preliminare e approfondita delle schede tecniche è poi di vitale importanza per minimizzare spiacevoli sorprese durante l'assemblaggio e le prove di funzionamento. La sensibilità sperimentale dovrebbe portare ad aver ben chiaro quello che si vuole ottenere e insegnare a gestire nella maniera meno improvvisata qualsiasi eventualità. Ogni cosa non pensata, per esperienza, rischia di portare gravi problemi, per questo è necessario acquisire una visione più generale possibile sulla progettazione. Non sempre ciò è possibile, progetti di dimensioni e complicatezze rilevanti sono chiaramente esclusi da questo insieme; però provare a seguire, anche solo a livello di supervisione generale, tutte queste fasi di design e lavorazione porta a migliorare la metodologia di lavoro e l'efficacia del tempo impiegato. Si può riassumere tutto quanto all'interno della parola "qualità". Qualità nella scelta del prodotto ottimale sul mercato sfruttando al massimo anche i canali forniti da internet, qualità nella programmazione del lavoro, qualità nella gestione dei tempi e degli spazi, qualità nella visione dei possibili sviluppi futuri e utilizzazioni. Grazie a questi accorgimenti ci si trova di fronte ad un rack non "usa e getta", utilizzato anche al di là della prima campagna di volo parabolico,

grazie a piccole modifiche, per test in condizioni di ipergravità. Si può allora affermare quanto non sia sufficiente conoscere a fondo gli obiettivi scientifici e i metodi per ottenerli, in qualsiasi attività di laboratorio è necessario avere una visione globale ed impegnarsi per ottimizzare sin dalla nascita gli apparati costruiti ed utilizzati, ottimizzandone l'utilizzazione e rendendo pratiche e semplice le varie operazioni da svolgere per poi potersi concentrare ampiamente sull'analisi scientifica dei dati senza incontrare difficoltà nel cuore del lavoro per via di incombenze tecniche. In tutto questo una grossa nota di demerito va fatta a una delle grandissime barriere che purtroppo affligge quasi tutte le attività italiane: la burocrazia. Essa causa sempre disordini e ritardi nelle tabelle di marcia, sebbene il suo compito sia quello di donare rigore alle operazioni svolte evitando irregolarità e truffe, sembra spesso imporre regole non molto sensate che non ricalcano realmente il principio per il quale sono state coniate. Gli ordini di materiale sono sempre ritardati e mettono in seria difficoltà la programmazione nonostante sia già stata pensata per assorbire questi rallentamenti; un esempio lampante è dato dalle resistenze dei riscaldatori: appena recapitati il prodotto era sbagliato, per farlo cambiare è stato necessario attendere un mese e il backup è arrivato dopo la campagna di volo parabolico.

## **2.4 Procedura sperimentale**

È importante descrivere la funzione di tutti i singoli componenti presenti sul rack in modo da chiarire come avviene l'acquisizione dei dati e che funzione possiedono ai fini dello svolgimento dell'esperimento:

- Ventilatori [21]: hanno la funzione di dissipare il calore disperso dal condensatore coadiuvati dal sistema di alette.
- Riscaldatori [19]: servono per simulare il carico termico che realmente potrebbe derivare ad esempio da della componentistica elettronica.
- Sensore di pressione [23]: ha la funzione di monitorare la pressione all'interno del serpentino di rame e avvisare in caso di sovrappressioni.
- Termocoppie: sono lo strumento per l'acquisizione dei valori di temperatura in vari punti del sistema. Le tre principali zone monitorate sono: evaporatore (9 termocoppie), condensatore(4 termocoppie), aria ambiente in ingresso e uscita dalle alette (2 termocoppie).
- Sensore di gravità [24]: si è deciso di optare per un sensore di gravità direttamente sull'involucro della PHP al posto di basarsi unicamente sui dati dell'accelerometro messo a disposizione da Novespace sull'aereo. Con questo abbiamo a disposizione i dati riguardanti le accelerazioni

subite dal sistema in prossimità dell'oggetto interessato, tenendo conto anche delle vibrazioni che ne hanno influenzato il comportamento.

- Data logger [25]: la sua funzione peculiare è quella di acquisire i dati provenienti da termocoppie, sensore di gravità e sensore di pressione. Su di esso viene caricato direttamente il programma compilato in Labview, esso sarebbe quindi in grado di continuare ad acquisire anche in caso di fermo del PC. Il file in formato “.dat” creato alla fine dell'acquisizione viene salvato direttamente sul suo disco rigido. Successivamente esso può essere scaricato direttamente sul PC conoscendo l'indirizzo FTP del dispositivo. Il data logger è anche il collo di bottiglia sulla frequenza di acquisizione: a causa del limite fisico provocato dallo slot per le termocoppie non è possibile superare una frequenza di acquisizione pari a 16 Hz anche se si sarebbe potuto fare di meglio grazie ad una migliore gestione della programmazione.
- PC: la sua funzione primaria è quella di permettere di visualizzare in tempo reale l'andamento dei vari parametri acquisiti dal data logger e tenere quindi sotto controllo lo svolgersi dell'esperimento. L'interfaccia del software utilizzato è stata modificata per essere più semplice e intuitiva possibile. Il PC è inoltre utilizzato per scaricare il file con le acquisizioni ad ogni fine serie di parabole per tutelarsi da qualsiasi perdita accidentale di dati sul disco rigido del data logger. Dal PC è poi possibile regolare manualmente i valori di potenza forniti alle resistenze, spegnere l'alimentatore, interrompere l'acquisizione dei dati e riprenderla per esempio su un nuovo file. Si è optato per un cambio manuale delle potenze trasmesse al riscaldatore poiché i tempi tra una parabola e l'altra non possono essere predetti con grande accuratezza: possono sempre subire variazioni più o meno importanti per via di difficoltà nelle manovre, turbolenze o traffico aereo nelle zone di volo.
- Multipresa Novespace: oltre che a fornire l'alimentazione a tutto il rack è importante notare che al suo interno contiene tutta la strumentazione per garantire la sicurezza elettrica. Fondamentale il tasto rosso di emergenza che serve per disattivare il circuito in caso di gravi malfunzionamenti togliendo istantaneamente l'alimentazione. Inizialmente si era pensato di posizionarla nella parte anteriore del rack, tuttavia sarebbe stato troppo alto il rischio di attivare accidentalmente il tasto di emergenza magari durante un passaggio da 0g a 2g. E' stata quindi prevista nella parte posteriore del rack. Qui però risultava piuttosto difficoltoso attivare il tasto rosso di emergenza, soprattutto poiché l'orientazione finale con cui è stato disposto l'esperimento prevedeva l'ingombro della parete dell'aereo. Infine, discutendo con i

responsabili della sicurezza, si è deciso di imbullonarla direttamente alle guide sull'aereo a lato del rack, dato che sarebbe stata la posizione più comoda e meno fastidiosa per tutti.

- Alimentatore riscaldatori [20]: ha la funzione di fornire potenza termica alle resistenze nella zona di evaporazione, esso è comandato in maniera remota dal data logger, è tuttavia sempre possibile impostare tramite i comandi manuali la potenza che si vuole fornire. Il tasto che permette di passare al controllo manuale è reso appositamente di difficile accesso tramite un angolare imbottito per impedire di schiacciarlo accidentalmente e perderne quindi il controllo.

Qui sotto è riassunto in un'immagine in maniera schematica quanto descritto sopra.

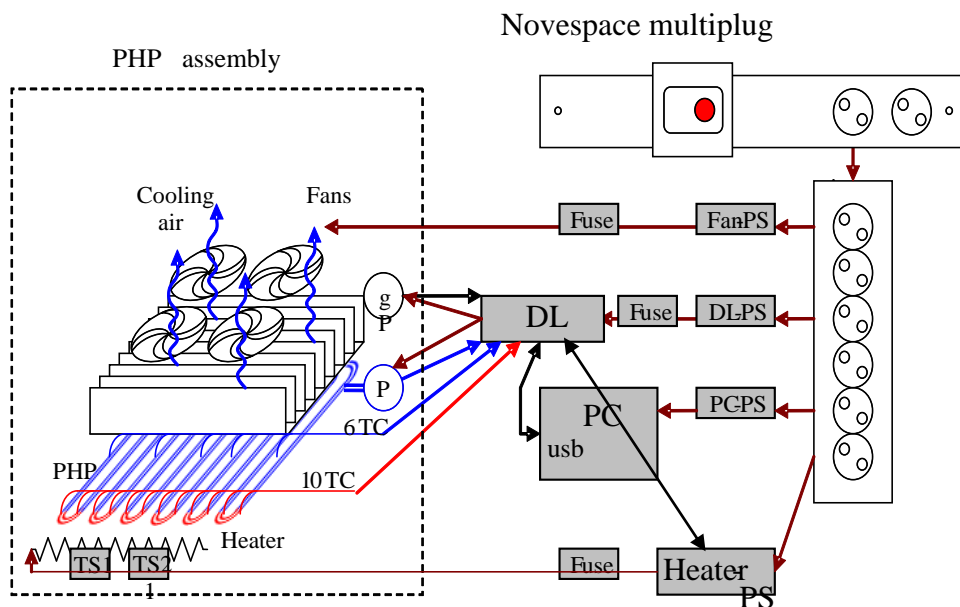


Figura 2-32 Schema logico di funzionamento del rack

### 2.4.1 Approfondimento sensore di gravità [24]

Grande rilevanza ha avuto la ricerca del sensore di gravità. Per le prove effettuate è molto importante monitorare l'effetto dell'accelerazione sul componente in analisi. La cosa non trascurabile è poi la necessità di resistenza

al “colpo” pari a 9g che si potrebbe avere durante l’atterraggio. Gli accelerometri sono ormai piuttosto comuni sul mercato e anche di dimensioni ridotte (basti pensare che sono presenti ormai in moltissimi cellulari), tuttavia a noi serve qualcosa di già integrato e pronto all’uso solo installandolo sulla struttura e collegandolo direttamente al data logger. La ricerca è stata piuttosto complessa poiché sul mercato sono presenti quasi unicamente componenti da integrare. Purtroppo le tempistiche ristrette e la mancanza di conoscenze hanno portato a scartare queste possibilità. Sono poi stati trovati accelerometri di altissima qualità per uso militare e resistenti a ottime condizioni ma a prezzi spropositati. Altro criterio che ridimensiona la scelta è il fondoscala, dato che a noi servono strumenti in grado di rilevare almeno un’accelerazione di 2g mentre spesso sul mercato si trovano fondoscala a 1.8g.

#### **2.4.2 Approfondimento sensore di pressione [23]**

Anche in questo caso è elevata la necessità di rispettare criteri di riduzione di ingombri, fondoscala e accuratezza delle misurazioni. La condizione più stringente è proprio quella riguardante l’ingombro dato che poi lo strumento di misura è applicato direttamente sull’involucro della PHP, precisamente nella zona di condensazione. Inoltre è stato importante cercare di metterlo più vicino possibile alla PHP per evitare che nel canale di collegamenti si formasse del liquido che potesse danneggiare lo strumento e/o falsare le misure.

#### **2.4.3 Note sistema e logica di acquisizione**

La logica di acquisizione e gestione della componentistica è anch’essa ben organizzata. Purtroppo inconvenienti di software hanno dato alcuni problemi di gestione successiva dei dati. Il primo giorno di volo parabolico si è infatti acquisito ad una frequenza di 10 Hz mentre nei giorni successivi e nelle prove a terra a 16 Hz. La logica della programmazione non è ottimale: in seguito alla campagna, interpellando un esperto di Labview, si è scoperto che il limite di acquisizione è dovuto a non corretta gestione dei cicli durante la scrittura del programma. Sarebbe sufficiente acquisire le temperature a frequenze vicine a 2Hz per poter sfruttare la restante disponibilità dell’hardware acquisendo a frequenze più elevate la pressione (ad esempio 50-100 Hz). Le acquisizioni non risultano poi equidistanti nel tempo poiché Labview sceglie casualmente la grandezza da acquisite per prima. In conclusione possiamo definire la parte software migliorabile, tuttavia, in una visione globale dell’attività svolta, non possiamo recriminarci nulla: i tempi erano molto ristretti e creare un software

affidabile e funzionante con un'interfaccia ottimale nelle tempistiche che ci sono state imposte è un'impresa che rasenta l'impossibile. È stato piuttosto un grande traguardo ottenere dei risultati di questa qualità in così poco tempo.

#### **2.4.4 Modifiche apportate per test successivi in ipergravità**

A seguito della campagna di volo parabolico sono state progettati e in parte eseguiti dei combiamenti per poter portare la PHP ad essere testata sulla centrifuga dell'ESA in condizioni di ipergravità. Vista l'esperienza acquisita con la strumentazione in analisi e l'approfondita conoscenza dei particolari del rack, si è deciso di implementare anche queste modifiche. Partendo dal rack progettato per il volo parabolico si è presentata la necessità di dislocare la PHP col suo supporto lontano da tutte le apparecchiature di controllo e acquisizione dati. Per questo si è deciso mantenere tutto il rack come in origine smontando però la PHP da esso mantenendola sul supporto verticale modificato per poter reggere gli sforzi ai quali sarebbe sottoposto in condizioni di accelerazione pari a 10g lungo l'asse Z, cioè rivolti verso il basso (il dimensionamento per atterraggio di emergenza del volo parabolico è stato realizzato con l'accelerazione di 9g lungo i due assi X e Y dell'aereo). Proprio per questo motivo le due colonne verticali che sorreggono il contenitore della PHP e il castello dei ventilatori sono state spostate il modo da poter inserire dei supporti per far scaricare su di essi parte del peso. Questi ultimi sono stati realizzati tramite due barre filettate inserite da una parte in un nottolino all'interno delle scanalature dei profili e dall'altra in un lungo dado, bloccato con un controdado, che ha la funzione di regolare l'altezza al punto giusto per permettergli di toccare appena il contenitore della PHP. È possibile raccogliere tutte le informazioni sulla PHP da un lavoro in parallelo che è stato svolto dall'Università degli Studi di Bergamo

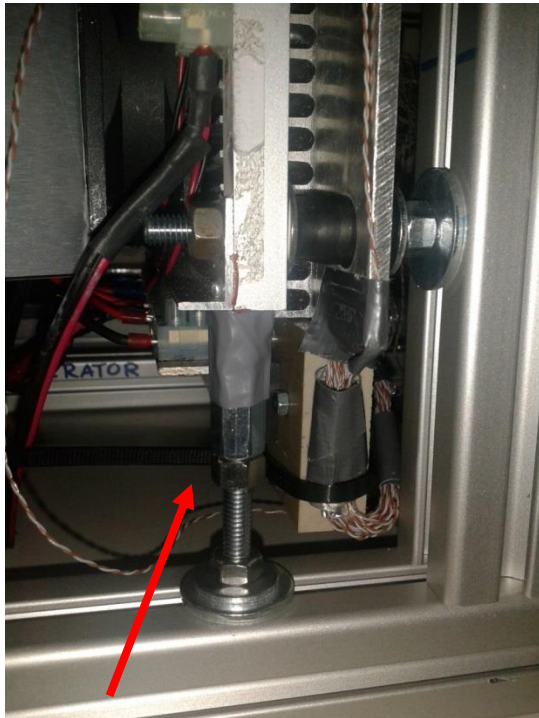


Figura 2-33 Particolare del support aggiunto per sopportare il peso in ipergravità

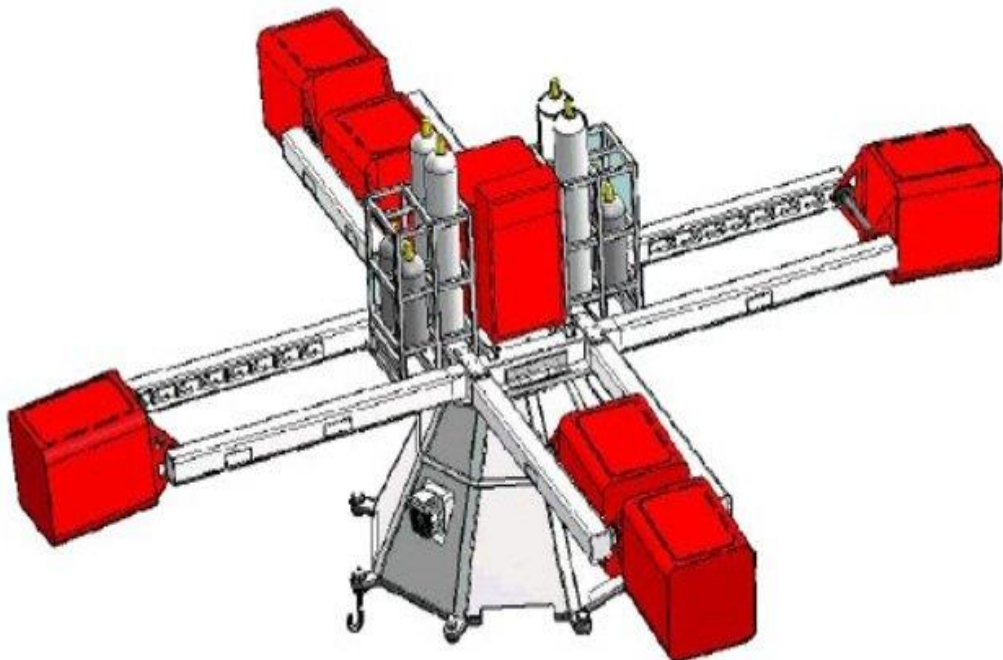


Figura 2-34 centrifuga per test in ipergravità





### 3 Prove a terra

I test a terra servono per capire in maniera preliminare il comportamento della PHP e dare un'anticipazione di quello che succederà in volo. La procedura principale per capire il comportamento termico del dispositivo è quella di fornire vari livelli di potenza termica e lasciare che esso vada a regime, nel nostro caso è importante sottolineare che sarà raggiunto uno pseudo stato stazionario vista l'instabilità intrinseca del moto dei fluidi all'interno PHP. Come anticipato all'interno del capitolo 1, il moto all'interno della PHP è anche influenzato dalla gravità; è quindi interessante osservare gli effetti dell'inclinazione di tale vettore rispetto alla direzione principale del moto. Per verificare l'intuizione secondo cui la PHP in posizione orizzontale dovrebbe avere lo stesso comportamento rispetto al caso in assenza di gravità, è utile osservare i risultati a terra con questa orientazione. Inoltre, per mostrare al meglio gli effetti del campo gravitazionale, è interessante studiare a terra la PHP nella posizione che maggiormente è soggetta all'effetto della forza peso, cioè quella verticale. I fenomeni che coinvolgono ebollizione e cambiamento di fase sono spesso soggetti a fenomeni d'isteresi: per questo è interessante osservare i comportamenti della PHP con valori di potenza termica crescenti e poi decrescenti in entrambe le orientazioni. Le prove svolte sono quindi:

- Caratterizzazione della PHP in posizione orizzontale con potenza termica da 10 a 100W
- Caratterizzazione della PHP in posizione orizzontale con potenza termica da 100 a 10W
- Caratterizzazione della PHP in posizione verticale con potenza termica da 10 a 100W
- Caratterizzazione della PHP in posizione verticale con potenza termica da 100 a 10W

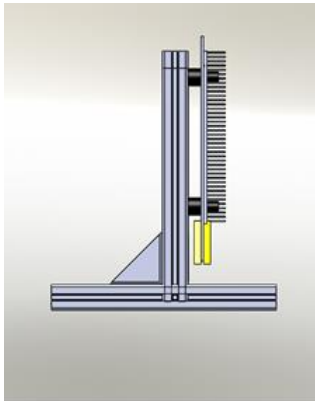


Figura 3-1 PHP in posizione verticale

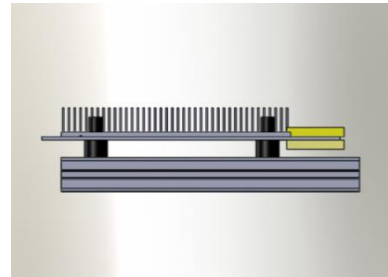


Figura 3-2 PHP in posizione orizzontale

Può risultare utile confrontare i livelli di potenza coi rispettivi flussi termici areici per confrontare i dati con altri sistemi di scambio termico

Potenza [W]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Flusso termico areico [W/cm <sup>2</sup> ]	1.17	2.34	3.51	4.69	5.86	7.03	8.20	9.38	10.55	11.72

Utilizzando la relazione:

$$q'' = \frac{q}{2n\pi D_i L_e} \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Equazione 3-1 Calcolo flusso termico areico

Con:

- q: potenza fornita dai riscaldatori [W]
- n: numero di curve [-]
- D<sub>i</sub>: diametro interno [m]
- L<sub>e</sub>: lunghezza evaporatore [m]

### 3.1 Caratterizzazione della PHP in posizione orizzontale da 10W a 100W

Con questa prova possiamo ricavare le caratteristiche termiche della PHP ai vari regimi di potenza crescenti e determinarne le rispettive prestazioni. Ogni volta è stato raggiunto il regime stazionario attendendo 20 minuti ad ogni

aumento di potenza. Possiamo notare come per potenze molto basse, ad esempio 10W, il dispositivo in questione si comporti come puramente conduttivo: la transizione di fase non è attiva. A 20W possiamo osservare un repentino abbassamento delle temperature all'evaporatore con conseguente miglioramento dello scambio termico: si innesca il moto all'interno del condotto e viene attivata la transizione di fase. Si può allora osservare il funzionamento corretto del dispositivo il quale raggiunge uno pseudo regime stazionario al suo interno. Non tutte le termocoppie registrano però questo comportamento, possiamo osservarne meglio il dettaglio a parte. Per elevate potenze tutte le temperature rimangono in una fascia di valori tutti prossimi tra loro senza avere distacchi netti come succede nel caso verticale: il funzionamento in orizzontale peggiora le prestazioni in maniera tale da renderle poco distinguibile dalle condizioni in cui vi sia dry-out all'evaporatore, alcune zone sembrano invece non attivarsi del tutto. Un esempio lampante è dato dalla TC\_4 che rimane a una temperatura sempre più alta di tutte le altre e non subisce un brusco abbassamento, in questo caso è molto probabile che una bolla di vapore nella curva del serpentino dove è saldata questa termocoppia, rimanga bloccata e non riesca a smuoversi (condizione di dry-out). La pressione si comporta piuttosto regolarmente, inizia ad oscillare nel momento in cui la PHP inizia a pulsare; la frequenza di oscillazione è minore rispetto al caso verticale (vedi prove successive), il moto non è coadiuvato dalla forza di gravità di conseguenza le pulsazioni rilevate dal sensore di pressione sono meno intense.

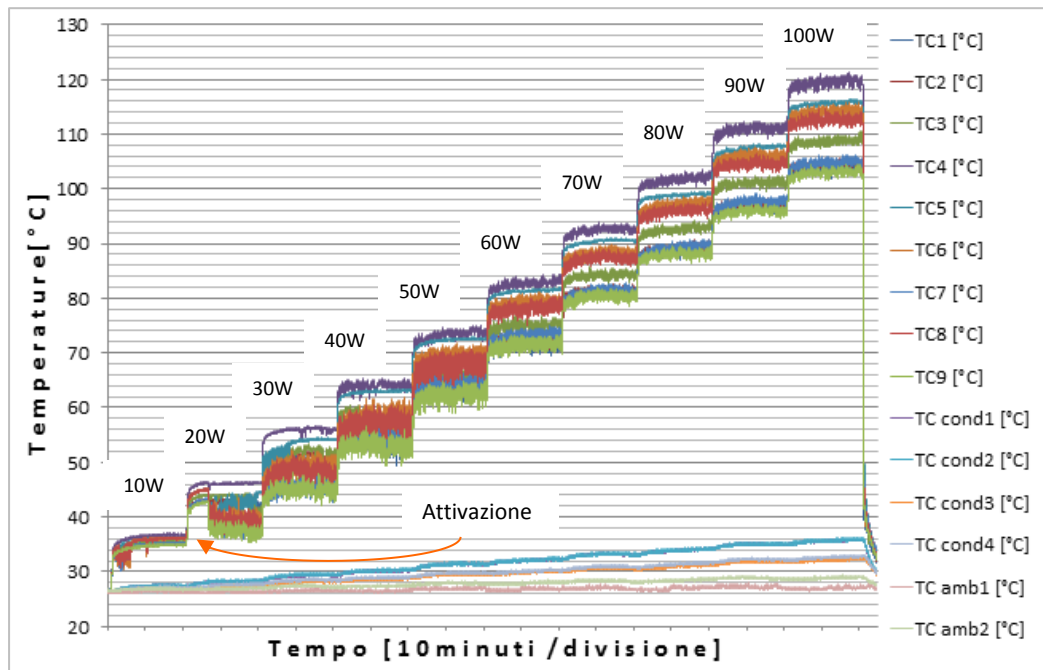


Figura 3-3 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale (salita)

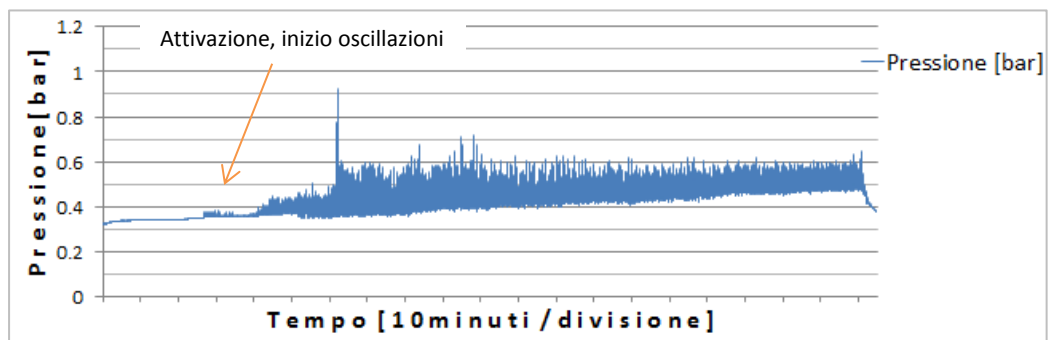


Figura 3-4 Pressione rilevata dal sensore nel tempo

Possiamo vedere qui sotto il particolare di quando la potenza arriva a 20W, le temperature tendono ad abbassarsi di colpo e ad assumere un andamento più irregolare: si innescano i fenomeni di instabilità. Possiamo osservare il particolare delle temperature Tc2, Tc4 e Tc6: sembrano sul punto di innescarsi. Tuttavia, invece di assumere un comportamento oscillatorio e instabile come tutte le altre temperature misurate per via del continuo bagnarsi e asciugarsi della superficie dell'evaporatore, riprendono un andamento molto regolare come se quella zona stesse lavorando solo per conduzione come prima di questo istante. Sembra infatti che esse non si attivino durante tutta la caratterizzazione. Non abbiamo temperature che, durante la caratterizzazione, assumono valori molto distanti dalla media ma solamente una fascia di

temperature che diventa man mano più ampia e con meno oscillazioni. Risulta quindi evidente la presenza di un dry-out parziale dell'evaporatore.

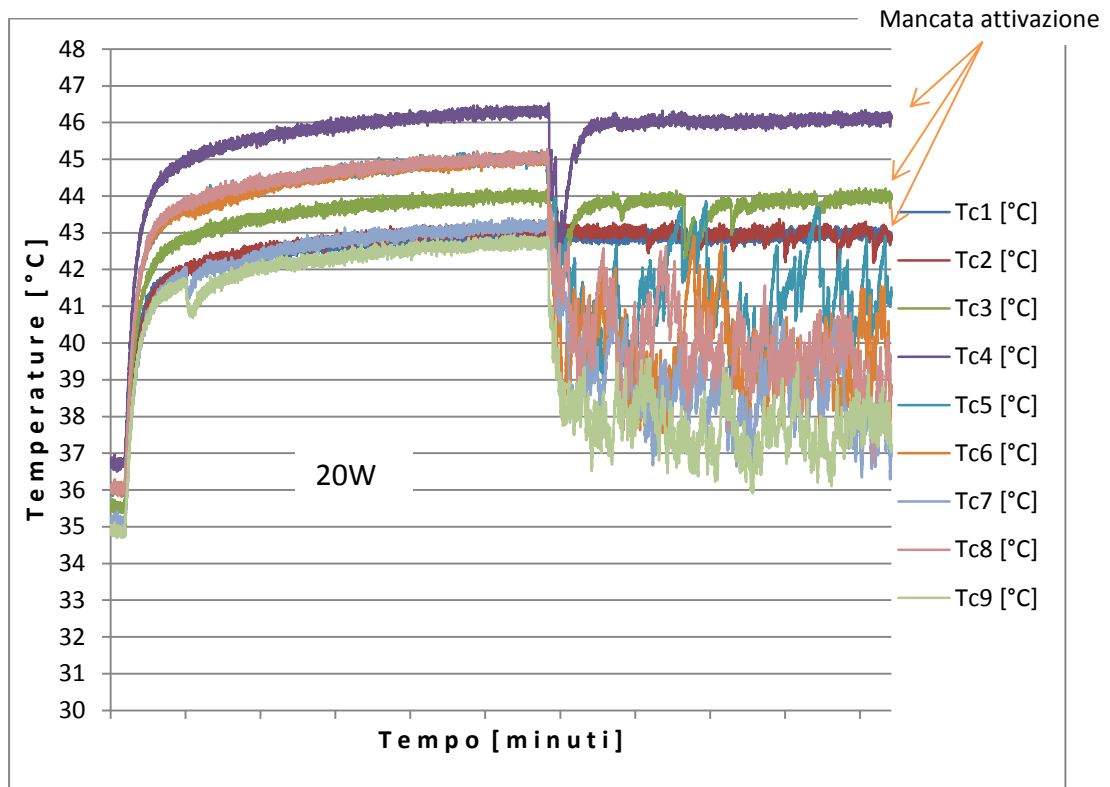


Figura 3-5 Temperature evaporatore, condensatore, particolare attivazione transizione di fase a 20W

### 3.2 PHP orizzontale da 100W a 10W

Anche questa prova serve per ricavare le prestazioni termiche della PHP a varie potenze, in particolare possiamo sfruttare il confronto tra salita e discesa di potenza per osservare l'eventuale presenza di fenomeni di isteresi tipici dell'ebollizione. Interessante notare come a 20W e a 30W ci siano due gruppi distinti di temperature che hanno una differenza di temperature di anche 5°C, sono quindi due fasce molto ben distinte e differenziate mentre nel caso della salita questa discrepanza non è così marcata. Nella discesa, infatti, la transizione di fase già attivata tende a rimanere attiva facendo lavorare meglio una parte maggiore di canali del serpentino di rame. Non abbiamo comunque una completa disattivazione di tutti i canali prima dei 10W. L'andamento della pressione è abbastanza regolare anche se molto oscillatorio nella parte centrale di corretto funzionamento. Alla partenza notiamo un picco di pressione causato dall'improvviso aumento di potenza da 0 a 100W

provocando evidentemente delle forti ebollizioni locali che imprimono velocità al fluido, causando colpi d'ariete nella zona del sensore.

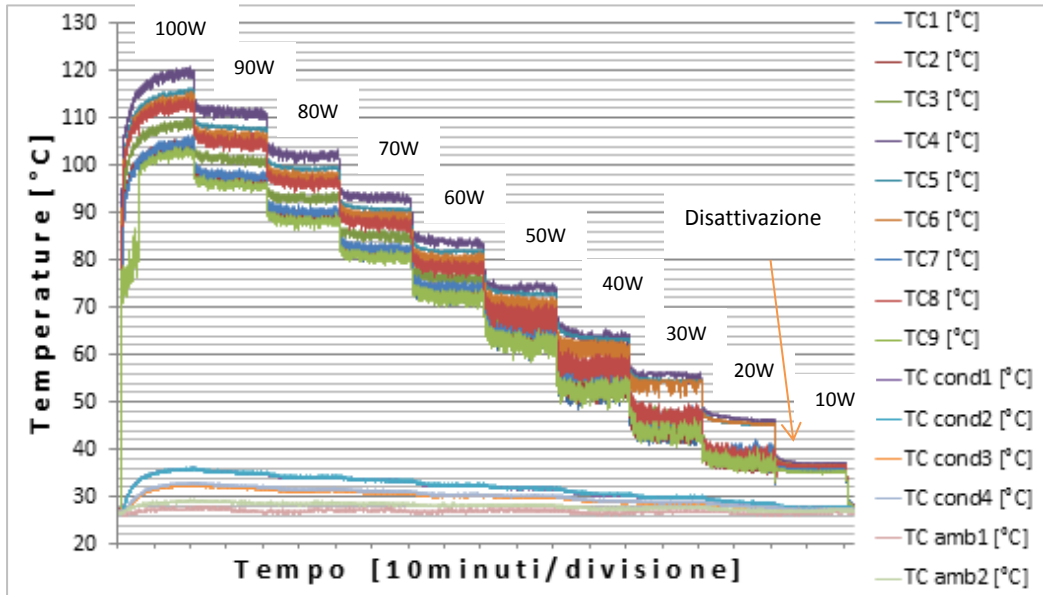


Figura 3-6 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale (discesa)

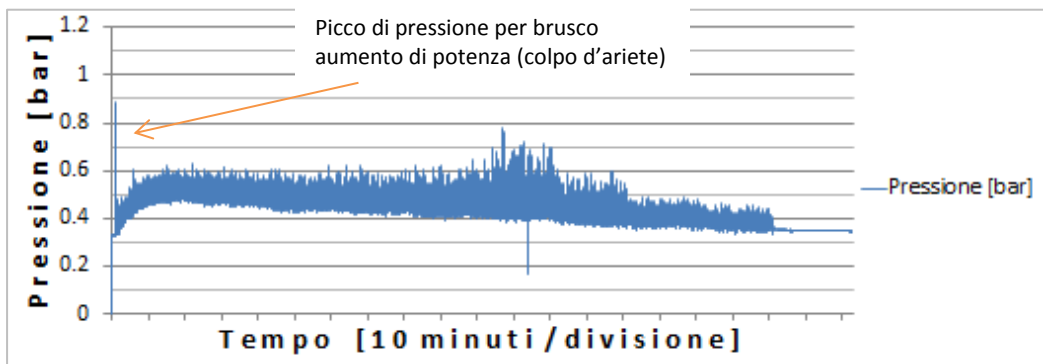


Figura 3-7 Pressione rilevata dal sensore nel tempo

### 3.3 PHP verticale da 10 a 100W

La caratterizzazione in verticale permette di osservare molto meglio i fenomeni di attivazione della transizione di fase e il blocco di alcuni canali per via della formazione di tappi di vapore bloccati nelle curve dell'evaporatore. Rispetto al caso orizzontale le prestazioni sono decisamente migliori poiché la gravità aiuta le bolle di vapore a salire nella parte alta (condensatore) e il liquido a ritornare in quella bassa (evaporatore). Le temperature nella zona di evaporazione sono

quindi mediamente più basse per ogni regime di potenza rispetto al caso orizzontale. A 50W si può notare molto bene l'innescarsi del corretto funzionamento della PHP proprio grazie al repentino abbassamento delle temperature all'evaporatore. A 90W, invece, alcuni canali iniziano a disinnescarsi per via della formazione di tappi di vapore: siamo in presenza di un principio di crisi termica che porta via via al peggioramento delle prestazioni bloccando man mano parte dell'evaporatore per via del dry-out. A 100W altri canali si bloccano e perdiamo completamente la possibilità di mantenere l'evaporatore circa isoterma: a questi livelli di potenza si presenta un cambio di regime di moto nell'evaporatore provocato dall'ebollizione nucleata. Possiamo notare un picco di pressione nel momento in cui il sistema della PHP si attiva, esso è dovuto al transitorio molto instabile che può portare all'esplosione di bolle con relativo colpo d'ariete vicino al sensore di pressione.

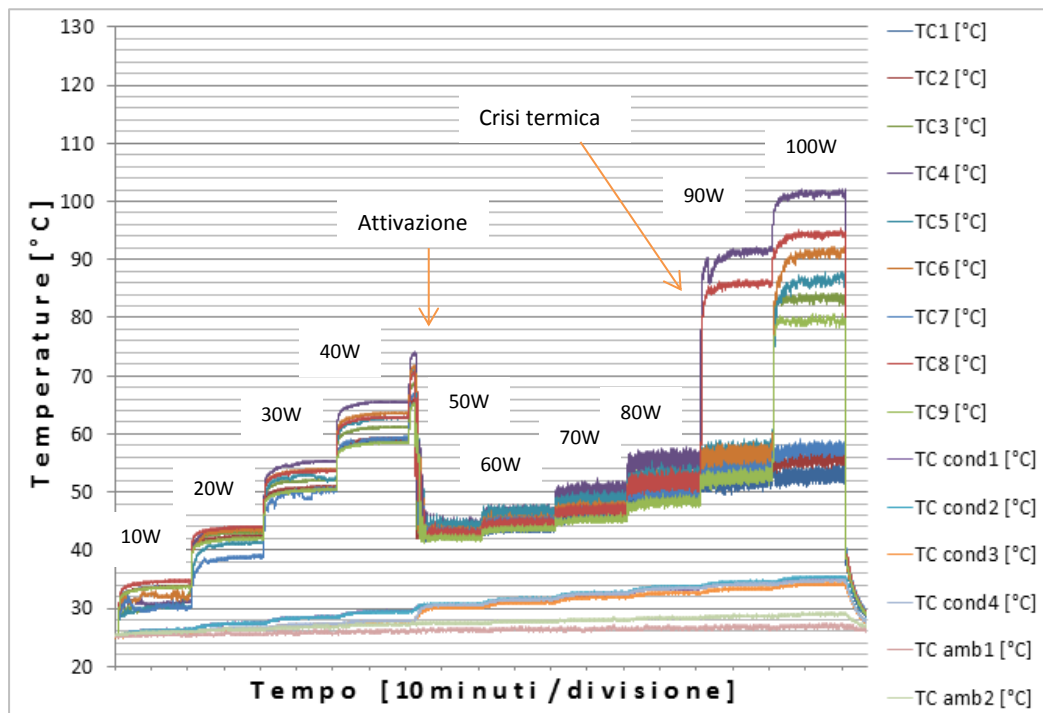


Figura 3-8 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale (salita)

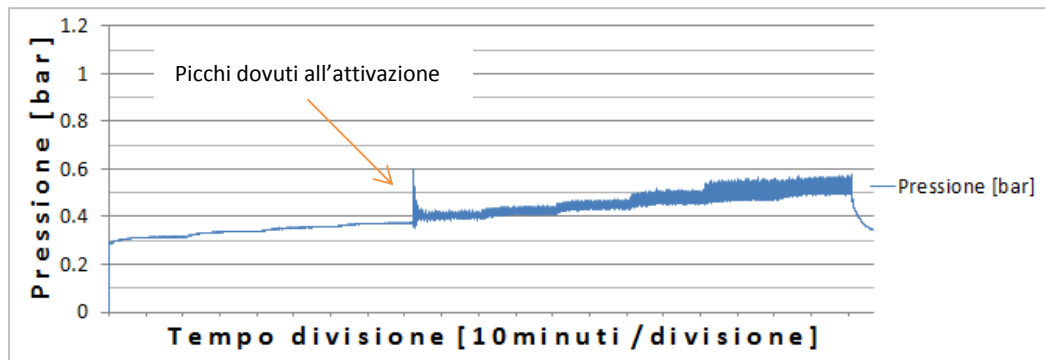


Figura 3-9 Pressione rilevata dal sensore nel tempo

### 3.4 Particolare attivazione transizione di fase

Possiamo osservare una differenza di temperatura di anche 25°C tra la situazione con transizione di fase attiva e non attiva, l'andamento delle temperature diviene poi molto più irregolare per via della continua alternanza tra formazione di vapore e arrivo di condensato nella parte calda. In questo caso sembra che la PHP sia completamente attivata: tutte le temperature si abbassano in un lasso di tempo molto ristretto (circa 2.5 minuti) e assumono un comportamento oscillatorio; questa completa attivazione tipica dell'orientazione verticale offre comunque prestazioni termiche migliori rispetto all'orizzontale. Con la PHP in verticale tutte le temperature si abbassano in una fascia inferiore portando ad un netto miglioramento del comportamento termico del dispositivo. Possiamo confermare che tutti i canali si sono attivati e funzionano regolarmente bagnando e asciugando continuamente la superficie in modo da ottimizzare lo scambio termico che sfrutta quindi al massimo il vantaggio dovuto all'entalpia di transizione di fase.



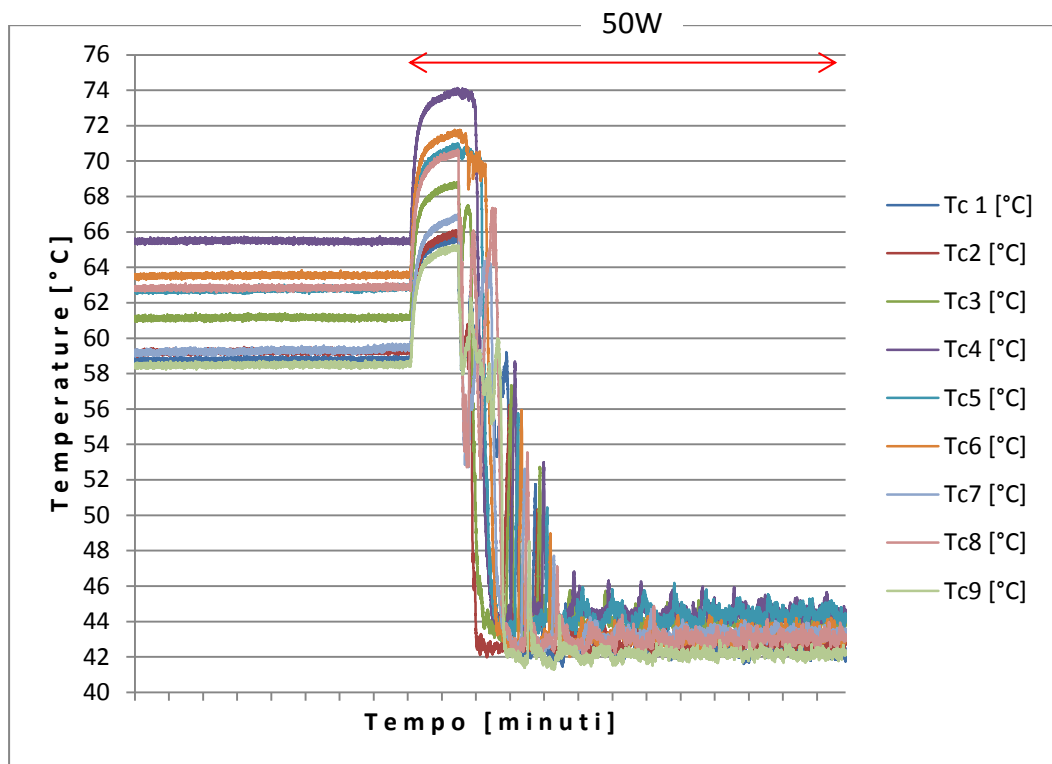


Figura 3-10 Temperature evaporatore, condensatore, particolare attivazione transizione di fase a 50W

### 3.5 PHP verticale da 100W a 10W

Come in orizzontale usiamo questa prova per verificare la presenza di fenomeni di isteresi che, in questa configurazione, si notano con grande evidenza. Alla partenza, con potenza a 100W, si registrano cinque temperature fuori dalla fascia più bassa; nel caso della salita sono sei. Avendo attivato immediatamente i riscaldatori alla massima potenza senza raggiungerla in modo graduale, i centri di nucleazione si attivano con più fatica: abbiamo quindi una zona più ristretta di evaporatore in dry-out per via dell'isteresi. Tuttavia, come diminuisce la potenza, abbiamo un numero maggiore di temperature lontane dalla media rispetto a quanto registrato con potenza in salita. L'isteresi assume quindi un ruolo fondamentale anche ad alti livelli di potenza: impedisce alla transizione di fase di disattivarsi con potenza termica in discesa, lasciando una parte più ampia di evaporatore in dry-out rispetto al caso con potenza in salita.

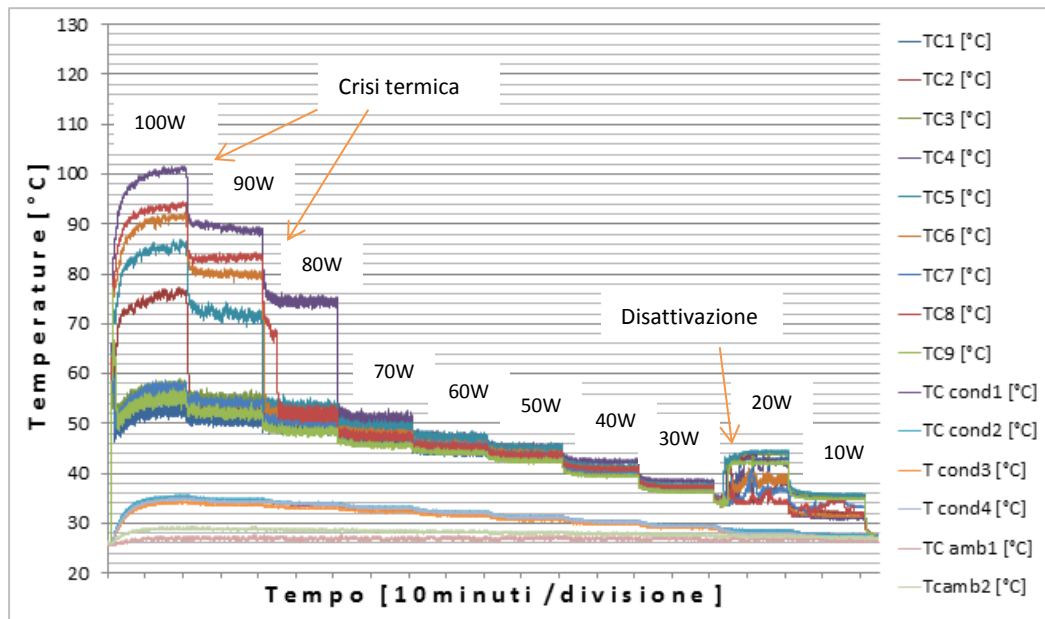


Figura 3-11 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale (discesa)

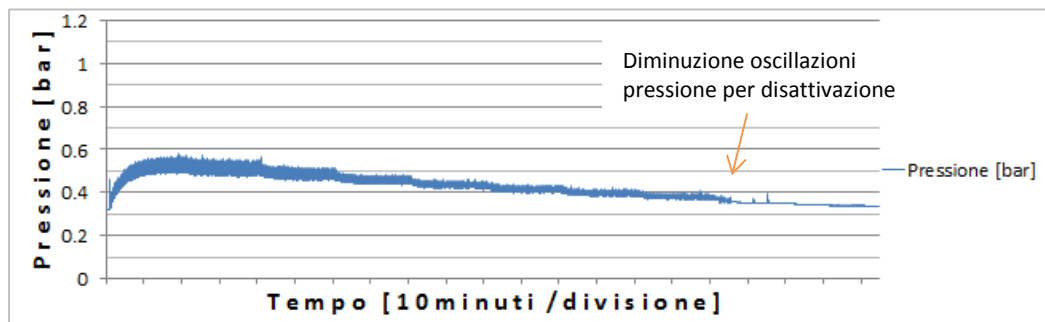


Figura 3-12 Pressione rilevata dal sensore nel tempo

### 3.6 Particolare disattivazione transizione di fase

Una volta raggiunto lo stato pseudo stazionario, nel caso della salita appena raggiunti i 100W, il funzionamento della PHP è ottimale: tutte le temperature giacciono in fasce omogenee per ogni step di potenza. La cosa interessante diventa la disattivazione della transizione di fase dovuta alla diminuzione dell'energia fornita. Sotto un certo limite non si riesce, infatti, a mantenere l'ebollizione. Anche qui si può osservare un evidente fenomeno di isteresi: la disattivazione avviene a 20W con un repentino innalzamento delle temperature dell'evaporatore (da 35 a 43°C), l'attivazione invece avviene a 50W in salita. Chiaramente, una volta avviata l'ebollizione e tutti i fenomeni di moto che ne conseguono, è molto più facile mantenerla attiva, se invece essa

non si è ancora innescata servono potenze più elevate di quelle alle quali si disattiverrebbe . Assieme alla disattivazione della transizione di fase abbiamo anche una istantanea diminuzione delle oscillazioni della pressione, poiché diminuisce bruscamente il moto all'interno del condotto della PHP

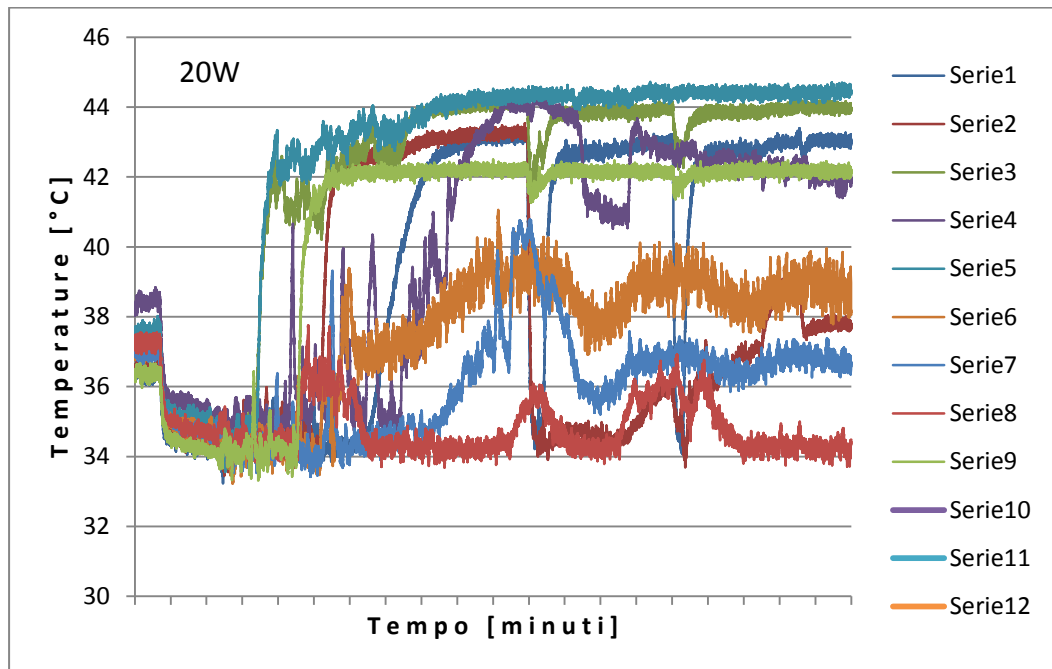


Figura 3-13 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo, particolare disattivazione transizione di fase a 20W

### 3.7 Conclusioni prove a terra

Alla fine delle due caratterizzazioni in posizione orizzontale e verticale la caratteristica che salta subito all'occhio è l'isteresi del sistema. Non si registra mai lo stesso comportamento aumentando o diminuendo la potenza termica, il percorso attraverso il quale la PHP raggiunge un determinato step non è irrilevante ed è sempre necessario prestare attenzione: potremmo aspettarci determinate prestazioni che invece non si verificano a causa dell'isteresi; questo fenomeno è molto più marcato nel caso in cui la PHP sia orientata verticalmente. Inoltre è peculiare la differenza tra orizzontale e verticale per quanto riguarda le alte potenze termiche: in orizzontale non si riscontra mai un distacco netto di alcune temperature dalla fascia media più bassa, in verticale intorno agli 80W inizia ad essere un fenomeno piuttosto comune. E' allora possibile estrapolare dei criteri per l'utilizzo della PHP tenendo presente i fenomeni d'isteresi e l'elevata non isotermità della zona di evaporazione, ipotizzando come range ottimale di funzionamento un intervallo compreso tra i

40W e i 70W di potenza termica da smaltire. La pressione ha delle oscillazioni più ampie e marcate nella disposizione verticale per via del moto più intenso all'interno del serpentino di rame; quando la transizione di fase non è attiva la PHP funziona solamente per conduzione: essa rimane infatti ad un valore costante. Sarebbe inoltre molto interessante in un futuro testare tutte le varie combinazioni con cui si può raggiungere un determinato livello di potenza (es. salendo di due step e scendendo di uno...), in modo da avere delle curve caratteristiche di salita della temperatura per ogni situazione che si potrebbe presentare nella pratica. Si potrebbe allora dimensionare in maniera sicura il sistema di raffreddamento senza aver il rischio che esso non funzioni adeguatamente per via di insolite curve di carico. Le resistenze termiche del dispositivo misurate a terra sono riassunte in un diagramma alla fine del capitolo 5, sono anche confrontate con i valori ottenuti in volo.

## 4 58<sup>a</sup> campagna di volo parabolico (filling ratio 50%)

### 4.1 Prove in volo

Per osservare l'influenza del campo gravitazionale sul comportamento termico della PHP sono state realizzate delle prove in volo durante la 58<sup>a</sup> campagna di volo parabolico a bordo dell'Airbus A300 di Novespace. Questa campagna si è svolta dal 27/05/2013 al 07/06/2013, circa 5 mesi prima della successiva. La PHP è testata in posizione verticale per valutare l'effetto della gravità nel layout più influenzato, con potenza termica in salita e in discesa per osservare eventuali comportamenti di isteresi (essi si sono anche riscontrati nelle prove a terra, vedi capitolo 3). I test in posizione orizzontale forniscono conferme all'intuizione che la PHP così posizionata si comporti come in condizioni di microgravità. Le prove svolte sono quindi le seguenti:

- PHP in posizione verticale con potenza termica da 40 a 90W
- PHP in posizione verticale con potenza termica da 100 a 50W
- PHP in posizione orizzontale con potenza da 40 a 90W

Si è preferito iniziare la discesa da 100W per osservare il comportamento della PHP in microgravità con maggior dry-out all'evaporatore ed osservare più chiaramente i fenomeni d'isteresi.

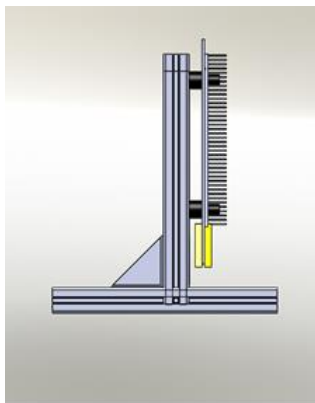


Figura 4-1 PHP in posizione verticale

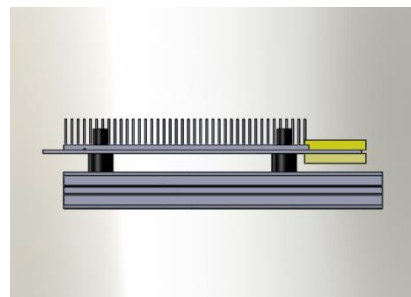


Figura 4-2 PHP in posizione orizzontale

## **4.2 Primo giorno di volo parabolico, PHP in posizione verticale con potenza crescente da 40W a 90W**

Vengono descritte prima il comportamento generale osservato durante una parabola, quindi una serie di cinque parabole a uguale potenza, ed infine una seconda serie a potenza maggiore vicino alla crisi termica. Le altre serie di parabole sono riportate in appendice

### **4.2.1 PHP verticale 40W, parabola singola**

Sono riportati qui sotto i grafici delle temperature nella zona di evaporazione, condensazione, ambiente, accelerazione di gravità e pressione in funzione del tempo sull'asse delle ascisse; ogni tacca rappresenta 1 minuto. È molto interessante osservarli uno sotto l'altro per vedere i cambiamenti che avvengono alle varie grandezze nell'istante in cui varia l'accelerazione di gravità grazie alle manovre dell'aereo. Prendiamo in considerazione l'evento di una singola parabola in figura 4-3, possiamo notare come inizialmente le temperature nella zona di evaporazione siano stabili tra i 36°C e i 40°C, quelle al condensatore tra i 26°C e i 28°C, mentre le due ambiente di aria in ingresso e in uscita tra i 23°C e i 25°C. L'accelerazione di gravità è piuttosto stabile per due assi attorno allo zero e per l'altro rivolto verso il basso abbastanza vicina ai 9.8 m/s<sup>2</sup>. I valori oscillano molto in parte per via delle vibrazioni provocate dall'aereo, in parte anche a causa della rotazione dei ventilatori che, si è visto, essere tutt'altro che trascurabili su tale andamento irregolare. Nel momento in cui viene raggiunta la fase di volo che porta l'accelerazione di gravità a 1.8g si può notare come le temperature nella zona di evaporazione si abbassino leggermente di circa 1°C: in questo tipo di layout il moto del fluido è ampiamente coadiuvato dalla forza di gravità, questo ne è appunto una prova dato che lo scambio termico risulta maggiormente efficace proprio nel momento in cui l'effetto gravitazionale è maggiormente presente. Anche nel rientro dalla cabrata si osserva un lieve abbassamento delle temperature verso valori più bassi di circa 1°C rispetto al range assunto da esse nella situazione a 1g, per poi tornare alla fascia di partenza una volta concluse tutte le manovre. Il fenomeno davvero interessante avviene nel passaggio da 1.8g a 0g: esattamente nell'istante in cui l'accelerazione di gravità diviene trascurabile osserviamo l'innescarsi di un transitorio che causa un innalzamento delle temperature nella zona di evaporazione. Si può affermare che la forza di gravità ha un ruolo significativo sul moto del fluido e non è trascurabile rispetto all'effetto della capillarità.

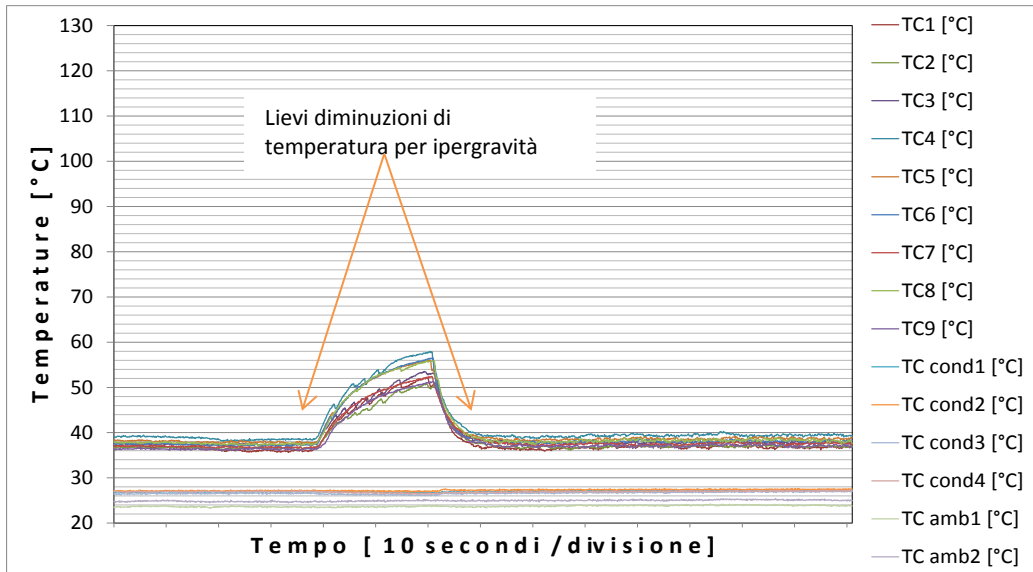


Figura 4-3 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 40W

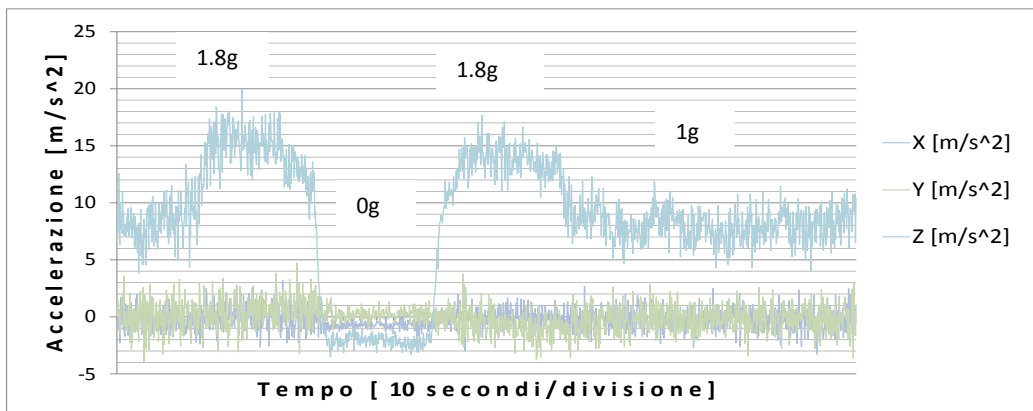


Figura 4-4 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

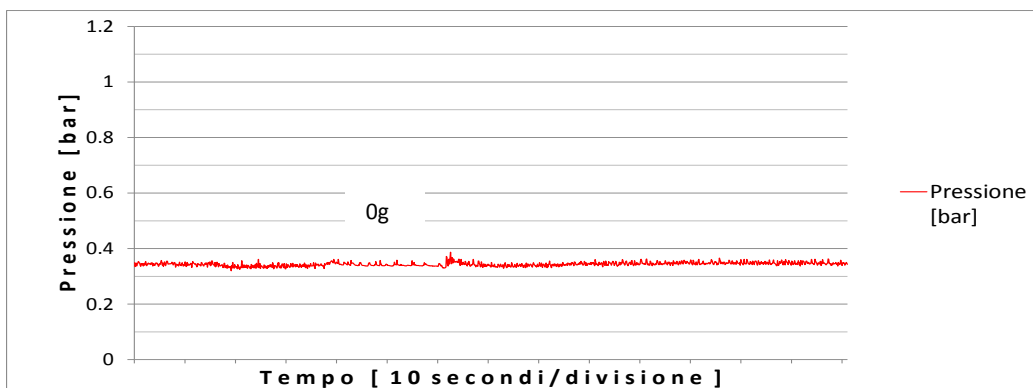


Figura 4-5 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 40W

Lo scambio termico infatti peggiora molto all'innesco del transitorio che, pur non riuscendo a esaurirsi completamente nel breve periodo di circa 20s della durata della manovra, permette di intuire quale sarebbe la situazione a regime. La pressione continua a oscillare tra 0.3 bar e 0.4 bar, tendenzialmente ha un comportamento piuttosto nervoso dato che i fenomeni che governano il moto all'interno del serpentino di rame sono intrinsecamente instabili. Le oscillazioni diminuiscono leggermente nel tratto a 0g, sintomo di una diminuzione dell'intensità del moto e probabilmente, come si osserverà in seguito, delle vibrazioni.

#### **4.2.2 Serie di parabole con PHP verticale a 40W**

Per ogni parabola si può osservare un comportamento analogo a quello descritto sopra per la parabola singola, le temperature diminuiscono lievemente nel tratto a 1.8g per poi alzarsi fino a toccare punte di 58°C, essere riportate nel range che si aveva anche prima nella fase a 1.8g e, infine, ritornare ad assumere i valori tipici dello pseudo stato stazionario a 1g. Attraverso la serie di parabole si nota come le fasi di transitorio creino degli squilibri nel comportamento della pressione, che presenta andamenti meno oscillatori ma con picchi più elevati in certi punti: essi sono provocati da colpi d'ariete indotti dall'esplosione di bolle che vengono percepite dal sensore di pressione. Grazie alle cinque parabole è facile constatare la ripetibilità del comportamento della PHP per ogni transitorio: i picchi raggiunti alla fine della fase di microgravità sono sempre comparabili e la risposta dinamica è ogni volta identica. L'efficacia della PHP diminuisce parecchio in condizioni di microgravità, il transitorio ne è il principale sintomo, un peggioramento delle prestazioni è influenzato da un peggioramento del moto all'interno del tubo di rame.



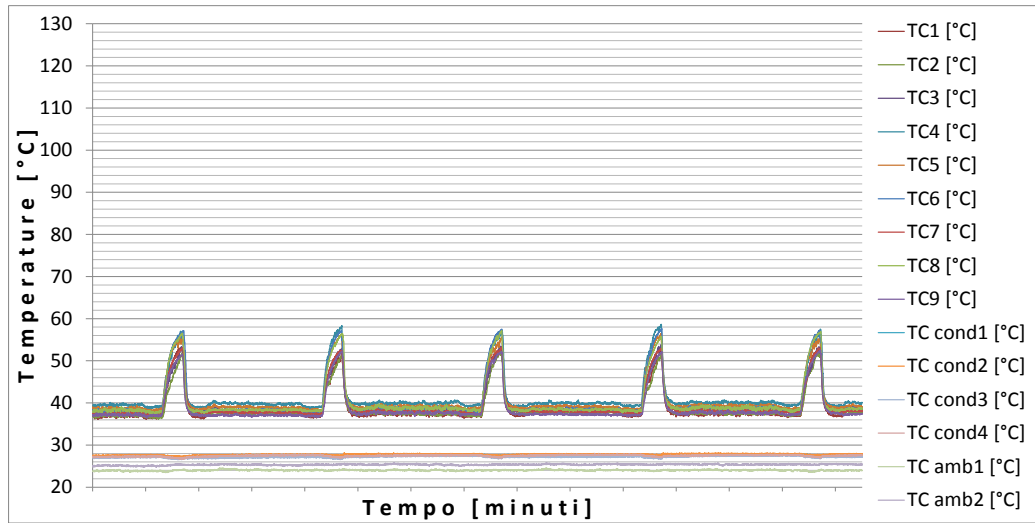


Figura 4-6 Temperature all'evaporatore, condensatore e ambiente nel tempo per PHP verticale a 40W

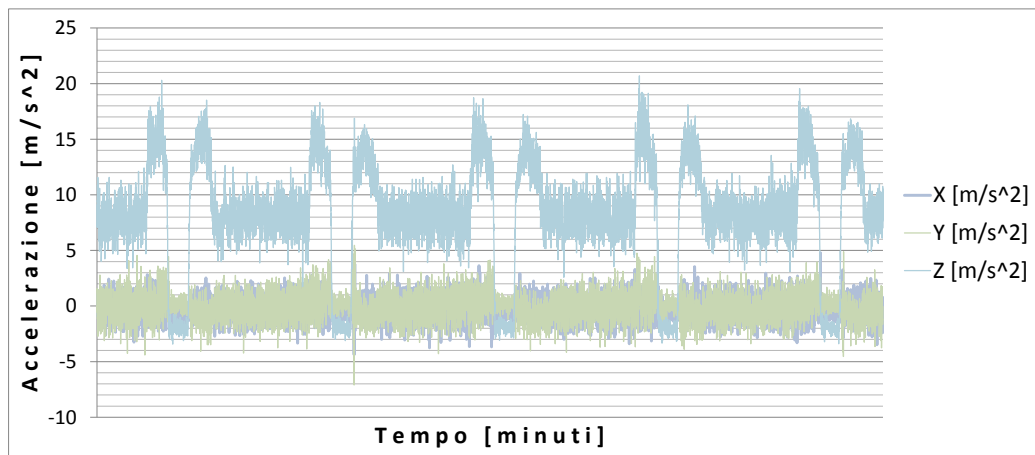


Figura 4-7 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

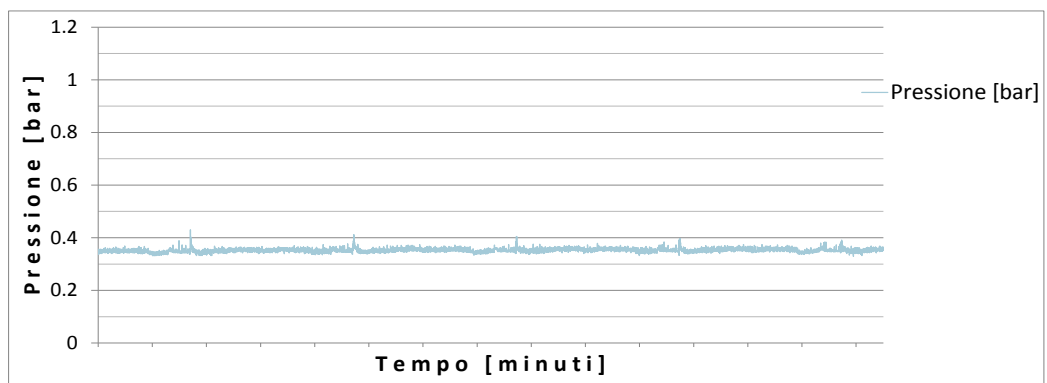


Figura 4-8 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 40W

N.B.: le altre serie di parabole possono essere consultate all'appendice A

#### **4.2.3 Serie di parabole con PHP verticale a 90W**

Arrivati a questo livello di potenza si iniziano a riscontrare dei veri e propri problemi. Tre termocoppie danno dei valori di temperatura nettamente più alti di quelli che possiedono le altre, che invece rimangono in un range di valori piuttosto compatto, ma comunque compatibile con quelli degli altri valori di potenza. Esse si trovano ad oscillare attorno ai 50°C, valore più elevato rispetto al caso a 80W compatibilmente con l'aumento di potenza termica da smaltire. Possiamo ipotizzare dei fenomeni di dry-out parziale prima di un totale asciugamento dell'evaporatore che porta all'innalzamento della temperatura media in alcune porzioni di evaporatore. Non ha senso calcolare una temperatura media viste le grandi differenze presenti tra i vari valori. Il fenomeno molto interessante si può notare nelle fasi precedenti alle parabole durante le quali, grazie a un'accelerazione pari a 1.8g, questi valori di temperatura tendono a riallinearsi con tutti gli altri per poi ricominciare a crescere assumendo valori molto vicini nel momento in cui parte la microgravità. A questo punto i picchi raggiungono temperature di circa 100°C, in seguito alle parabole queste temperature tendono ancora a ritornare comparabili con le altre per poi assumere nuovamente i consueti valori più elevati. Da questi risultati si registra che qualcosa è cambiato all'interno della PHP peggiorandone il comportamento: al crescere della potenza termica cambia il moto all'interno del condotto: Si passa ad un regime anulare o semi-anulare provocato dall'ebollizione nucleata che impedisce la corretta oscillazione e circolazione, il vapore forma un blocco nelle curve situate all'evaporatore. La zona di evaporazione non rimane bagnata dal liquido peggiorando così lo scambio termico e tenendo la superficie a una temperatura più elevata di quelle desiderate. Questo fenomeno risulta essere molto importante poiché implica un maggior controllo nel dimensionamento precludendo applicazioni di raffreddamento nel caso in cui siano in gioco queste potenze termiche e si necessiti di mantenere superfici il più possibile isoterme. Chiaramente a questi livelli di potenza l'aiuto fornito dalla forza di gravità al moto del fluido diventa ancora più significativo dato che porta a mantenere la superficie più possibile isoterma. Notiamo poi come queste grosse discrepanze tra le temperature siano decisamente più attenuate nel caso di orientazione orizzontale e alti livelli di potenza termica. Tuttavia, in quest'ultimo caso, sembra che alcuni canalini non si attivino proprio.

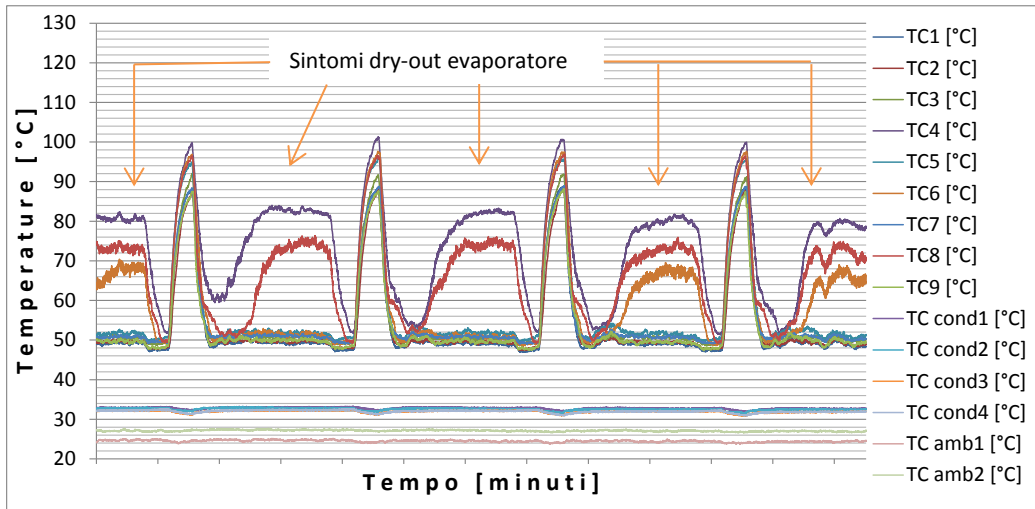


Figura 4-9 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 90W

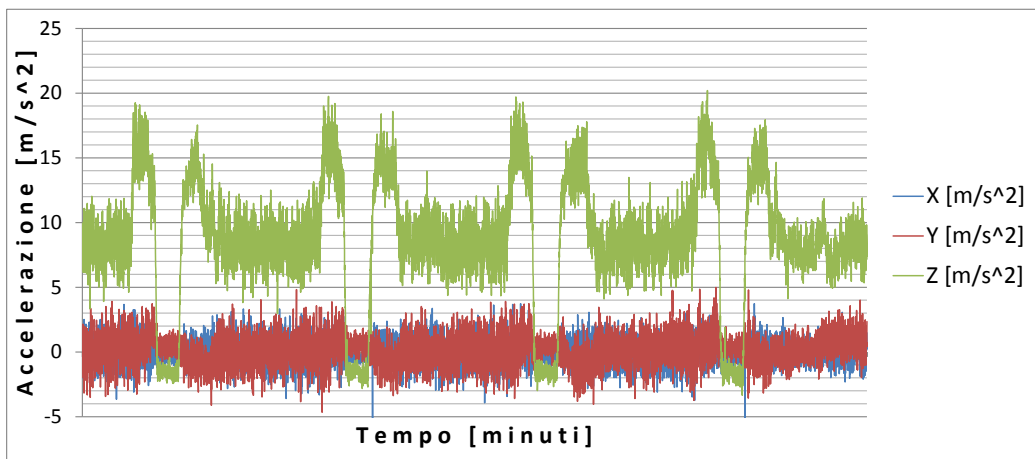


Figura 4-10 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

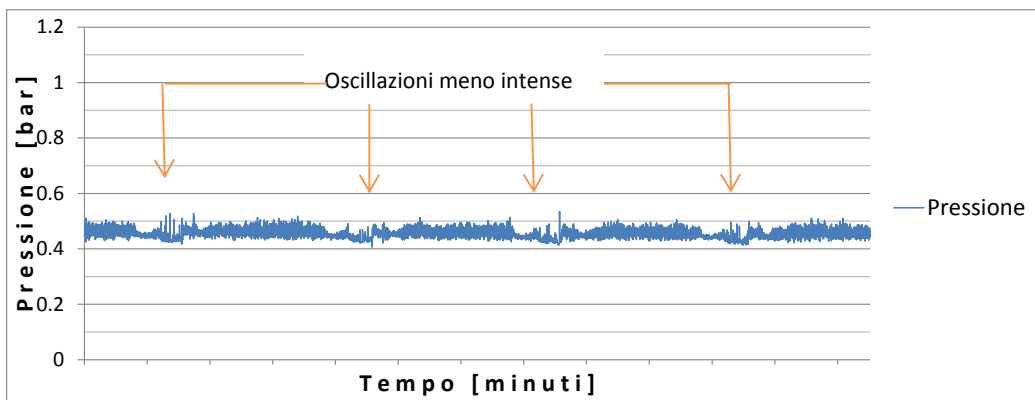


Figura 4-11 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 90W

#### **4.2.4 Conclusioni**

Osservando il volo parabolico in tutto il suo insieme si può concludere che sicuramente la forza di gravità influenza il funzionamento della PHP e, la sua assenza, ne peggiora decisamente le prestazioni. Nella fase di manovra a 0g, le temperature nella zona di evaporazione si alzano sempre di molto, anche con differenze di temperatura pari a 40-50°C. Durante il volo possiamo assistere ad un continuo innalzamento delle temperature del condensatore per via della sua grande inerzia. La pressione in generale sembra avere un trend crescente nel tempo tranne che nell'ultima prova. Queste variazioni sono molto modeste, dell'ordine di circa 1 Pa/s, tuttavia è interessante provare a dar loro un senso. Possiamo trovare una giustificazione nell'aumento della pressione di saturazione con la temperatura che cresce continuamente durante il volo parabolico nella zona di condensazione: nella prima parte dell'ultima serie di parabole la PHP funziona molto male, dopo la seconda parabola una temperatura però si abbassa e il suo funzionamento ne giova. Questo porta l'evaporatore ad un lieve raffreddamento e quindi a un raffreddamento nel sistema che porta dunque all'abbassamento della pressione nella zona misurata. Ancora più importanti sono quindi gli effetti dell'accelerazione sul sistema ad alti livelli di potenza dato che possono risultare fondamentali per riattivare i canalini otturati dal vapore. Si può anticipare anche una conclusione riguardo le vibrazioni: esse sembrano contribuire significativamente a mantenere il moto del fluido anche nelle zone dove è più facile raggiungere il dry-out. Quest'ultimo punto è da verificare con ulteriori prove a terra e ampiezza delle oscillazioni controllata. Per concludere possiamo far notare l'elevata ripetibilità delle prove svolte: in tutte le serie di parabole i risultati sono sempre perfettamente compatibili tra di loro e non si registrano differenze tra una parabola e l'altra.

#### **4.3 Secondo giorno di volo parabolico, PHP verticale con potenza da 100W a 50W**

In questa sezione sarà trattato l'evento di una singola parabola a 100W dopo aver portato la PHP allo pseudo stato stazionario. Successivamente saranno rappresentate le altre serie di parabole da 100W a 80W per osservare la fine della crisi termica e l'influenza dell'isteresi sul dry-out all'evaporatore. Tutte le altre parabole possono essere consultate in appendice.

### 4.3.1 Parabola singola con PHP verticale a 100W

Per cominciare l'analisi della singola parabola alla partenza si è settato per prima cosa la potenza immediatamente a 100W e quindi atteso l'esaurimento del transitorio.

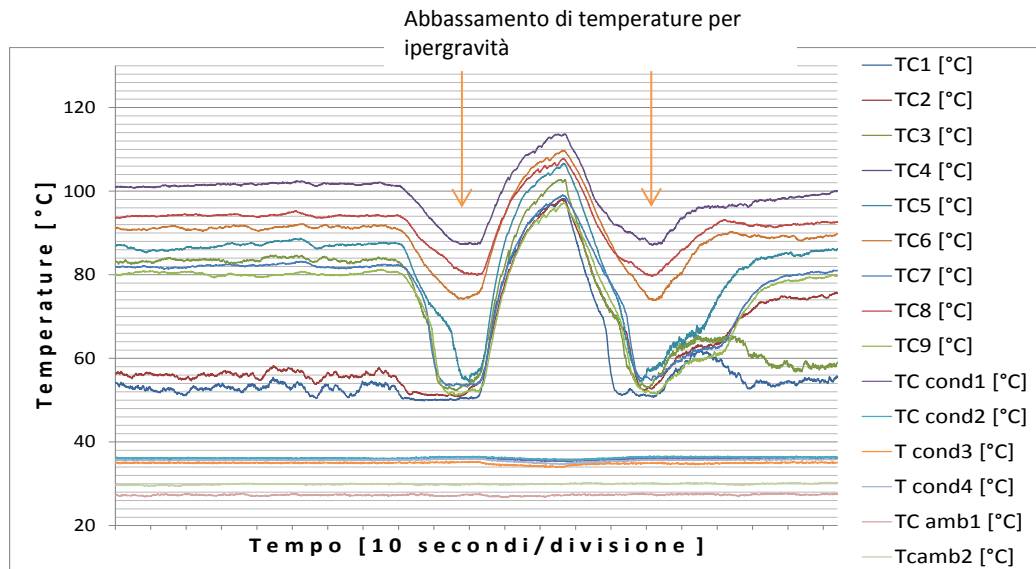


Figura 4-12 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 100W

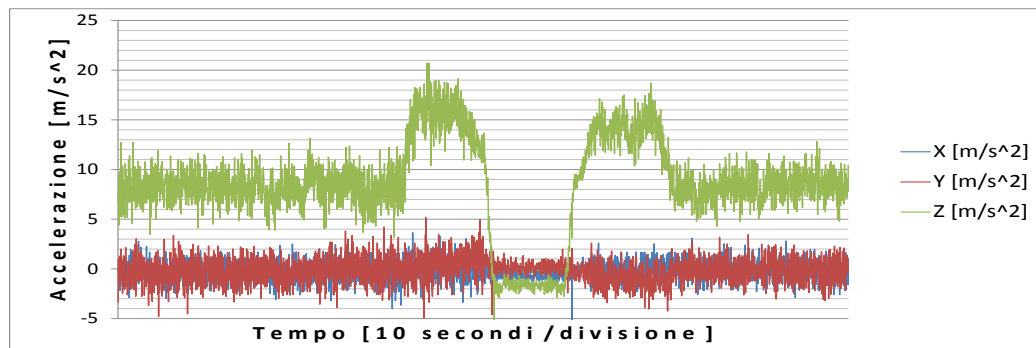


Figura 4-13 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

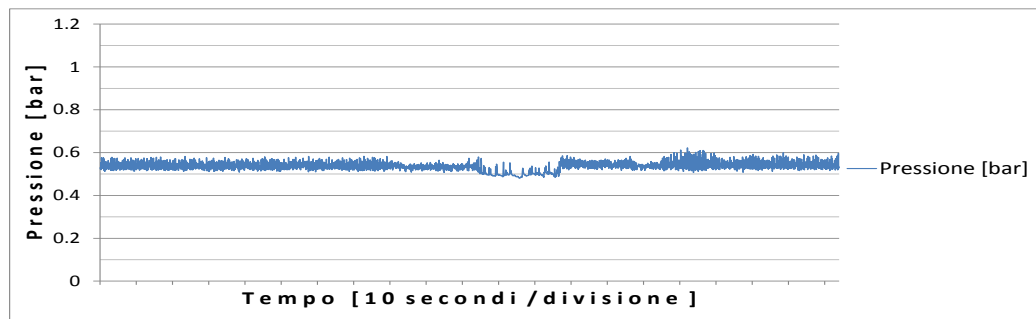


Figura 4-14 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 100W

Possiamo osservare che solo due termocoppie, una volta raggiunto lo pseudo stato stazionario, danno valori di temperatura, nella fase a 1g, compatibili con quelli rilevati nella medesima fase a 90W ma alla fine della salita a gradini. Le temperature sono quindi distribuite in una fascia piuttosto ampia di valori che vanno dagli 80°C ai 105°C. Chiaramente questo è sintomo di funzionamento non ottimale e assenza di corretta circolazione del fluido in alcune zone per mantenere l'evaporatore bagnato. Le temperature più elevate occupano comunque una fascia ampia ma piuttosto omogenea; ricordando i risultati ottenuti a terra con la disposizione orizzontale (vedi capitolo 3.1 e 3.2) sembrerebbe che ad alti livelli di potenze termiche fornite i comportamenti inizino ad assomigliarsi, potremmo addirittura sospettare un dry-out parziale continuo per l'orientazione orizzontale. Le due temperature che in questa situazione troviamo nettamente più basse potrebbero essere le uniche misurate in canali ancora bagnati dal liquido. Le due fasi a 1.8g tendono sempre a riportare tutte le temperature a valori inferiori vicino a quelli delle temperature più basse. Al momento dell'inesco della fase a 0g le temperature si uniformano sempre. Anche in questa situazione possiamo osservare una diminuzione della pressione nella fase di microgravità con oscillazioni meno marcate per via della diminuzione di moto del fluido all'interno del serpentino di rame.

#### **4.3.2 Serie di parabole con PHP verticale a 100W**

In tutte le parabole si ripetono le fasi sopra descritte, alla fine di ciascuna parabola le temperature escono sempre dal range in cui tentano di rientrare nelle fasi a 1.8g. E' interessante osservare come dopo la prima, la seconda, la quarta e la quinta parabola abbiamo 3 temperature che rientrano nella fascia attorno ai 55°C, mentre negli altri casi sono solo 2. Certamente l'aumento di accelerazione di gravità è benefico al moto del fluido: le bolle di vapore bloccate nelle curve dell'evaporatore tendono quindi a condensare o risalire. Ancora una volta possiamo affermare come le fasi di ipergravità siano benefiche per riportare il fluido ad un corretto funzionamento influenzando di nuovo la fisica del fenomeno in maniera ampia e pesante. Diventa ancora evidente come, all'avvicinarsi della crisi termica, molte termocoppie registrino valori più elevati come se la fascia in cui essi sono compresi si ampliasse all'aumentare dei problemi di moto e oscillazione del fluido.

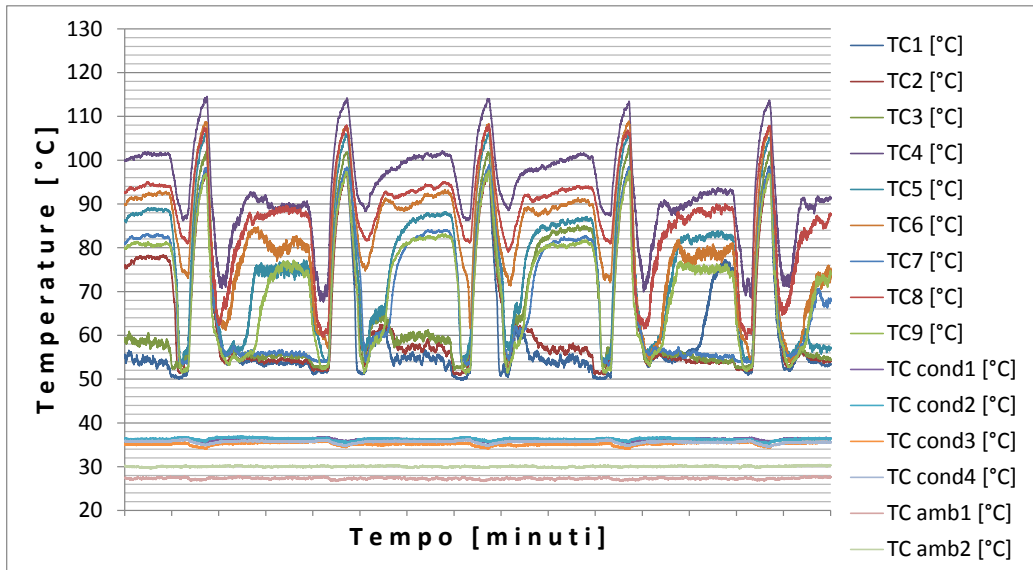


Figura 4-15 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 100W

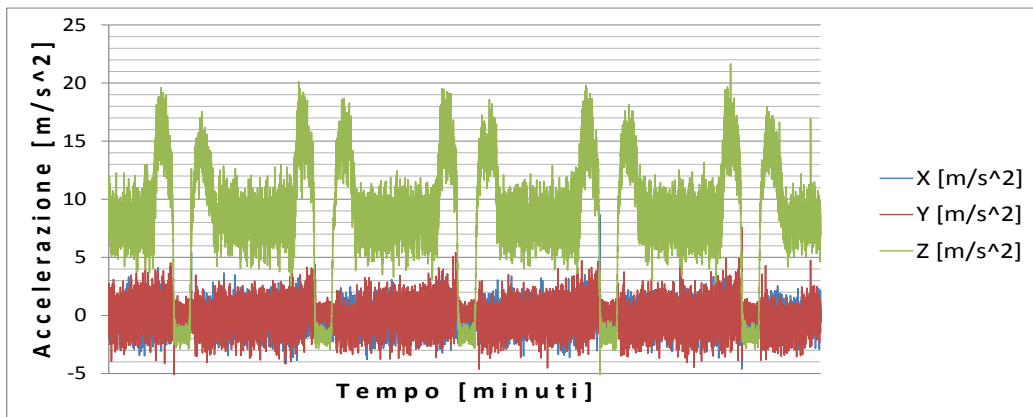


Figura 4-16 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

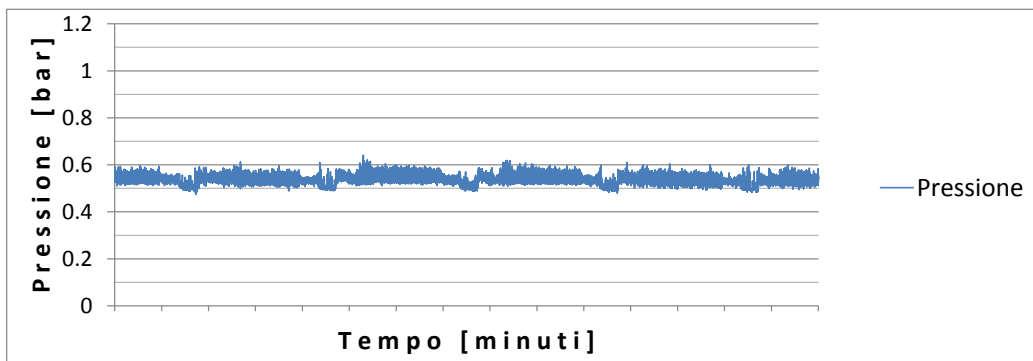


Figura 4-17 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 100W

### **4.3.3 Serie di parabole con PHP verticale a 90W**

All'abbassarsi del livello di potenza si può notare come due valori rientrano nella fascia di temperature più basse: questo range si colloca attorno ai 50°C e ai 55°C. Tre termocoppie danno però valori nettamente più alti nella fase a 1g. Ci si scontra quindi con un tipico fenomeno di isteresi, infatti, rispetto al caso a 90W con potenza crescente, abbiamo un valore in più che si trova al di fuori del range più basso di temperature. Questo poiché una volta innescata la transizione di fase è più difficile da disattivare, viceversa, se non è attiva, è più difficile da attivare. Come già osservato nel capitolo 4.1, nella fase a 1.8g le temperature all'evaporatore tendono tutte a uniformarsi per poi risalire in maniera omogenea vicino a un picco intorno ai 105°C. La pressione ha sempre comportamento oscillatorio che tende a diminuire con la microgravità presentando però dei picchi più accentuati, continua tuttavia a comportarsi come nei casi precedenti. Prima dell'ultima parabola si può osservare una lunga pausa dovuta a esigenze di volo.



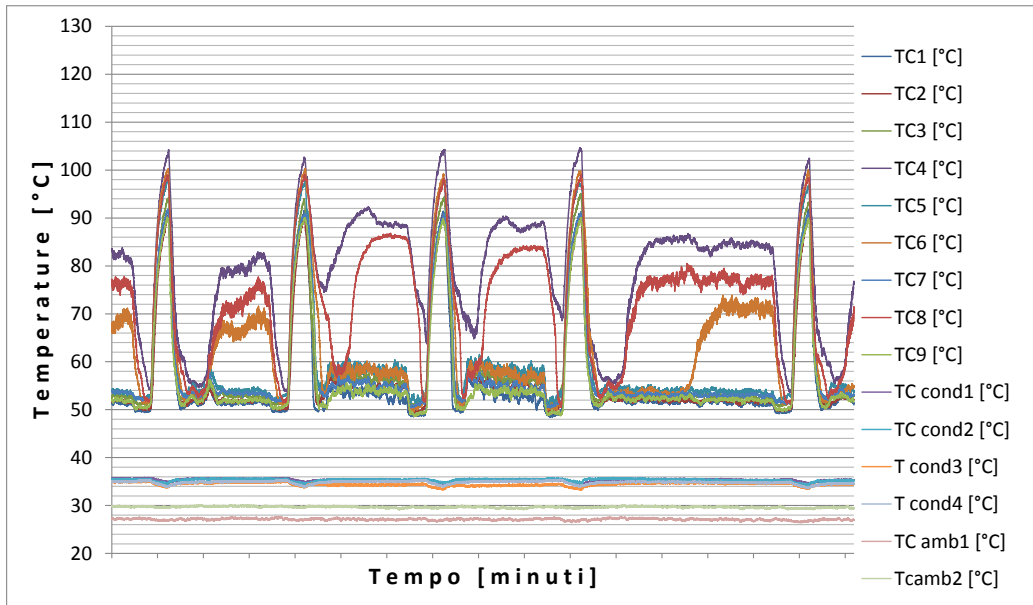


Figura 4-18 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 90W

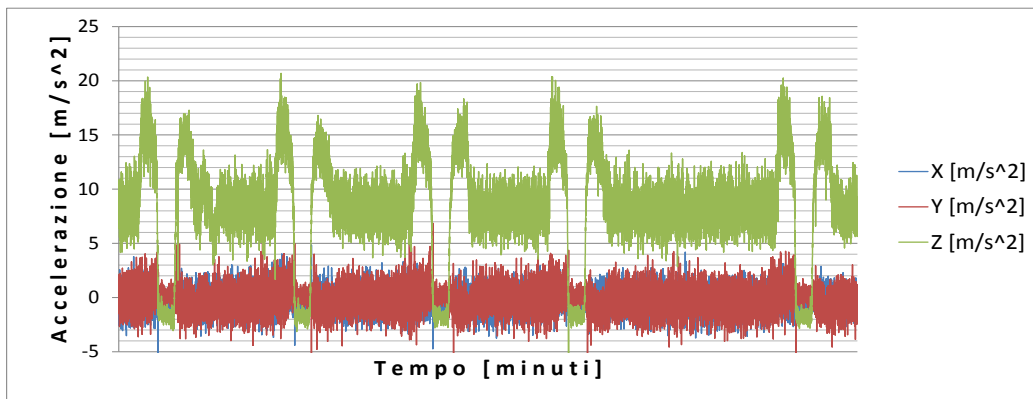


Figura 4-19 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

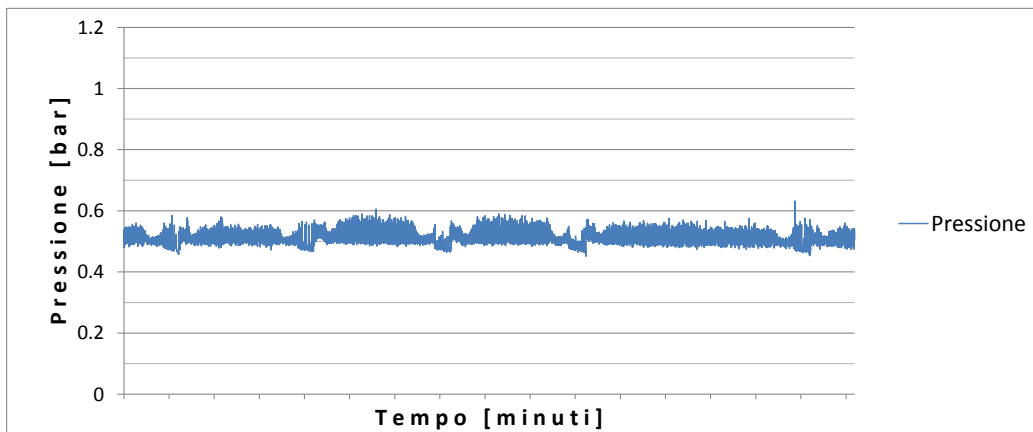


Figura 4-20 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 90W

#### **4.3.4 Serie di parabole con PHP verticale a 80W**

All'ulteriore diminuzione della potenza fornita alle resistenze elettriche tutte le temperature rientrano in una fascia di valori compatibili. Questa fascia si trova attorno ai 55°C, si può ora affermare che la PHP è tornata a funzionare completamente in maniera corretta e tutti i canali si sono liberati dalle ostruzioni provocate dal vapore. Qualche piccolo malfunzionamento si ha però dopo la seconda, terza e quarta parabola: le temperature tendono ad aumentare ma poi, grazie alle fasi a 1.8g rientrano agevolmente nella fascia comune. Potremmo ipotizzare una diminuzione dell'apporto di liquido all'evaporatore per via di una meno brusca manovra dell'aereo che non permette di rientrare completamente nel range di temperatura tipico dell'evaporatore. Anticipando i risultati della successiva campagna di volo parabolico si può ipotizzare che questo ampliamento dell'intervallo occupato dalle temperature all'evaporatore possa essere, in una scala decisamente più piccola, lo stesso che porta la PHP con una percentuale di riempimento pari al 70% ad avere, per elevati valori di potenza, oscillazioni molto ampie (anche differenze di temperatura pari a 20°C). La pressione si comporta regolarmente come negli step precedenti.

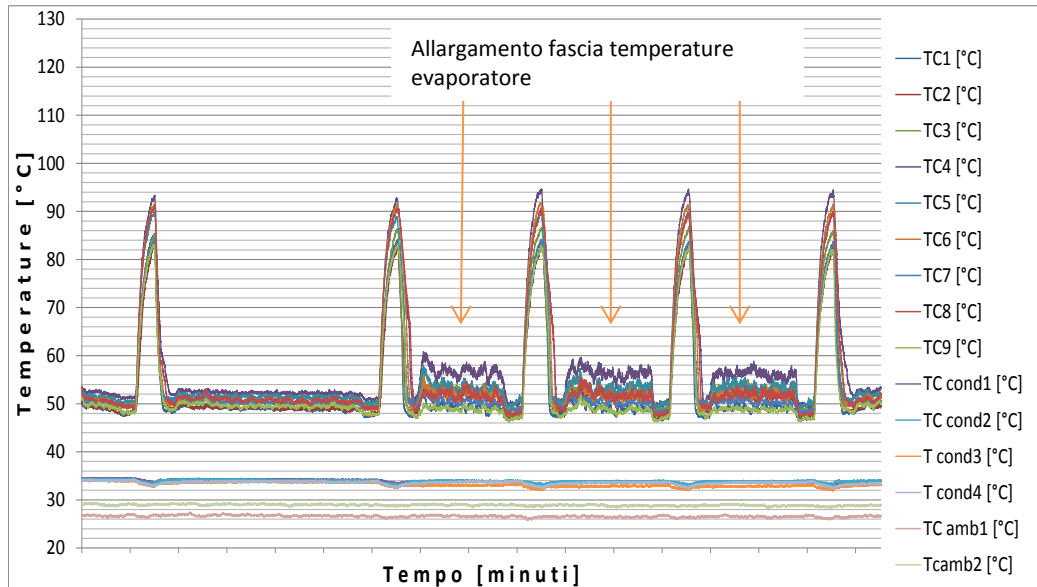


Figura 4-21 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 80W

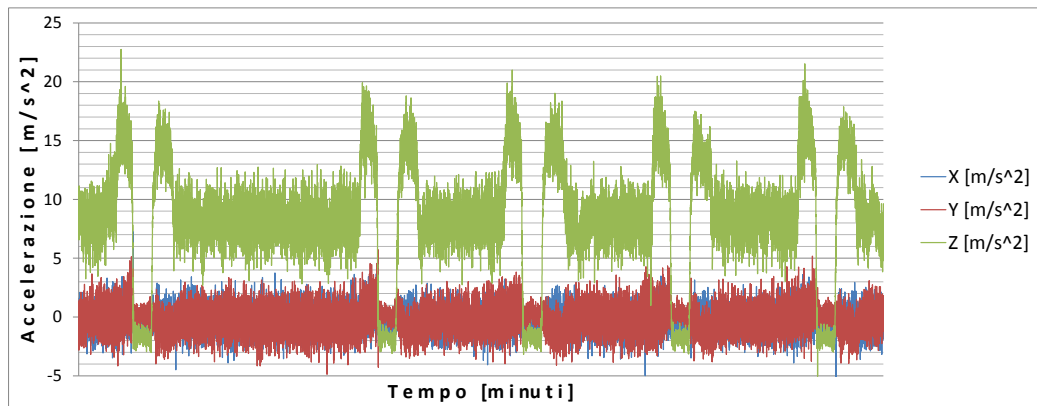


Figura 4-22 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

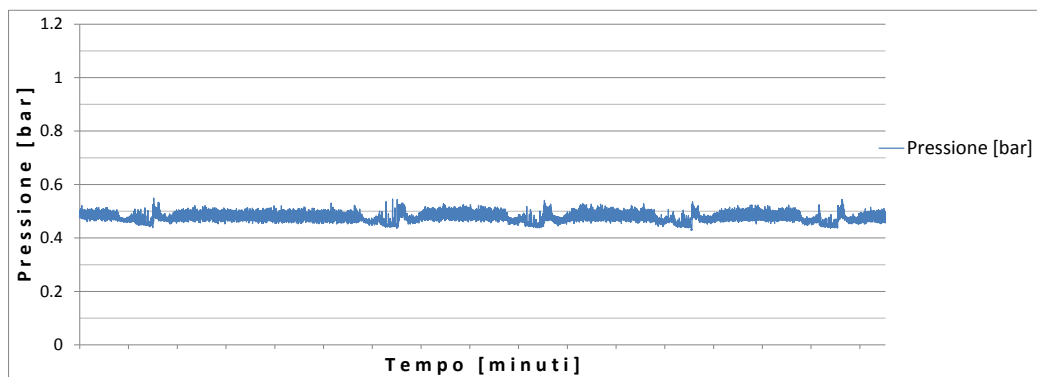


Figura 4-23 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 80W

N.B.: le altre sequenze di parabole possono essere consultate nell'appendice B

#### **4.3.5 Conclusioni**

Come già anticipato all'inizio del capitolo 4 l'isteresi è molto importante in un fenomeno termico ed altamente instabile come quello analizzato. Le perturbazioni del sistema portano a variare il comportamento rilevato rispetto al caso in cui la potenza termica sia in salita e non in discesa. Si è ancora piuttosto lontani dal poter stimare in maniera affidabile le variazioni provocate dall'isteresi, tuttavia è possibile in prima analisi affermarne l'importanza ed iniziare ad orientarsi nella direzione di una progettazione critica. Riguardo gli effetti provocati dalle variazioni di accelerazione in direzione Z i risultati sono piuttosto compatibili con quelli rilevati con PHP verticale e potenza termica crescente: le differenze di temperatura nei transistori sono praticamente identiche e le risposte dinamiche pure. Si potrà poi osservare come la risposta dinamica alla microgravità sia esattamente la stessa che si può ottenere a terra cambiando l'orientazione della PHP da verticale ad orizzontale.

### **4.4 Terzo giorno di volo parabolico, salita con PHP in orizzontale**

#### **4.4.1 Singola parabola con PHP orizzontale a 50W**

Analizzando una singola parabola si può osservare come le temperature all'evaporatore non sentano minimamente l'effetto delle variazioni di accelerazione di gravità. Accendendo i riscaldatori e aspettando che raggiungano il regime stazionario esse si stabilizzano nella fascia tra i 60°C e i 70°C ma rimangono in maniera stabile dentro essa. L'unica grandezza che continua a risentire dell'effetto gravitazionale è la pressione che, come negli esperimenti precedenti, oscilla molto meno e con qualche picco in più nella fase a 0g. Essendo il moto del fluido non coadiuvato dalla forza di gravità abbiamo temperature decisamente più elevate per eguali potenze termiche. Possiamo comunque osservare come alcune temperature alla potenza di 50W abbiano un comportamento molto più regolare delle altre: potremmo sempre ipotizzare che ci sia del dry out parziale all'evaporatore, inoltre esse sono anche mediamente più alte di quelle a comportamento oscillatorio.

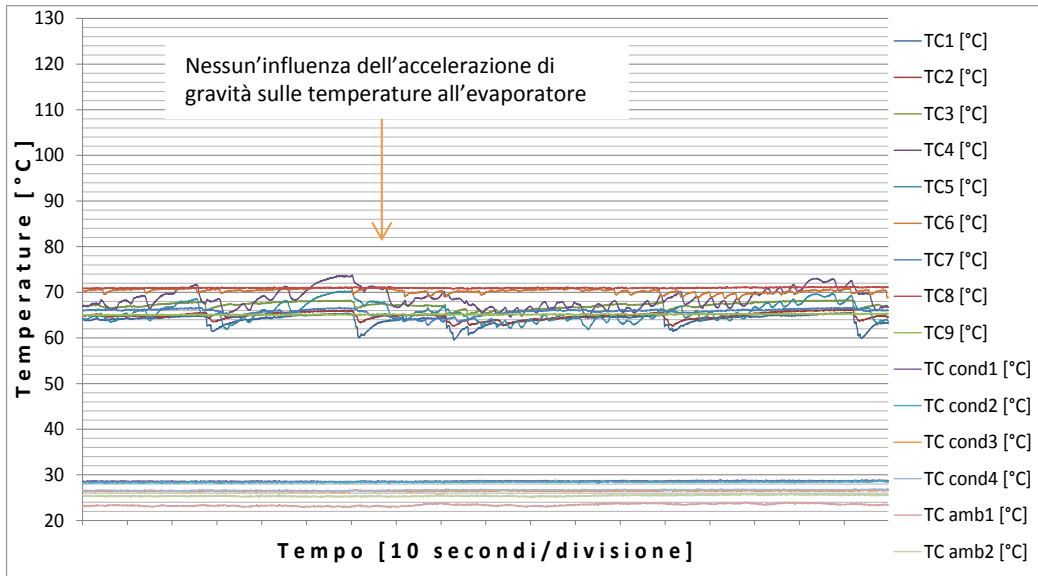


Figura 4-24 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 50W

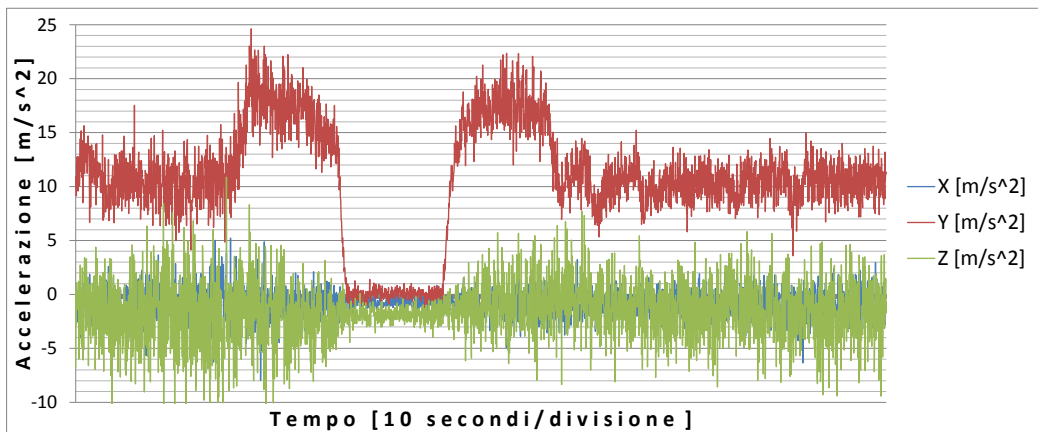


Figura 4-25 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

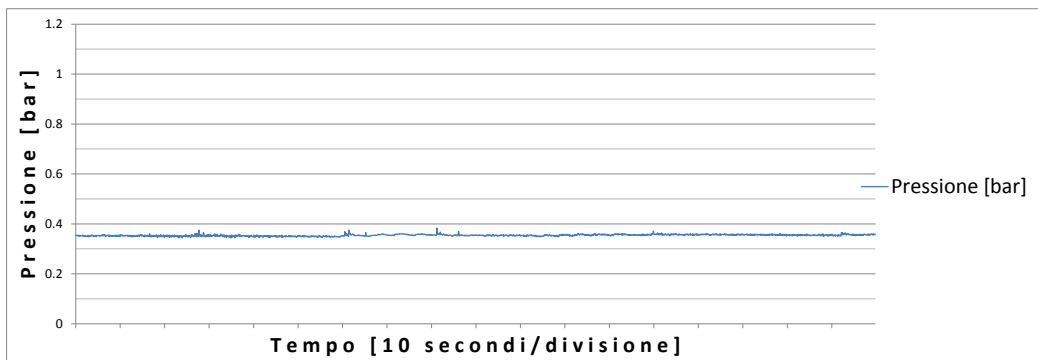


Figura 4-26 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 50W

#### **4.4.2 Serie di parabole con PHP orizzontale a 50W**

Come anticipato nel paragrafo precedente, in tutte le parabole le temperature all'evaporatore non sono affatto influenzate da variazioni del campo gravitazionale, esse rimangono nel range entro il quale si sono stabilizzate e non accennano a lasciarlo. Si può quindi affermare con una buona ripetibilità che il campo gravitazionale non influenza significativamente il comportamento termico della PHP in orizzontale: l'evaporatore continua a mantenere lo stesso range di temperature che ha raggiunto allo pseudo stato stazionario nonostante le numerose e repentine variazioni di accelerazione provocate dalle manovre dell'aereo.

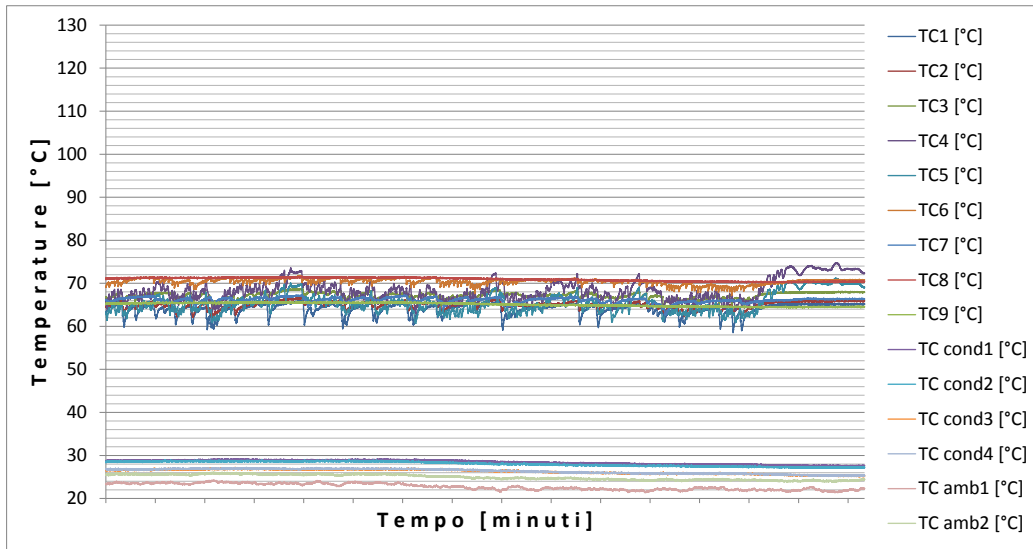


Figura 4-27 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 50W

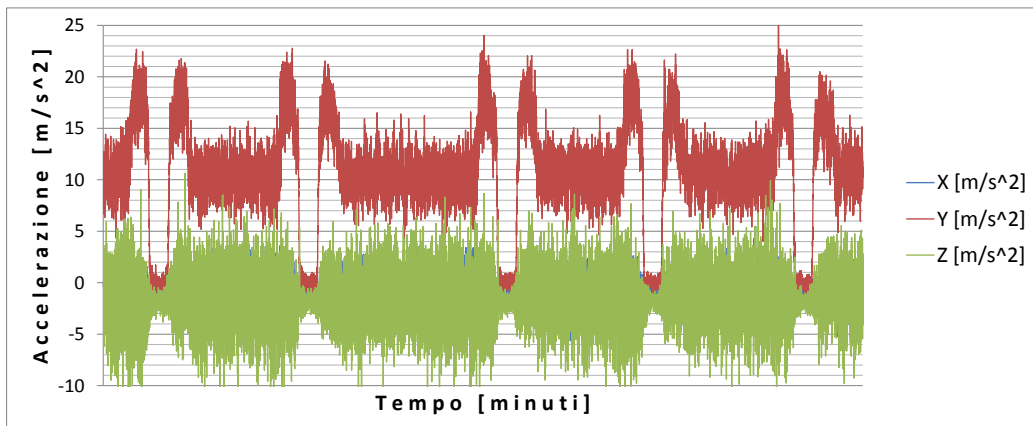


Figura 4-28 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

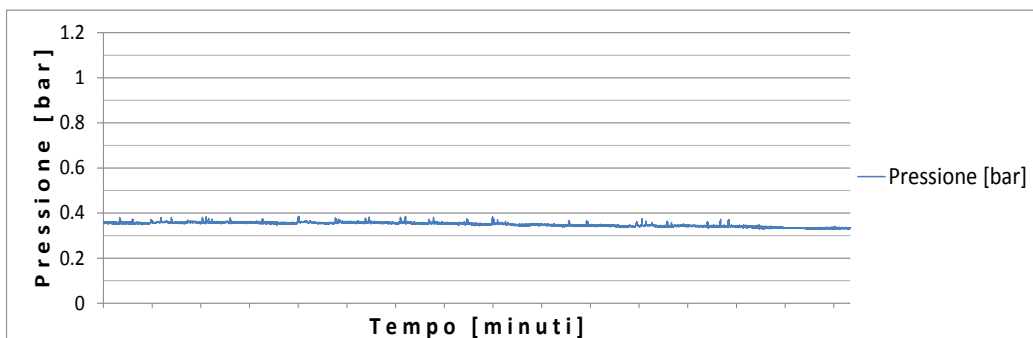


Figura 4-29 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 50W

N.B.: le altre sequenze di parabole possono essere consultate nell'appendice C

#### 4.5 Conclusioni campagna di volo parabolico

Alla fine dei tre giorni della campagna di volo parabolico e delle tre prove sopra riportate, si può affermare che il comportamento termico della PHP in posizione orizzontale non è influenzato dalla forza di gravità. Il pompaggio offerto dalla transizione di fase se non coadiuvato dall'accelerazione di gravità è molto debole, il moto all'interno del fluido diminuisce e peggiorano le prestazioni termiche. Calcolando la resistenza termica equivalente del dispositivo come

$$R_{eq} = \Delta \bar{T}_{e-c} / \dot{Q} [K / W]$$

Equazione 4-1 Calcolo resistenza termica equivalente

Con:

- $\Delta \bar{T}_{e-c}$  differenza di temperature media tra condensatore ed evaporatore [K]
- Q calore fornito all'evaporatore [W]

Si può osservare come i dati ottenuti in volo con PHP orizzontale siano perfettamente compatibili con quelli ricavati dalla caratterizzazione a terra. Nell'immagine sotto è disponibile una sintesi di queste affermazioni.



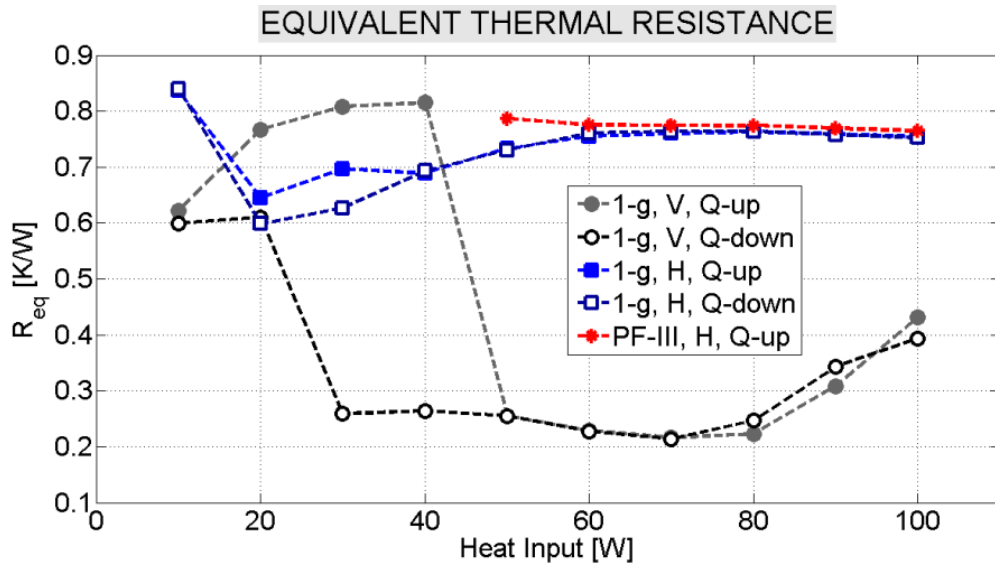


Figura 4-30 Resistenza termica equivalente nei test a terra (1-g) in verticale ed orizzontale (V-H) confrontata con quella ricavata nel terzo giorno di volo parabolico (PF-III)

Ad alte potenze termiche con PHP in verticale assistiamo al fenomeno del dry-out per alcune zone della PHP, in alcuni punti le temperature sono infatti più elevate rispetto alla media, si può quindi ipotizzare la presenza di bolle di vapore nelle curve dell'evaporatore che non permettono al liquido di raffreddare. Il fenomeno appena descritto viene decisamente interrotto dalle fasi di ipergravità: grazie ad esse si riescono a liberare momentaneamente i blocchi e in alcuni casi a recuperare delle zone. La sensibilità alle accelerazioni è invece totalmente assente per quello che concerne il comportamento termico nell'orientazione orizzontale. Questo risultato porta un grande aiuto nel dimensionamento di una PHP per un'applicazione spaziale, sarebbe a questo punto possibile testare una PHP a terra in posizione orizzontale ed ottenere le stesse prestazioni termiche che avrebbe in assenza di gravità. Sono poi molto importanti i transitori che si innescano nella PHP in posizione verticale quando si ha il passaggio alla fase di microgravità. Si denota infatti un istantaneo peggioramento delle prestazioni termiche e l'innescò di un transitorio che però non raggiunge lo stato stazionario per mancanza di tempo. Esso tuttavia copre già un'ampia parte: dalle prove successivamente effettuate (simulazione transitori a terra) si vedrà infatti che lo stato stazionario potrà essere ampiamente raggiunto in circa 120s. La cosa interessante sarebbe osservare tali transitori e confrontarli con quelli che si otterrebbero a terra cambiando repentinamente la posizione della PHP da verticale a orizzontale e vedere se essi sono compatibili. Se così fosse un cambio di orientazione provocherebbe lo

stesso effetto di un cambio nell'accelerazione di gravità nel sistema fornendo un'ulteriore prova che uno studio a terra può essere affidabile per prevederne il comportamento a vari regimi di gravità e nei transitori. È inoltre chiaro come ad ogni parabola si abbassino le temperature del condensatore. Si può giustificare ciò semplicemente ragionando sul bilancio energetico all'interno della PHP, infatti, asportando meno calore all'evaporatore, il condensatore riceve meno energia diminuendo la sua temperatura. Le resistenze termiche degli altri due voli possono essere consultate alla fine del capitolo 6.

## 5 Transitori di volo simulati a terra

Con la PHP in volo in posizione verticale nel momento in cui si innesca la microgravità si assiste a un transitorio che porta le temperature ad innalzarsi. Con la PHP in orizzontale l'effetto della gravità, a livello termico, è invece nullo. E' quindi interessante simulare i transitori che si verificavano in volo anche a terra, il tutto semplicemente cambiando l'orientazione della PHP da verticale a orizzontale (emulando la situazione di PHP in assenza di gravità). Ovviamente le condizioni di partenza del transitorio sono differenti poiché in volo è presente una variazione di forza di gravità da 1.8g a 0g, a terra sarebbe come passare da 1g a 0g, idem per il rientro. Tuttavia questo tipo di prove porta a dei risultati molto interessanti, i transitori nelle due situazioni risultano davvero molto simili. Possiamo osservare dal diagramma della pressione come ogni volta che si presenti una situazione di instabilità delle condizioni al contorno e che si inneschi un transitorio questa grandezza termodinamica raggiunga dei picchi; anche così, inoltre, nelle fasi in cui si dovrebbe simulare l'assenza di gravità con PHP orizzontale, le oscillazioni diminuiscono rispetto al caso verticale. Le prove svolte in questo capitolo sono state tutte effettuate con PHP avente filling ratio pari al 50%.

### 5.1 PHP da 40W a 100W

Nel grafico sottostante sono presenti tutte le parabole simulate in sequenza, nel grafico successivo l'accelerazione di gravità che mostra il cambio di orientazione.

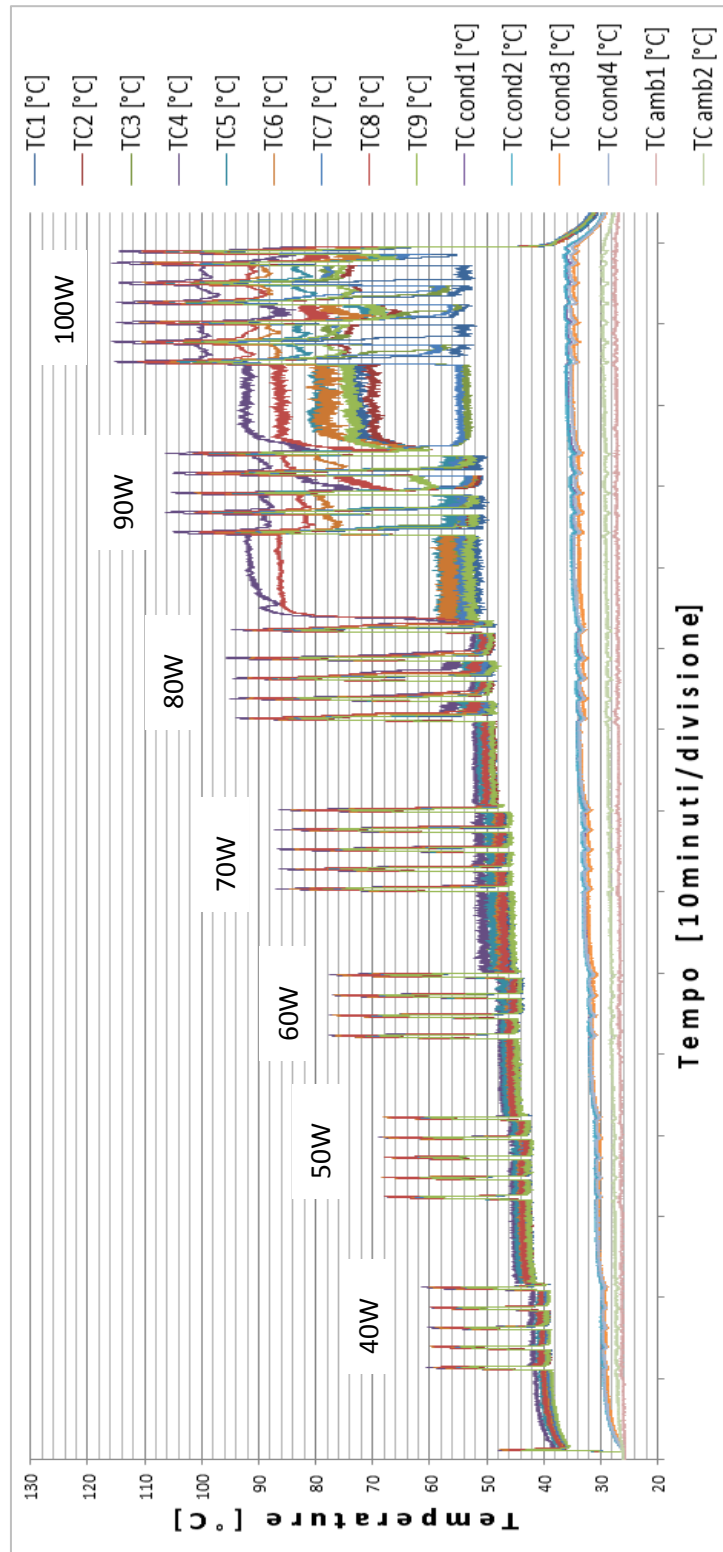


Figura 5-1 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo, transitori simulati a terra

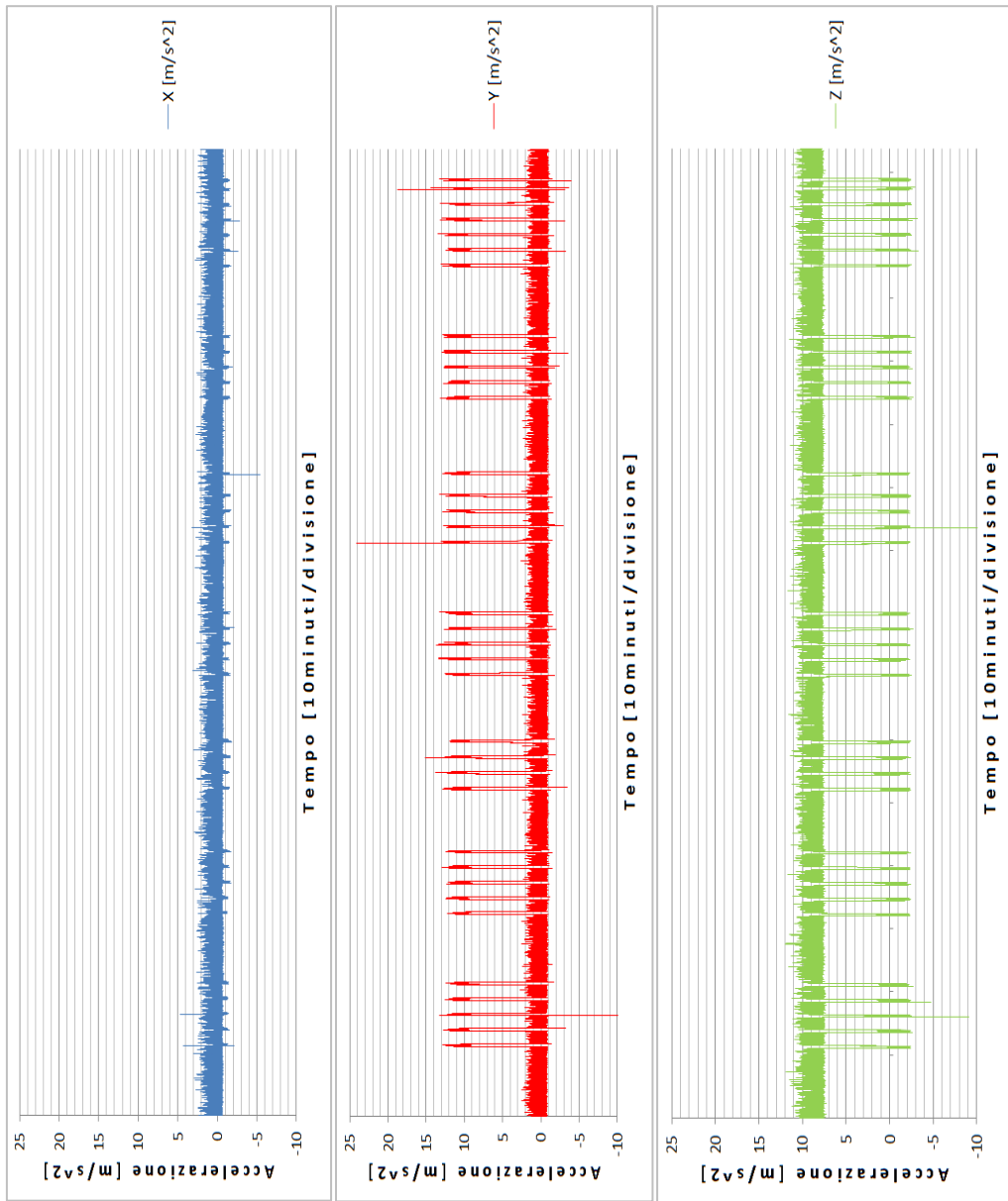


Figura 5-2 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

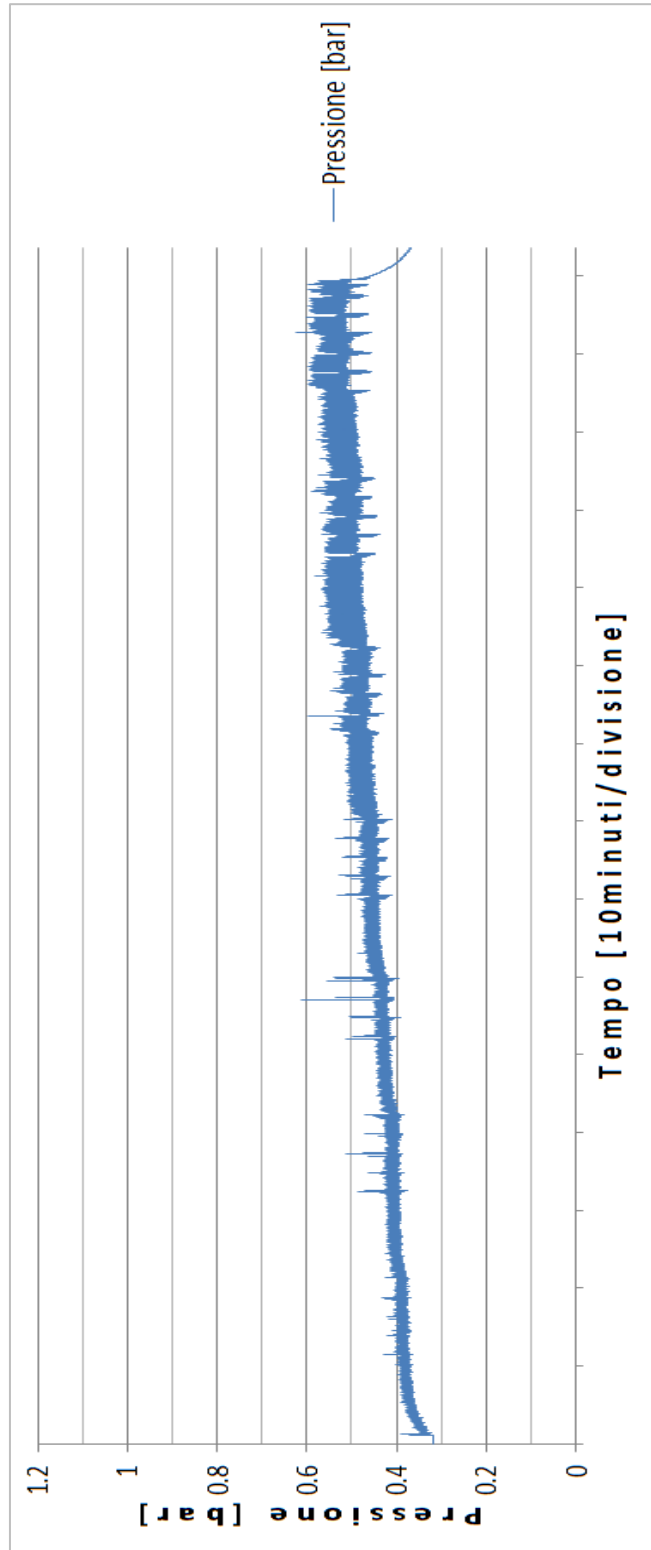


Figura 5-3 Pressione rilevata dal sensore nel tempo

### **5.1.1 PHP da 40W a 100W, confronto dei due comportamenti dinamici**

Per confrontare i transitori si è optato per una curva di potenza molto simile a quella applicata in volo, cioè sono state mantenute circa le stesse tempistiche e gli stessi livelli di potenza. La partenza delle prove è avvenuta con PHP verticale e potenza termica fornita ai riscaldatori di 40W, si è inizialmente aspettato 10 minuti per permettere al transitorio di esaurirsi, successivamente si è ruotata la PHP in posizione orizzontale per 22s per poi riportarla in verticale, attendendo circa due minuti prima del successivo ciclo in orizzontale a pari potenza. Ad ogni cambio di potenza si è sempre aspettato 10 minuti per poter raggiungere lo stato pseudo stazionario. Proponendo una sequenza di operazioni come questa, si sono ottenuti dei dati molto ben comparabili con quelli registrati in volo. Tutte le variazioni sono avvenute manualmente modificando il supporto della PHP con due piedini aggiuntivi in modo da mantenerlo in piano anche in posizione orizzontale e far sì che rimanesse in piano; i cavi sono stati lasciati collegati ed è bastato posizionare il rack in modo da avere il suddetto supporto vicino ad esso. Non è facile ottenere un cambio identico a quello che si avrebbe in volo, è stata comunque curata il più possibile la pulizia e la precisione dell'operazione per cambiare orientazione dato che non era possibile realizzare in breve tempo un sistema automatico economico ed affidabile per i nostri scopi. Ad ogni modo in tutte le prove si riscontrano dei transitori praticamente identici: le differenze di temperatura tra inizio e fine sono sempre le stesse, cambiano a volte le temperature di partenza all'evaporatore a causa delle differenti temperature ambiente a cui sono state svolte le prove. In laboratorio difficilmente si riesce a scendere sotto i 26°C nonostante l'impianto di climatizzazione acceso nel mese di Luglio. Alle volte si possono notare dei picchi misurati dall'accelerometro per via del lieve colpo quando si appoggia il supporto nella posizione definitiva orizzontale o verticale.

### 5.1.2 Transitorio a terra cambiando orientazione con PHP a 40W

Le temperature, nello stato stazionario, stanno in una fascia compresa tra i 38°C e i 42°C, in seguito al repentino cambio di orientazione vengono raggiunti dei picchi vicini ai 60°C o lievemente superiori. Il cambio di orientazione peggiora il comportamento termico della PHP e innesca i transitori.

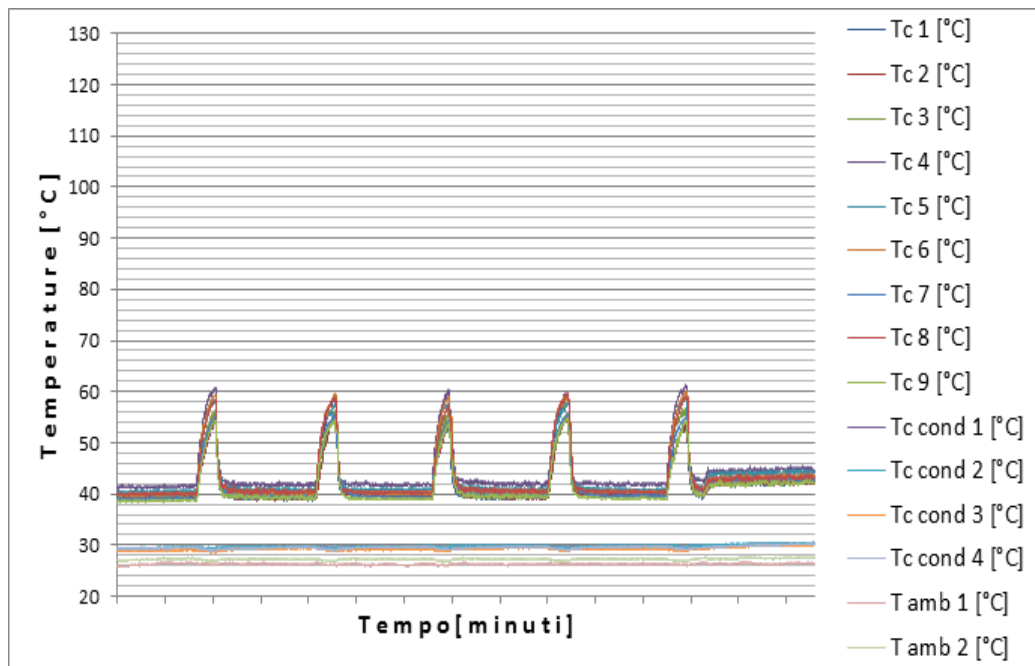


Figura 5-4 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 40W



### 5.1.3 Transitorio in volo cambiando regime di gravità con PHP a 40W

In volo le temperature dello stato stazionario stanno in una fascia leggermente più bassa per via di una minore temperatura ambiente: nella prova a terra TC\_amb1 è pari a circa 26°C, in volo invece assume valori prossimi ai 24°C. All'evaporatore le temperature si trovano in una fascia compresa tra i 36°C e i 40°C, più bassa di 2°C rispetto a quella a terra proprio come quella ambiente. I picchi raggiungono valori intorno ai 58°C. Si può quindi affermare che le differenze di temperatura nei transitori sono praticamente identiche, in tutti e due i casi, modificando e l'orientazione e il campo di forze per circa 22s, si ottengono delle differenze di temperatura pari a circa 20°C. La fisica del fenomeno è quindi la stessa nel caso di assenza di gravità e di PHP in posizione orizzontale, conclusione sensata a seguito di una così forte analogia tra le grandezze misurate.

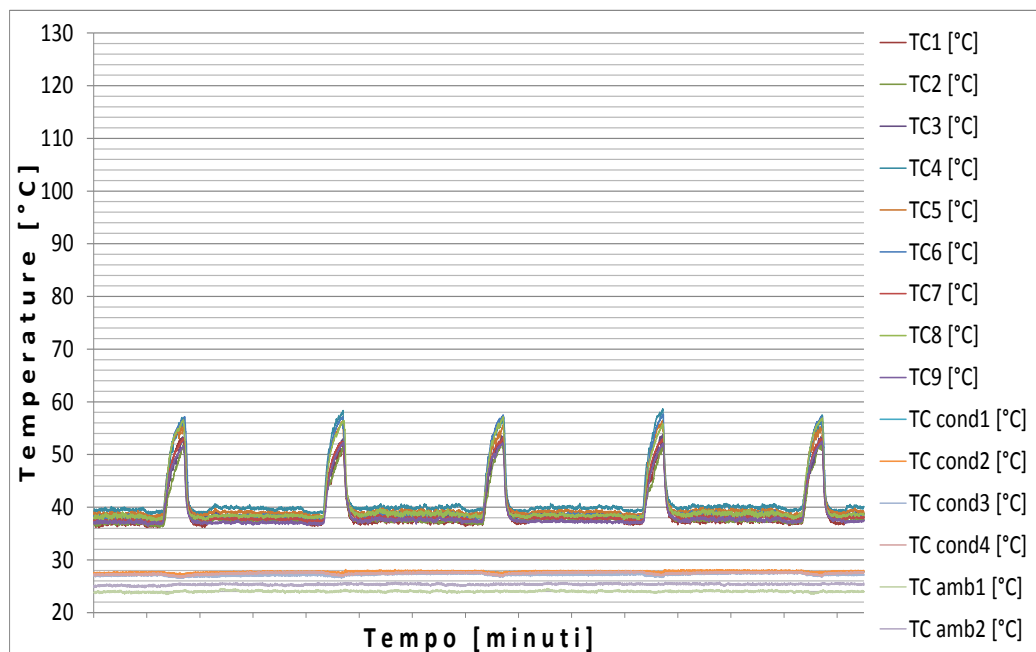


Figura 5-5 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio in volo e PHP a 40W

N.B.: le altre serie di parabole e rispettive simulazioni possono essere consultate nell'appendice D

### 5.1.4 Transitorio a terra cambiando orientazione con PHP a 90W

Come anticipato nel capitolo precedente, aumentando la potenza si iniziano a vedere i veri e propri effetti di malfunzionamento dovuti all'otturazione dei canalini da parte del vapore. Alcune temperature rimangono sempre in una fascia di valori piuttosto ristretta mentre altre assumono dei valori decisamente più alti. Non ha quindi molto senso parlare di una vera e propria temperatura media dell'evaporatore. Tuttavia nei transitori vengono sempre e comunque raggiunti picchi intorno ai 105°C in maniera piuttosto uniforme come nei casi precedenti. Si può notare come, nonostante l'assenza della fase a 1.8g, le temperature dopo i transitori tendano lo stesso ad assumere un range di temperature più basso prima di riallontanarsi definitivamente. Inoltre non sono sempre le stesse termocoppie a dare questi valori decisamente più alti: l'instabilità del transitorio aiuta quindi a destabilizzare anche i blocchi anche se a volte cambiano solo i canali otturati ma non la quantità.

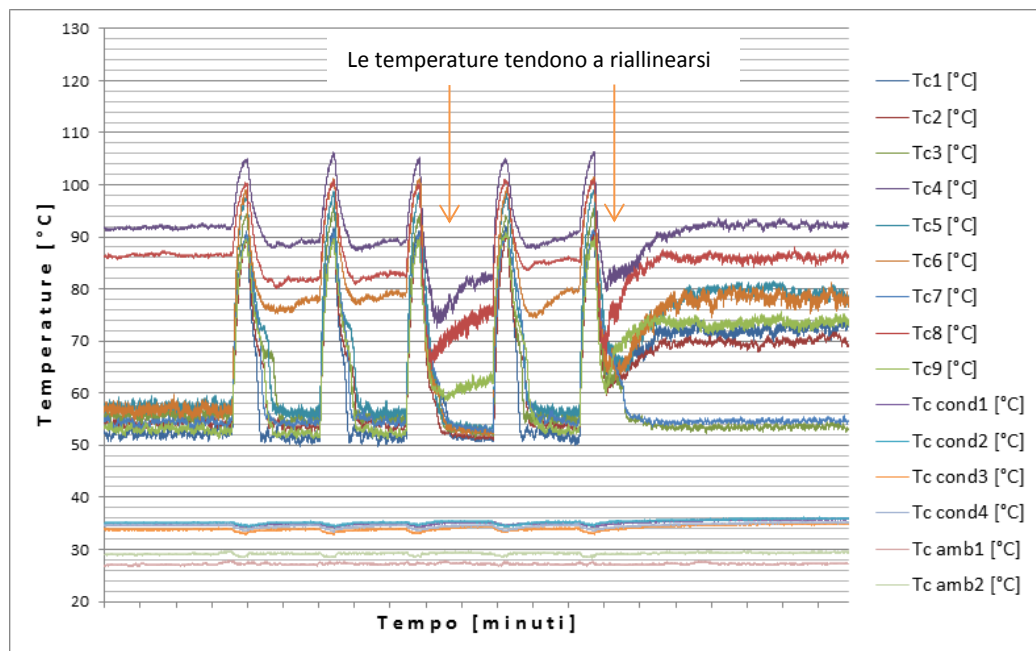


Figura 5-6 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 90W

### 5.1.5 Transitorio in volo cambiando il regime gravitazionale con PHP a 90W

Nella fase preliminare di raggiungimento dello stato stazionario si rileva una situazione abbastanza simile a quella a terra, con tre temperature fuori dalla fascia dove giacciono le altre. Nelle fasi a 1.8g l'effetto di rientro delle temperature è davvero molto marcato, addirittura sembrano riallinearsi per qualche istante con le altre ma, come si ritorna all'accelerazione pari a 1g, riprendono i loro consueti valori più elevati. Interessante notare come tra le parabole due, tre e quattro una temperatura rientri inizialmente nella fascia di valori più bassi per poi assumere di nuovo un valore decisamente più elevato della media. Questo è un altro sintomo dell'effetto benefico avuto dai transitori sul moto del fluido nel serpentino di rame: è come se l'instabilità delle condizioni al contorno aiutasse a mantenere l'instabilità all'interno della PHP favorendo la corretta circolazione del fluido. I picchi raggiungono in questo caso dei valori prossimi ai 100°C, leggermente più bassi del caso a terra sempre per via della temperatura ambiente più bassa e, probabilmente, anche grazie ad un abbassamento della temperatura media dell'evaporatore nella fase a 1.8g, effetto del tutto assente a terra. I due fenomeni sono ancora in completa analogia come d'altronde in tutte le altre simulazioni osservabili in appendice, se non fosse per la fase a 1.8g presente nel volo si potrebbe affermare addirittura che si tratti dello stesso identico tipo di fenomeno che influisce sul comportamento termico della PHP.

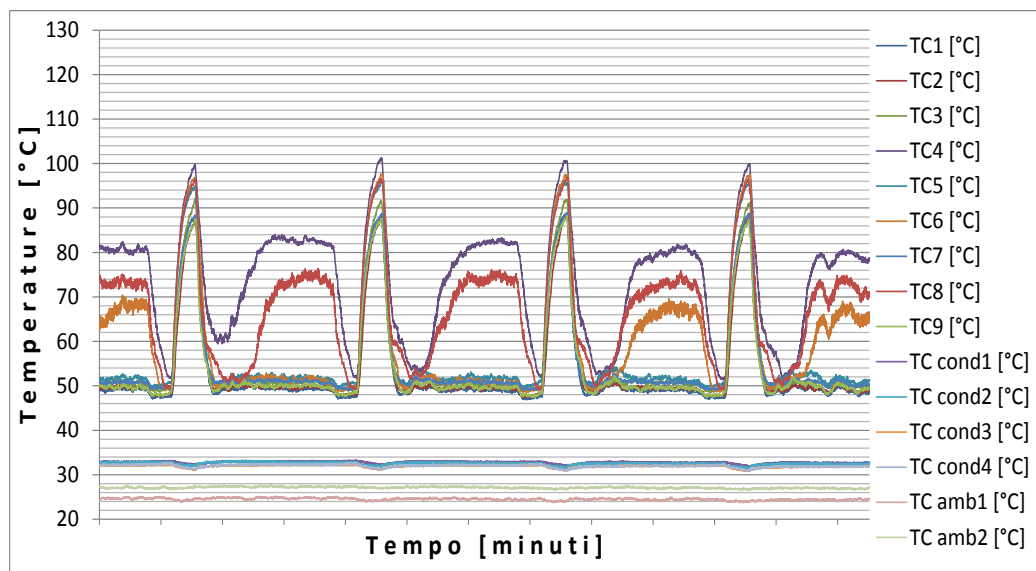


Figura 5-7 Temperature evaporatore, condensatore e ambiente per transitorio in volo e PHP a 90W

## **5.2 PHP da 100W a 40W, confronto tra i due comportamenti dinamici**

Le stesse prove di transitorio sono poi state simulate cambiando orientazione da verticale a orizzontale, partendo da una potenza di 100W per poi via via abbassarla. Lo scopo è sempre quello di notare se i comportamenti sono gli stessi anche per quello che riguarda l'isteresi. Nella figura sotto si possono osservare, prima di analizzare separatamente le simulazioni delle serie di parabole, tutti i transitori riprodotti a terra uno di seguito all'altro, assieme alle variazioni di accelerazione di gravità che indicano il cambio di orientazione della PHP. Anche in questo caso il trend della pressione è leggermente decrescente con dei picchi all'innesco dei transitori e una diminuzione di oscillazione nelle fasi che simulano l'assenza di gravità.

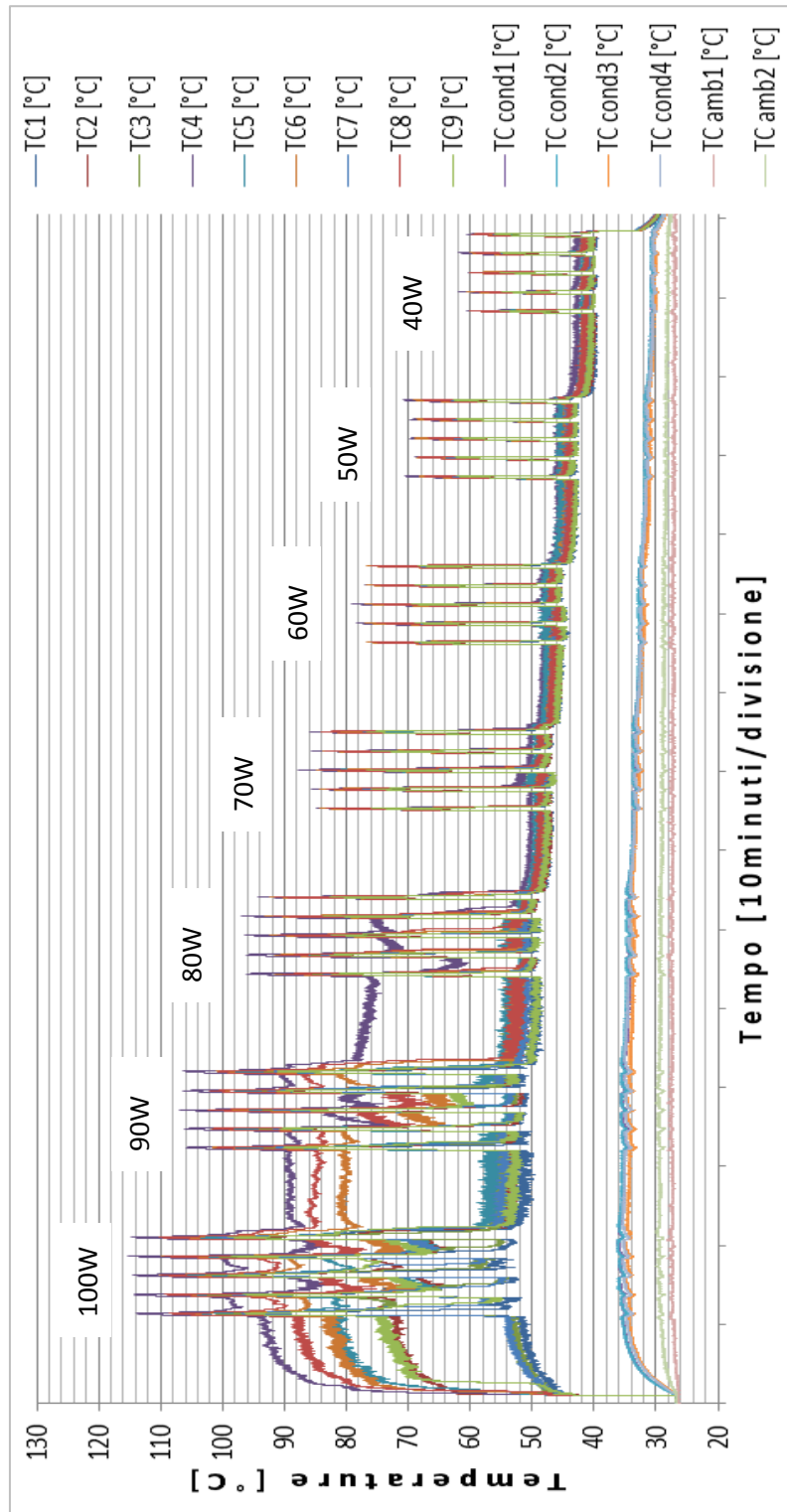


Figura 5-8 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo, transitori simulati a terra

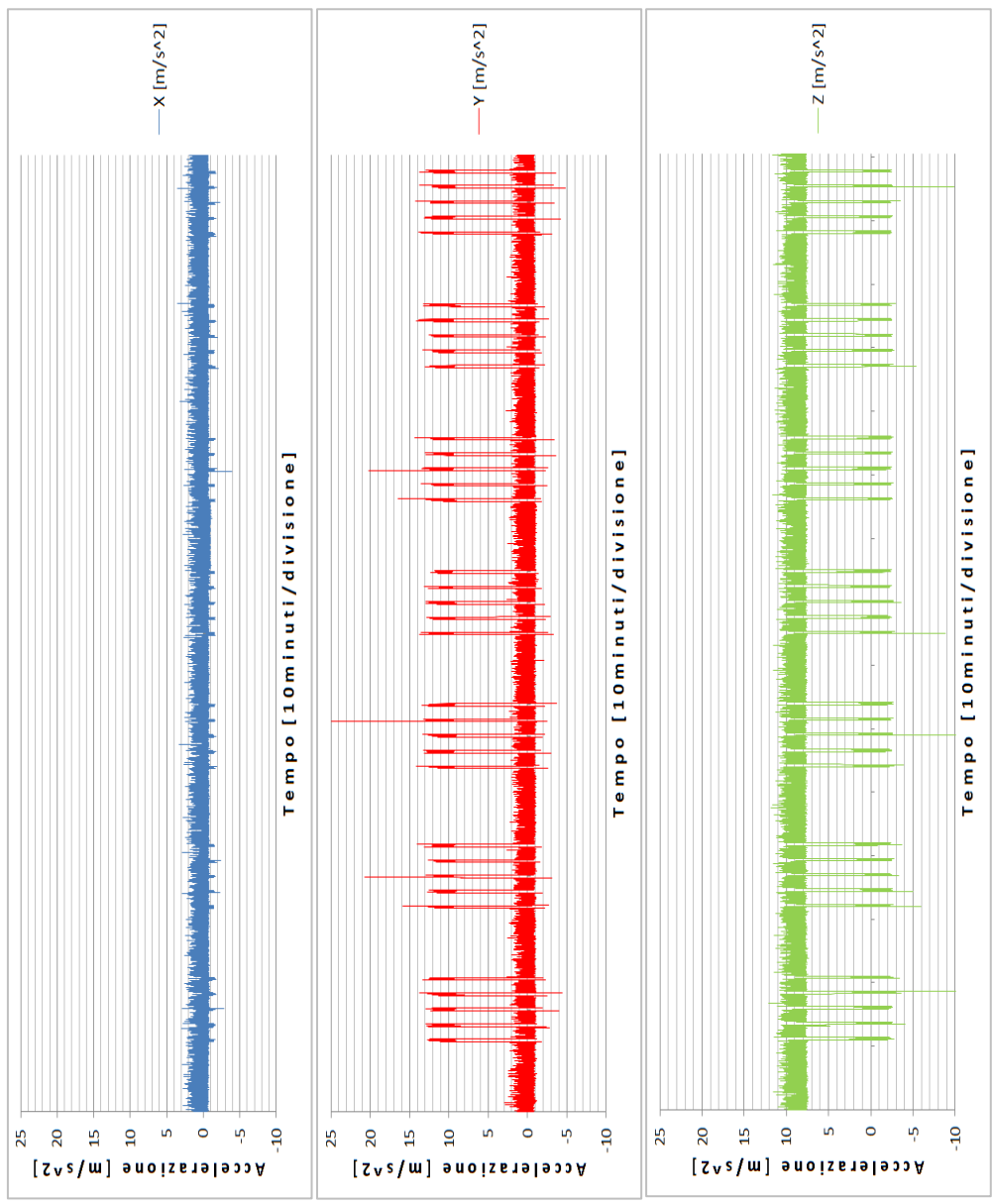


Figura 5-9 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

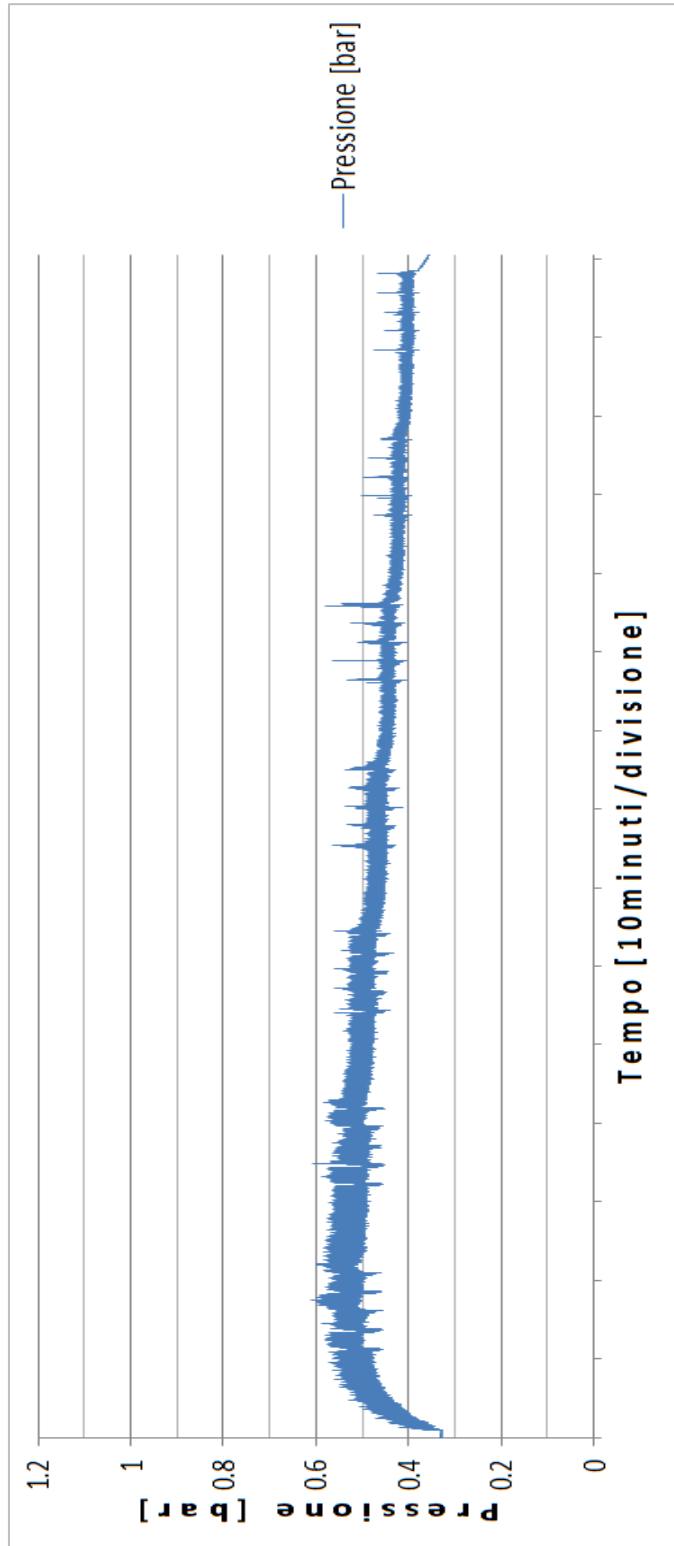


Figura 5-10 Pressione rilevata dal sensore nel tempo

### 5.2.1 Transitorio a terra cambiando orientazione con PHP a 100W

Impostando subito la potenza a 100W e raggiungendo lo stato stazionario si osserva che quasi tutte le temperature sono molto differenti tra loro e faticano a stare in una fascia ristretta di valori, non ha quindi senso definire una temperatura media dell'evaporatore neppure in questa situazione. Il punto di partenza di queste prove è comunque piuttosto simile al punto di arrivo a 100W per le simulazioni a terra (caso non trattato singolarmente poiché in volo non si erano raggiunti i 100W con potenza termica crescente). I picchi di temperatura nei transitori raggiungono valori intorno ai 114°C, alla conclusione di ogni transitorio c'è sempre un accenno di abbassamento delle temperature che tendono a ristabilirsi in un range mediamente più basso, occupato generalmente solo dai valori di tre termocoppie. Dopo il secondo e il quarto cambio di orientazione ne rimangono invece solamente due in questa fascia più bassa. Chiaramente a questo livello di potenza la PHP funziona molto male e parecchi canali sono bloccati dal vapore: la circolazione del fluido è tutt'altro che ottimale.

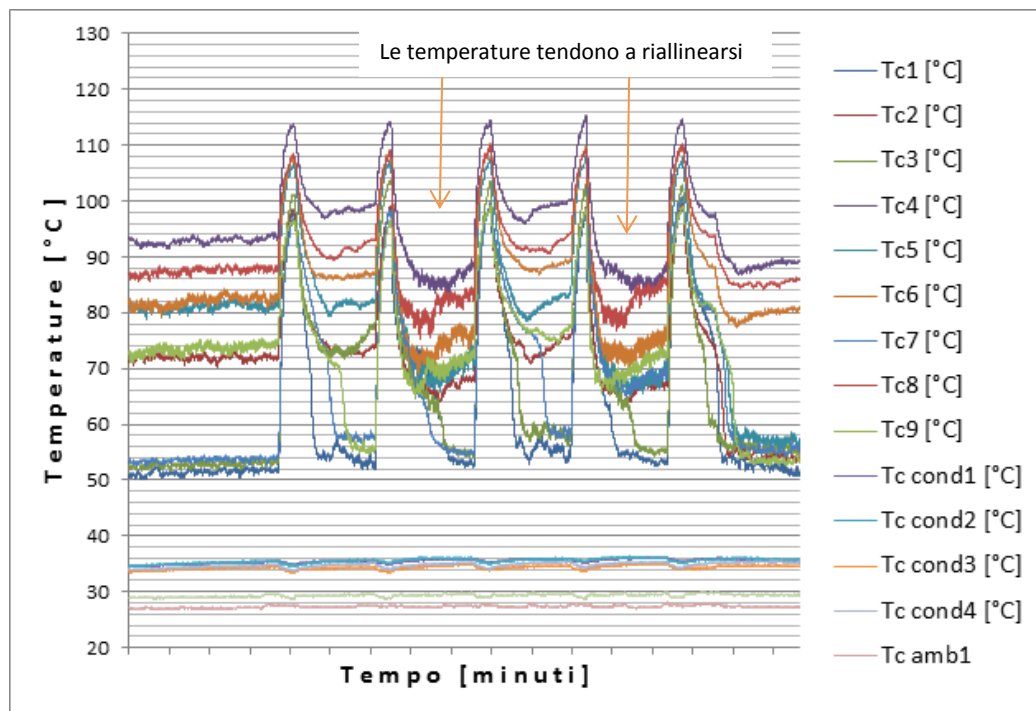


Figura 5-11 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 100W



## 5.2.2 Transitorio in volo variando il regime gravitazionale con PHP a 100W

Analogamente a 100W in volo, dopo aver raggiunto lo stato stazionario, la situazione è molto simile con parecchie temperature che assumono valori elevati e distanti tra loro impedendo una corretta e sensata stima della temperatura media dell'evaporatore. Anche in questo caso è evidente il funzionamento non ottimale. La situazione viene comunque migliorata dalla presenza delle fasi a 1.8g: prima e dopo la microgravità le temperature tendono a rientrare tutte quante in una fascia di valori molto vicini tra loro e mediamente più bassi, in uscita dalle parabole il numero delle temperature che si allontanano è variabile, in genere assumono valori inferiori dalle due alle quattro temperature. I picchi raggiungono anche in questo caso valori intorno ai 114°C. E' importante sottolineare che le temperature ambiente delle due prove sono in questo caso molto simili: oscillano entrambe appena al di sotto dei 28°C, i valori massimi raggiunti nei transitori sono infatti molto vicini.

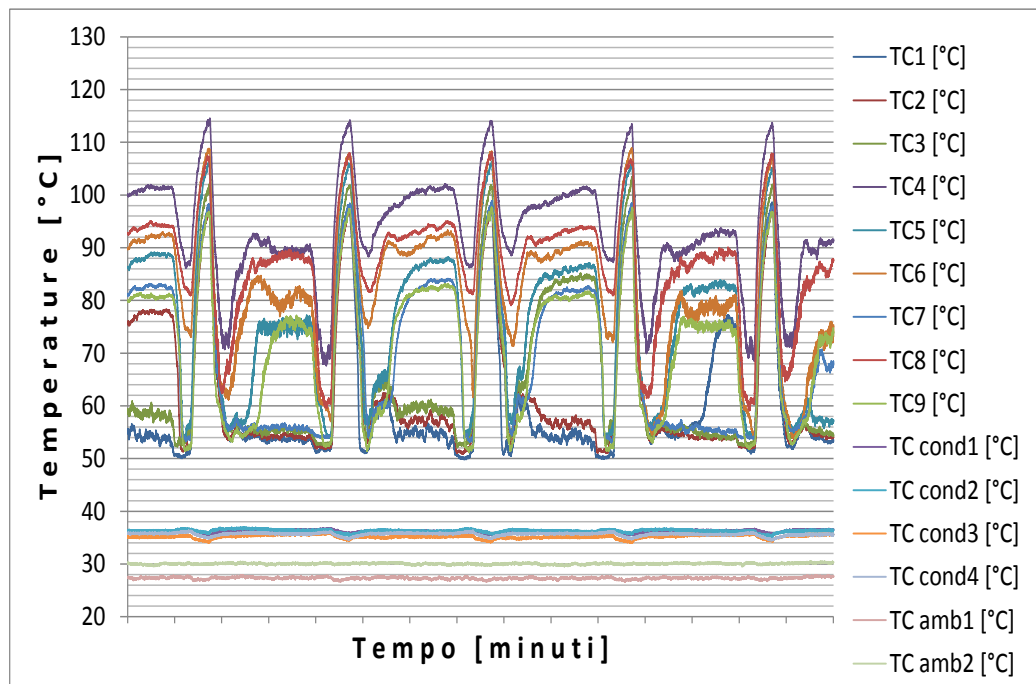


Figura 5-12 Temperature evaporatore, condensatore e ambiente per transitorio in volo e PHP a 100W

### 5.2.3 Transitorio a terra cambiando orientazione con PHP a 90W

Abbassando la temperatura e lasciando passare circa 10 minuti molte temperature tendono a ristabilizzarsi in una fascia di valori più bassi, solamente tre ne rimangono fuori. Non ha ancora comunque senso stimare una temperatura media dell'evaporatore, in seguito alla quarta parabola abbiamo addirittura quattro valori fuori dall'intervallo inferiore. Dopo i transitori si osserva sempre un accenno di abbassamento delle temperature, il ripristino delle condizioni di 1g non è comunque sufficiente a permettere il rientro dei valori. I picchi raggiungono nei punti più alti temperature intorno ai 106°C.

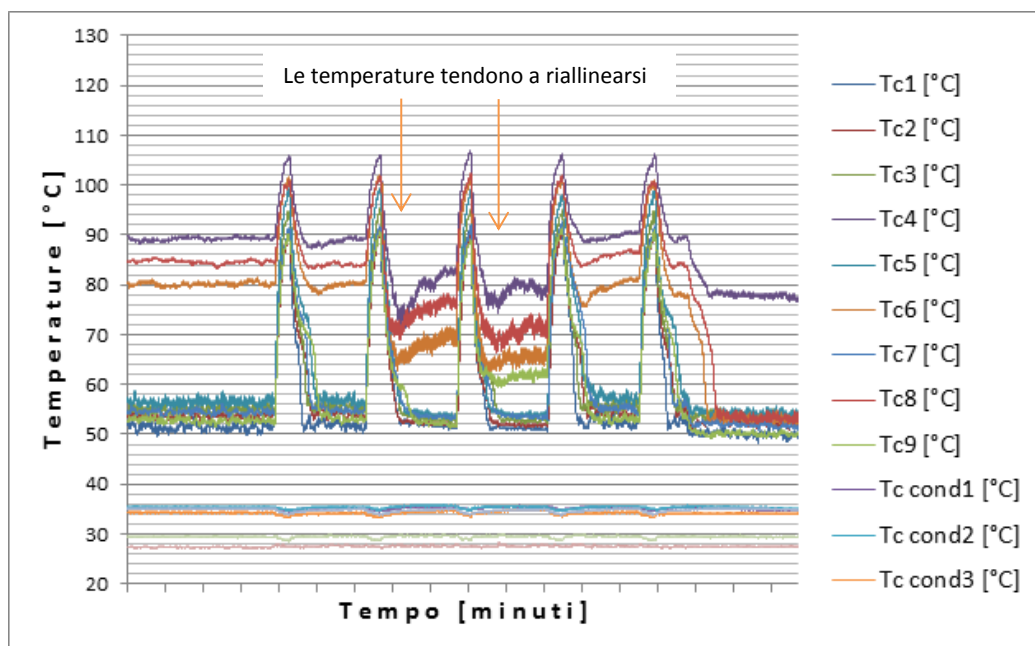


Figura 5-13 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 90

## 5.2.4 Transitorio in volo variando il regime gravitazionale con PHP a 90W

Anche qui in una fase iniziale dopo aver fatto esaurire il transitorio si può notare come tre valori di temperatura si trovino al di fuori della fascia di quelli più bassi occupata da tutte le altre. La fase a 1.8g prima della microgravità fa riavvicinare tutti i valori di temperatura in un intervallo più basso: aiuta chiaramente a liberare i canali dalle ostruzioni riportando la corretta circolazione del fluido in tutte le zone. Addirittura, nelle fasi centrali della prova, sono presenti solamente due valori nettamente sopra la media, ulteriore prova che le fasi di ipergravità sono benefiche al moto del fluido nel serpentino. I picchi raggiungono valori di circa 104°C, leggermente inferiori al caso a terra, probabilmente sempre perché prima della microgravità si ha un maggior raffreddamento dell'evaporatore.

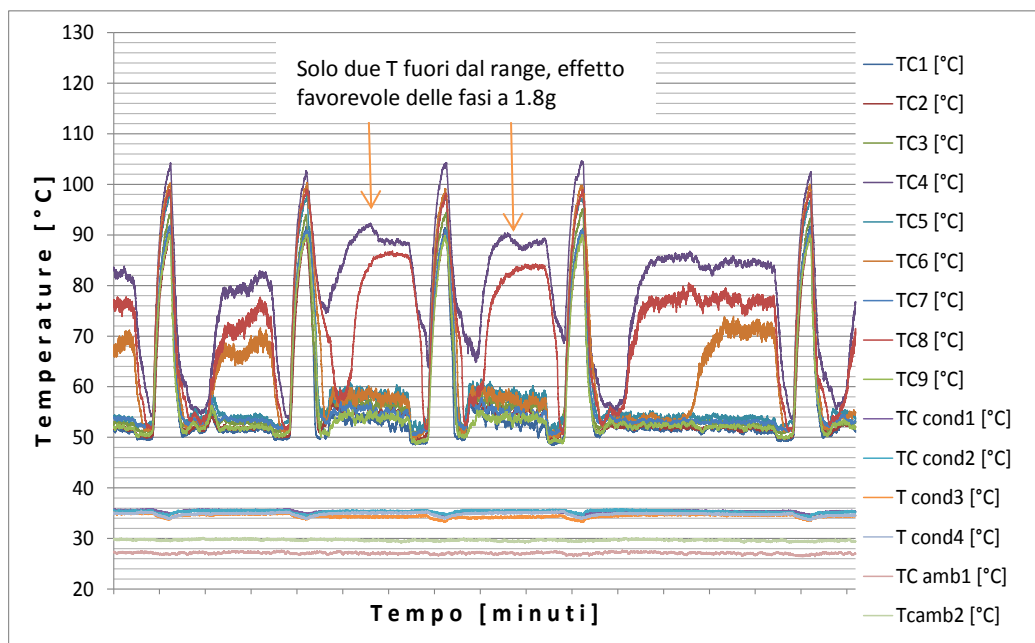


Figura 5-14 Temperature evaporatore, condensatore e ambiente per transitorio in volo e PHP a 90W

### 5.2.5 Transitorio a terra cambiando orientazione con PHP a 80W

Abbassando il livello di potenza solo una temperatura rimane fuori dalla fascia occupata da tutte le altre, dopo gli ultimi due transitori anch'essa si uniforma nell'intervallo occupato dalle restanti. Come già osservato precedentemente nel capitolo 5.1.4, la conclusione dei transitori è favorevole al moto del fluido e tende a far rientrare le temperature nei consueti valori; in questo caso infatti essi riportano tutti valori in una fascia piuttosto omogenea, aiutando l'evaporatore ad essere più possibile isoterma. I picchi durante il transitorio raggiungono temperature di circa 96°C. Alcune tendono a rientrare con qualche difficoltà in più dopo le fasi di transitorio, probabilmente il cambio di orientazione, avvenuto manualmente, non è stato abbastanza repentino.

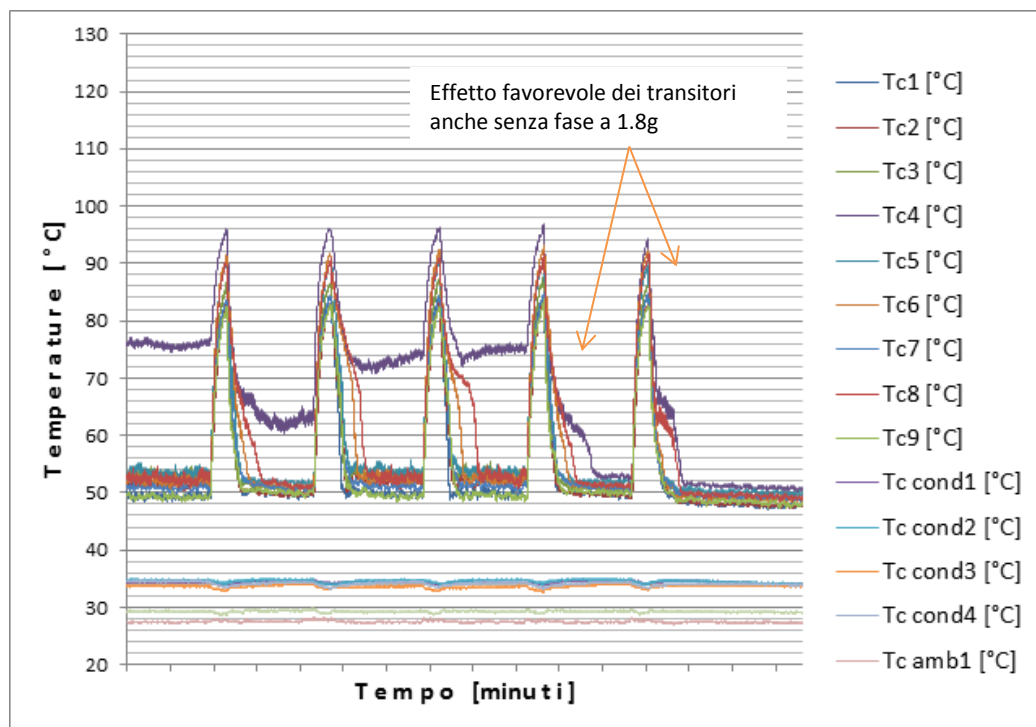


Figura 5-15 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 80W

### 5.2.6 Transitorio in volo ottenuto cambiando il campo gravitazionale con PHP a 80W

Nella prova in aereo tutte le temperature rientrano in una fascia di valori omogenea compresa tra i 48°C e i 54°C. Le maggiori vibrazioni provocate dal velivolo aiutano in maniera non trascurabile a liberare i canalini bloccati. Il range delle temperature tende tuttavia a diventare più ampio col proseguire delle parabole: dopo la seconda il suo valore massimo si alza e tocca in certi istanti anche i 60°C, i picchi raggiungono valori intorno ai 94°C, leggermente più bassi del caso a terra, probabilmente sempre per via dell'evaporatore meglio raffreddato grazie alle fasi a 1.8g.

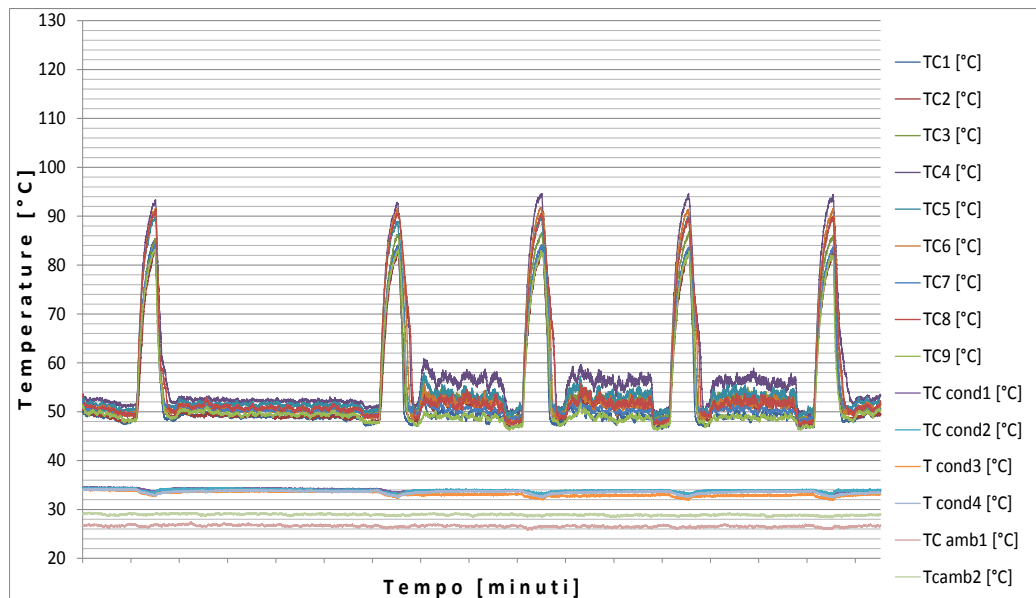


Figura 5-16 Temperature evaporatore, condensatore e ambiente per transitorio in volo e PHP a 80W

N.B.: le altre sequenze di parabole possono essere consultate nell'appendice E

### 5.3 Conclusioni simulazioni transitori

Confrontando i transitori ottenuti sull'aereo con quelli simulati a terra si può affermare che essi sono tra di loro compatibili. E' possibile ottenere effetti molto simili a quelli che si possono rilevare variando il campo gravitazionale solamente cambiando l'orientazione della PHP. Le variazioni di temperature e le tempistiche in cui avvengono sono quasi sempre le stesse tranne nel caso in cui la PHP non funzioni adeguatamente per via del parziale dry-out dell'evaporatore, in quella situazione la fase a 1.8g aiuta molto ad eliminare le

bolle bloccate nelle curve e a raffreddare maggiormente l'evaporatore. Tuttavia, nel campo di funzionamento ottimale, i comportamenti sono assolutamente simili e i tempi di risposta praticamente identici. Tutte queste informazioni possono essere utilissime per un dimensionamento del supporto a fini aerospaziali dato che, con dei test a terra che ne simulino il suo comportamento in orbita, sarebbe possibile capirne le prestazioni in termini di temperature dell'evaporatore e di capacità di smaltire potenza termica per esempio prodotta da apparecchiature elettroniche.

#### 5.4 Esaurimento transistori realizzati con cambio di orientazione

Vista la precedente analogia tra i transistori a terra e in volo si è voluto osservare quale valore di regime stazionario si sarebbe raggiunto al termine di un cambio di orientazione e in quanto tempo. Con questa informazione possiamo realmente capire quale sarebbe il peggioramento delle prestazioni della PHP per condizioni prolungate di assenza di gravità e quanto tempo impiega a raggiungere uno stato stazionario. In questo tipo di prove sono stati studiati tre diversi regimi di potenza: 50W,70W,90W. Per ciascuno di essi si è atteso 20 minuti in modo da poter raggiungere agevolmente lo pseudo stato stazionario, successivamente si è passato da verticale ad orizzontale e si è atteso altri 20 minuti per arrivare a regime in orizzontale, poi di nuovo a verticale per 20 minuti.

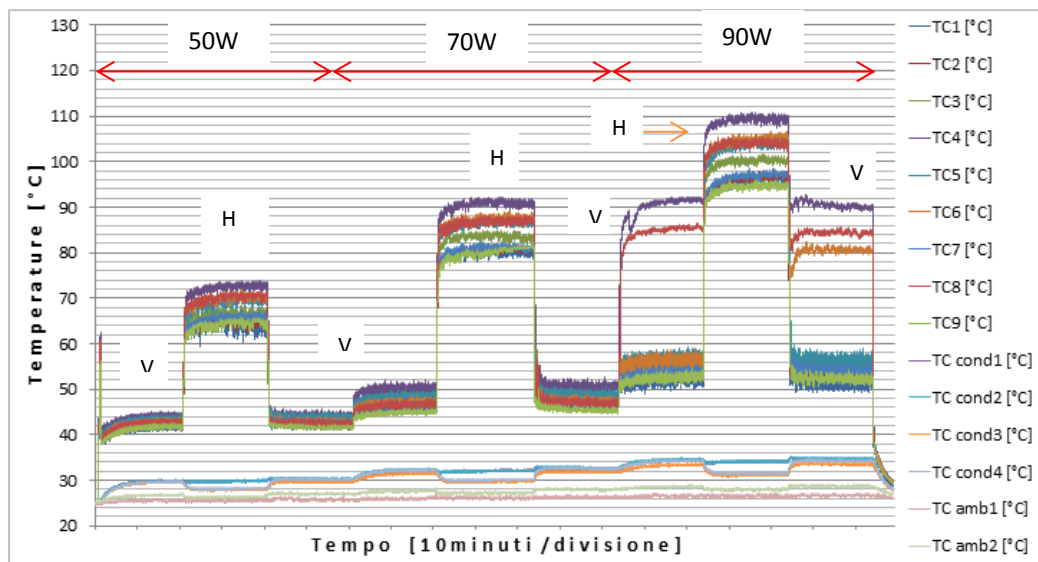


Figura 5-17 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transistori lunghi

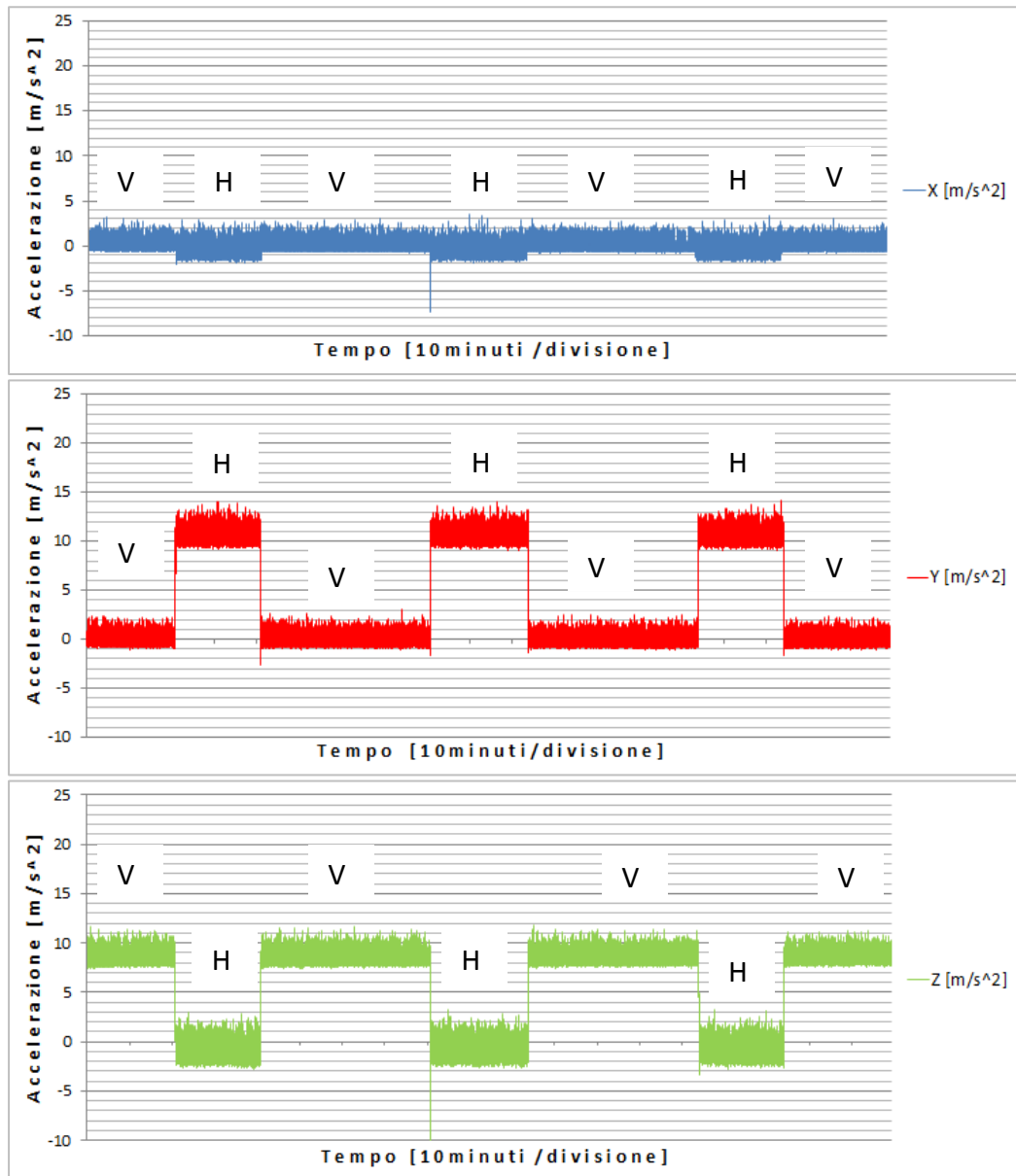


Figura 5-18 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

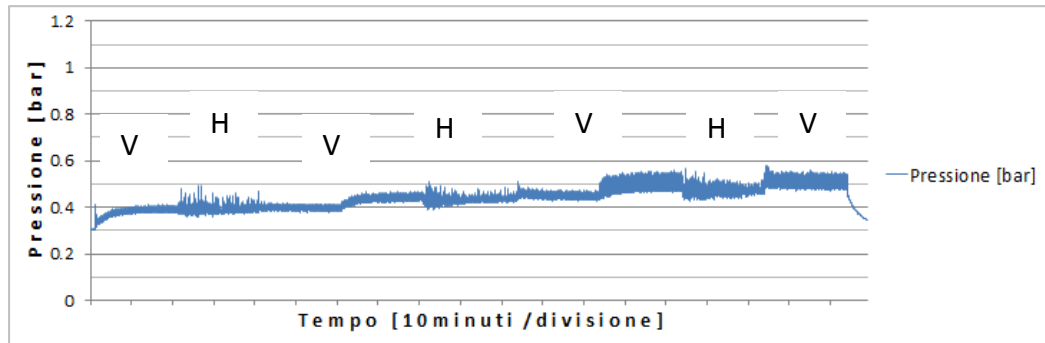


Figura 5-19 Pressione rilevata dal sensore nel tempo

#### 5.4.1 Esaurimento transitorio con potenza a 50W

Dal grafico sotto riportato si può facilmente osservare come il transitorio si esaurisca in circa 2 minuti, la risposta della PHP è quindi piuttosto veloce almeno all'evaporatore; purtroppo il condensatore ha una grande massa e di conseguenza un'elevata inerzia termica che richiede molto più tempo per raggiungere uno stato stazionario. Quello che importa è comunque capire il comportamento nella parte calda, quindi critica, perché non deve superare alcuni limiti imposti dall'integrità dei sistemi da raffreddare.



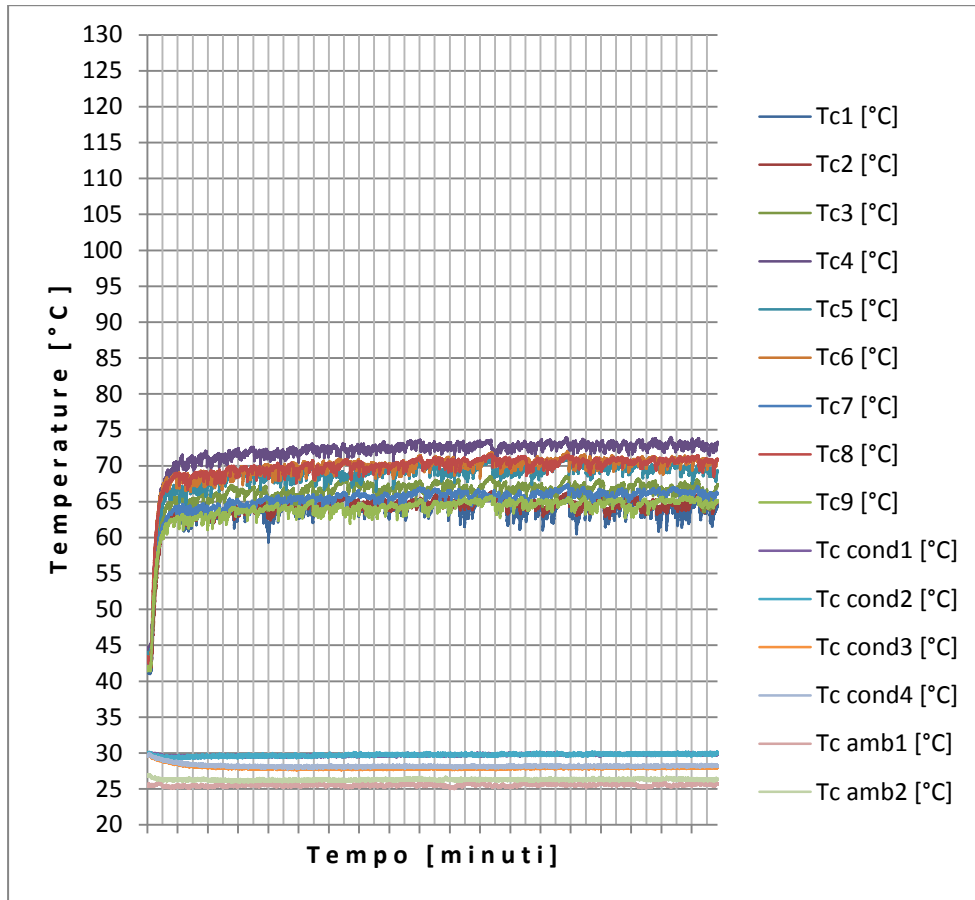


Figura 5-20 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente, particolare esaurimento transitorio con PHP a 50W

### 5.4.2 Esaurimento transitorio con potenza a 70W

Anche in questo caso il transitorio si esaurisce abbastanza rapidamente in circa 2 minuti. Le temperature al condensatore si abbassano significativamente poiché diminuisce l'efficienza di scambio termico in generale e quindi aumenta la temperature dell'evaporatore.

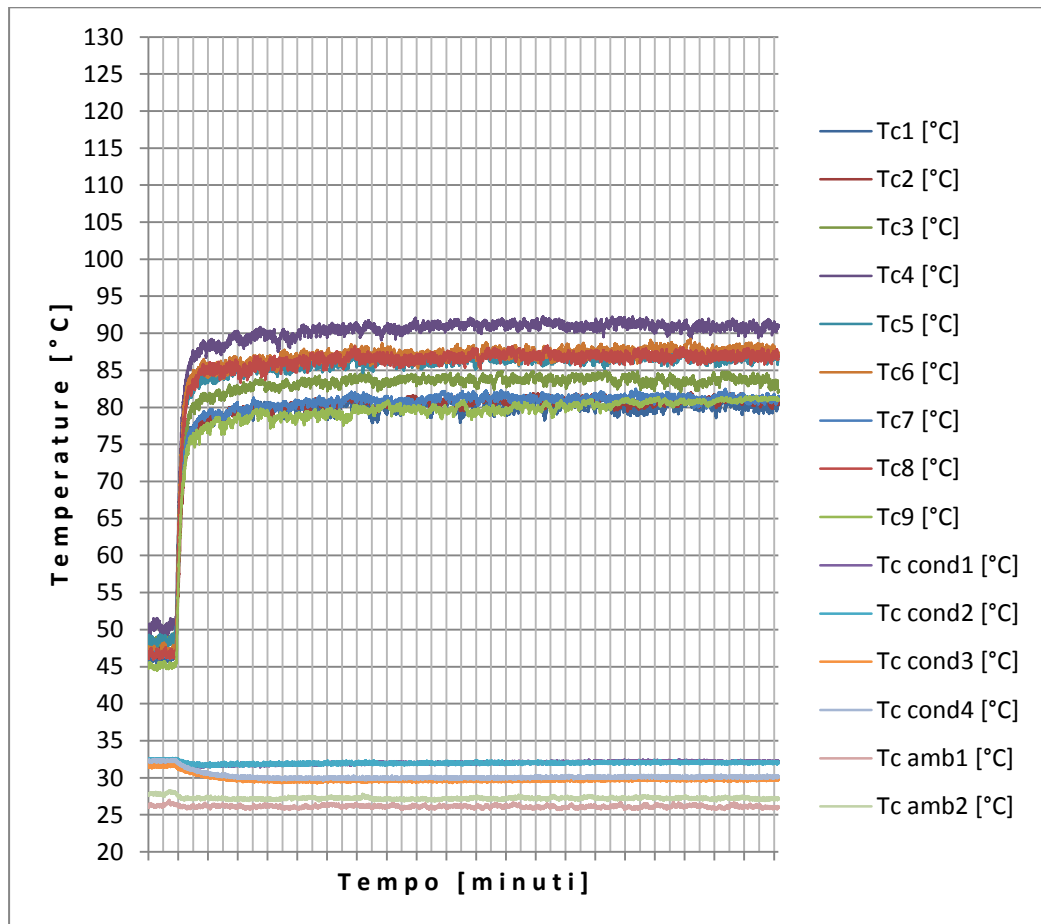


Figura 5-21 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente, particolare esaurimento transitorio con PHP a 70W

### 5.4.3 Esaurimento transitorio con potenza a 90W

Il transitorio si esaurisce sempre in circa 2 minuti, anche le temperature che sono fuori dalla fascia in cui giacciono le altre subiscono un transitorio assolutamente analogo alle altre.

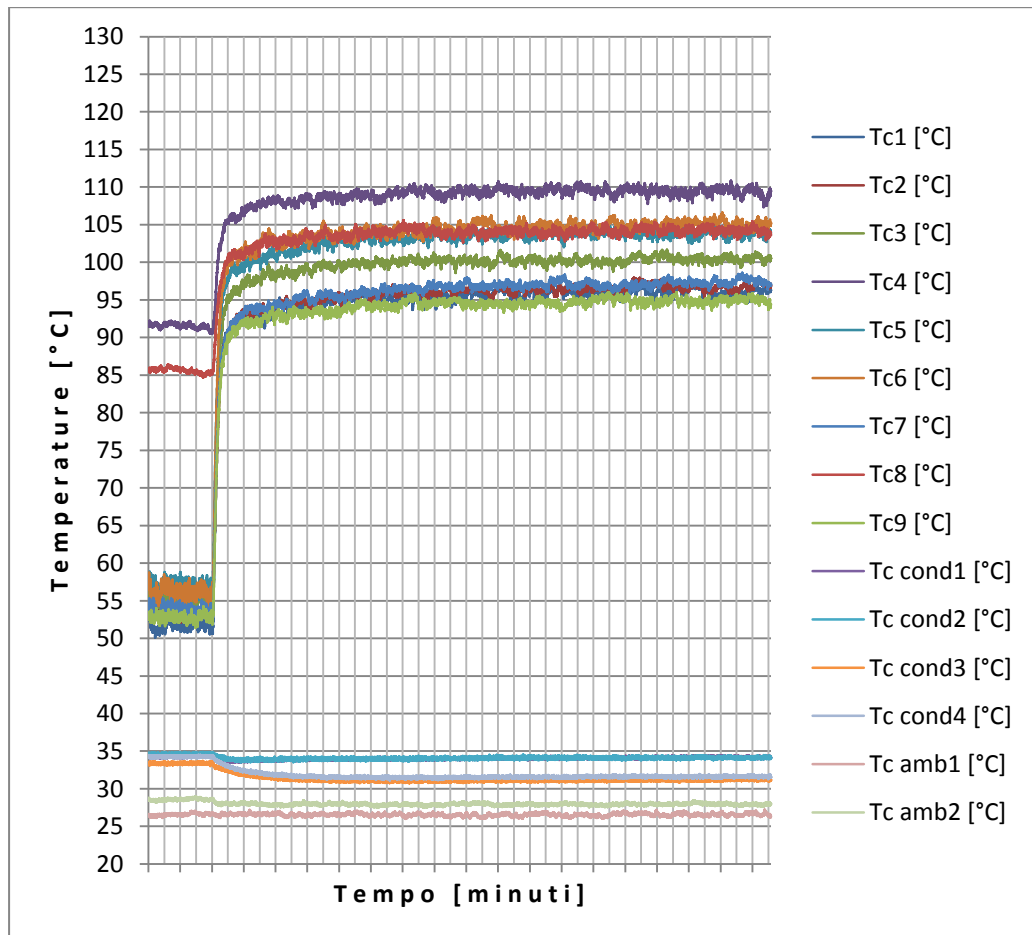


Figura 5-22 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente, particolare esaurimento transitorio con PHP a 90W

### 5.4.4 Conclusioni

La principale conclusione che si può trarre da queste prove è una forte affermazione riguardante la durata dei transitori oltre a quella di una loro ulteriore relativa compatibilità con quelli osservati in volo. L'esaurimento del

transitorio avviene in circa 120s, detto questo, la fase di microgravità ha una durata di 22s: nei test svolti durante la campagna di volo parabolico si riesce a completare almeno il 18% del transitorio. Le informazioni ricavate dalla campagna di volo parabolico possono già essere utili per stimare tutto il transitorio, osservando poi il comportamento molto simile con quello ottenuto dai transitori a terra risulterà facile estrapolare dei criteri affidabili per il dimensionamento.

## **5.5 Analisi spettrali pressione**

Visti i continui cambiamenti del comportamento della pressione con i cambi di regime di gravità, si è pensato di effettuare un'analisi spettrale del segnale in uscita dal sensore di pressione durante le fasi di microgravità e confrontarla con la stessa analisi spettrale per il segnale del sensore di gravità lungo l'asse Z. In questa maniera è possibile osservare se i due segnali possiedono delle frequenze in comune e quindi possono avere una sorta di comportamento correlato. Era già stato ipotizzato il motivo per cui la frequenza di oscillazione diminuisce nel caso di assenza di gravità e PHP in posizione orizzontale, diminuendo infatti il moto di fluido all'interno del serpentino di rame il comportamento della pressione risulta meno nervoso. Da questo tipo di analisi si evince come gli spettri di frequenza delle due grandezze siano piuttosto ben correlati per la configurazione verticale: le oscillazioni della pressione sembrano maggiormente provocate da moti dell'aereo ed influenzate dalle vibrazioni provocate dai ventilatori. Ulteriore conferma di questo fenomeno può essere osservata nella minor frequenza di oscillazioni per i momenti di assenza di gravità rispetto ai semplici cambi di orientazione. Con la PHP in orizzontale non sembra esserci alcuna correlazione tra le due grandezze, probabilmente proprio perché essa non subisce alcun effetto da parte delle accelerazioni lungo l'asse Z. Per una corretta analisi delle variazioni di pressione provocata dal moto sarebbe comunque necessario un sistema non affetto da vibrazioni o comunque perturbato da vibrazioni controllate.

N.B.: in appendice F è possibile trovare tutti i grafici relativi alle analisi spettrali.

## 6 59<sup>a</sup> campagna di volo parabolico (filling ratio 70%)

La campagna si è svolta dal 28/10/2013 al 06/11/2013, circa 5 mesi dopo la precedente. Si è optato per partecipare alla successiva campagna di volo parabolico utilizzando lo stesso rack e la stessa PHP con una diversa percentuale di riempimento di fluido. Siamo passati da un filling ratio pari al 50% ad uno pari al 70%. In questa maniera ci si è allontanati dalla situazione di ottimo a terra, poi a 0g andrà meglio. Abbiamo inoltre potuto subito constatare come questa percentuale di riempimento porti ad un funzionamento piuttosto instabile, soprattutto per alti livelli di potenza. Si è preferito evitare un livello di riempimento più basso (pari al 30%) per non ritrovarsi a potenze troppo basse in una situazione di completo dry-out all'evaporatore. I risultati ottenuti sono comunque interessanti ed hanno aggiunto informazioni allo studio delle reazioni della PHP a vari regimi di gravità.

### 6.1 Primo giorno di volo parabolico PHP verticale da 50W a 100W

L'idea per i primi due giorni è quella di ricalcare le prove svolte nella precedente campagna mantenendo quindi l'orientamento verticale, così questa prova consiste nella rampa in salita di potenza della PHP partendo però da 50W di potenza termica. La PHP sembra attivarsi a livelli di potenza più elevati rispetto al caso precedente con filling ratio pari al 50%, si è quindi cercato di velocizzare e semplificare l'innesco della transizione di fase. Le condizioni al contorno sotto cui si sono svolte le prove sono lievemente differenti rispetto alla campagna precedente, la temperatura ambiente sull'aereo è molto più bassa prima dei decolli, le prove a terra preliminari hanno infatti registrato temperature attorno ai 15°C. Durante il decollo, grazie al riscaldamento dell'aereo, si possono registrare comunque dei miglioramenti. La temperatura ambiente influenza molto la temperatura del condensatore, da alcune prove preliminari svolte a terra si è osservato come quest'ultima possa essere fondamentale per il funzionamento della PHP, sembra che per valori troppo bassi della temperatura al condensatore ci siano dei problemi di funzionamento provocati dal collasso delle bolle prima che esse possano ritornare tramite i canali vicini nella zona calda dell'evaporatore. In ogni caso quest'ipotesi sarà da verificare con dei lavori successivi.

### 6.1.1 PHP verticale a 50W

Imponendo subito questo livello di potenza l'attivazione della transizione di fase avviene repentinamente e senza grossi problemi, negli istanti di tempo tra le parabole la situazione è analoga al caso dell'altro livello di riempimento, le temperature all'evaporatore giacciono attorno ai 50°C in un intervallo piuttosto ristretto. Un'eccezione è presente prima dell'inizio delle parabole: trattasi di una bolla di vapore che rimane incastrata in una curva impedendo il corretto moto del fluido all'interno della PHP. L'effetto di mescolamento provocato dalle variazioni di accelerazione di gravità aiuta infatti a far sbloccare i canali e, subito dopo la prima parabola, si registra una situazione regolare senza eccezioni. Le temperature all'evaporatore nelle situazioni a 1g e a regime sono praticamente le stesse che si hanno con livello di riempimento del 50%. È interessante iniziare ad osservare le vere e proprie fasi delle parabole: il comportamento termico non sembra essere molto influenzato dalle fasi a 1.8g, l'abbassamento delle temperature verso un valore medio più basso è molto più modesto e sembrerebbe quasi assente. Interessante poi osservare la fase a 0g: all'innescarsi della microgravità parte un transitorio all'evaporatore che porta a un generale innalzamento delle temperature. Il picco raggiunto alla fine del periodo di 22s in microgravità è decisamente più basso rispetto all'altro caso, da un picco di 58°C si è passati a uno di 56°C. Si può notare come il transitorio si esaurisca più in fretta, questa cosa andrebbe comunque verificata con delle prove a terra cambiando l'orientazione e valutando il tempo per raggiungere lo stato stazionario. Si ha quindi una minor influenza della gravità sul comportamento termico della PHP. La pressione presenta un comportamento oscillatorio ma nel complesso piuttosto regolare con qualche nervosismo in più nelle fasi di microgravità.

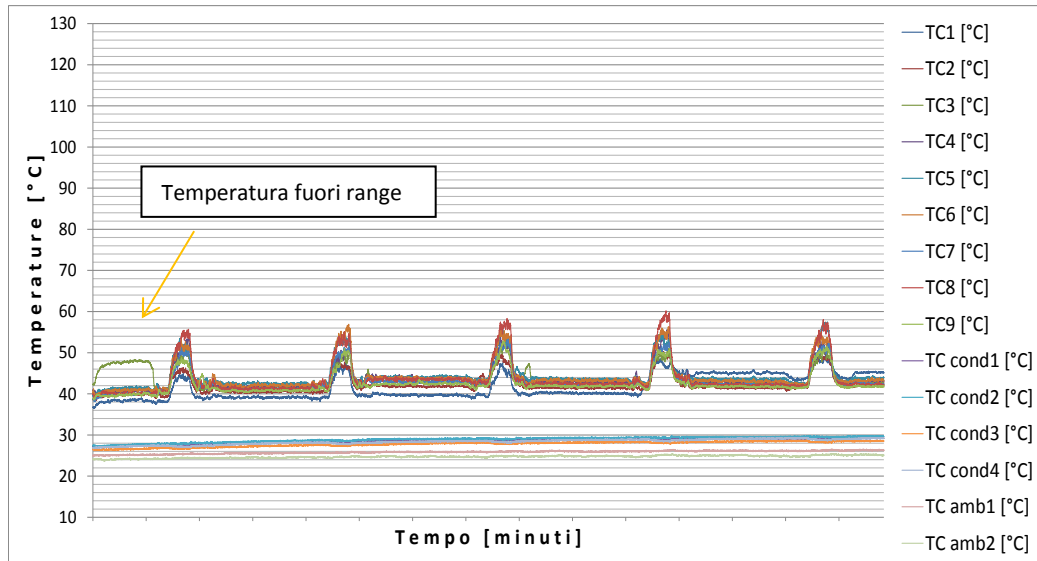


Figura 6-1 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 50W

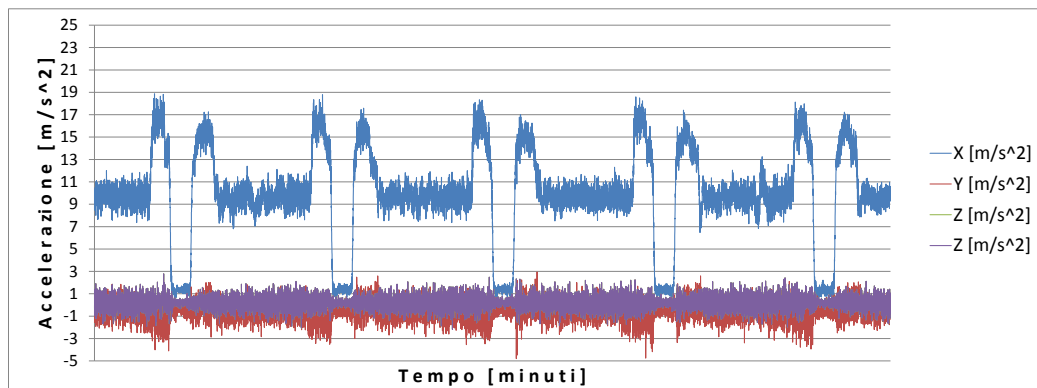


Figura 6-2 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

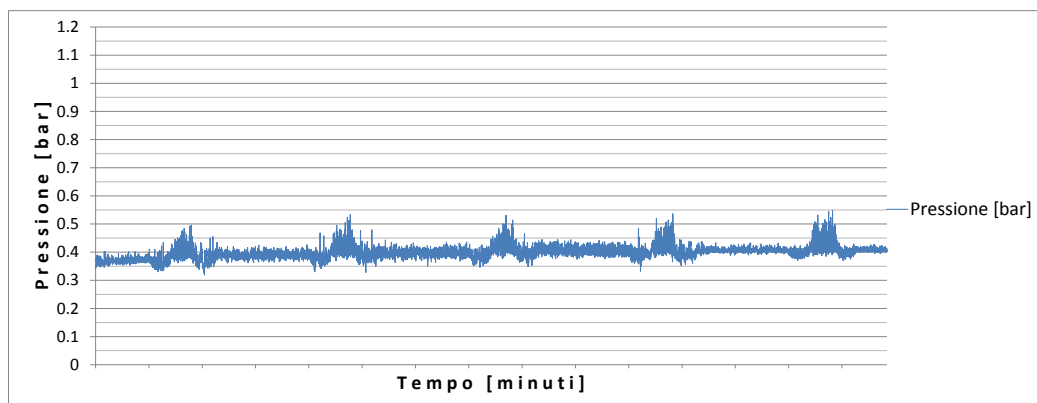


Figura 6-3 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 50W

N.B.: le altre serie di parabole possono essere consultate nell'appendice G

### **6.1.2 PHP verticale a 80W**

In tutti gli step di potenza precedenti il comportamento della PHP è regolare e in linea con quello descritto per la potenza a 50W. Le temperature all'evaporatore rimangono sempre regolari in un intervallo di valori ristretto (circa 5°C), tranne qualche caso in cui osserviamo una singola temperatura leggermente più alta della media. A 80W si iniziano a registrare i primi sintomi di malfunzionamento ed instabilità, in alcuni istanti le oscillazioni delle temperature divengono molto più ampie e la fascia che occupano può essere anche di 20°C. Questo fenomeno è stato osservato anche in alcune prove a terra preliminari e sembra dipendere, come già anticipato all'inizio del capitolo, dalla temperatura al condensatore: all'interno del serpentino di rame si sta sviluppando un altro regime di moto degno di nota che peggiora le prestazioni termiche. Quest'ipotesi dovrà essere verificata successivamente con ulteriori prove a terra. In particolare il comportamento appena descritto diventa molto evidente tra la terza e la quarta parabola, la fase a 1.8g è poi molto utile per smorzarlo e riportare il tutto a una situazione normale. All'aumentare della potenza termica fornita dai riscaldatori il comportamento della pressione nelle fasi di microgravità diventa molto più nervoso e i picchi aumentano significativamente di valore, lo stesso accade quando aumenta l'ampiezza delle oscillazioni delle temperature all'evaporatore.



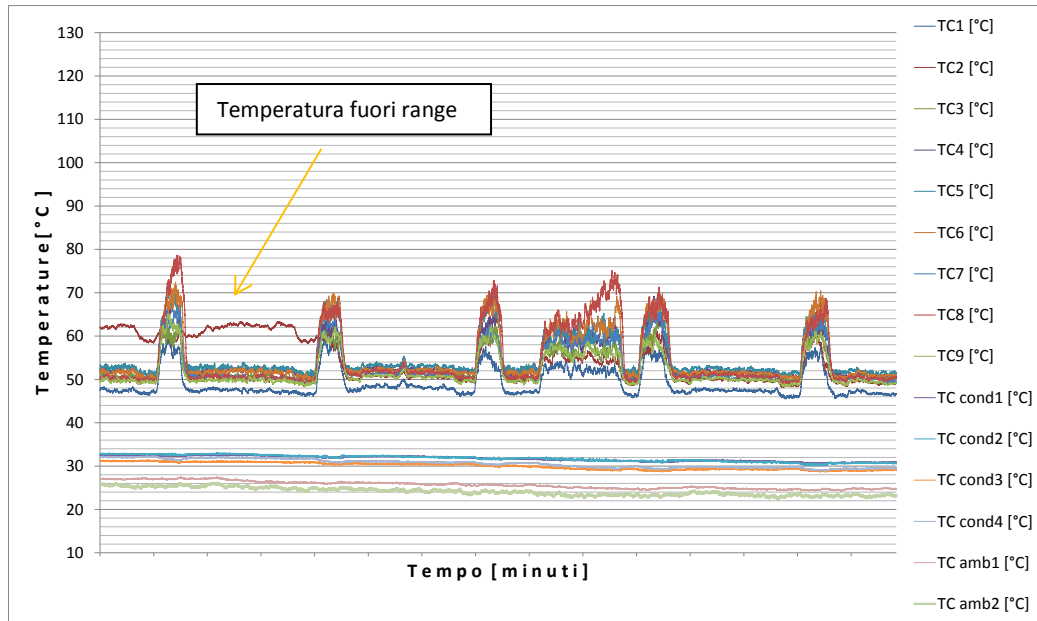


Figura 6-4 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 80W

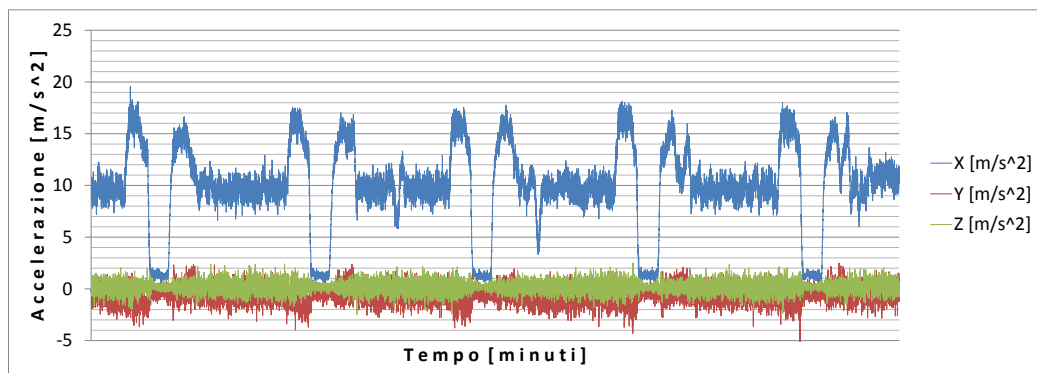


Figura 6-5 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

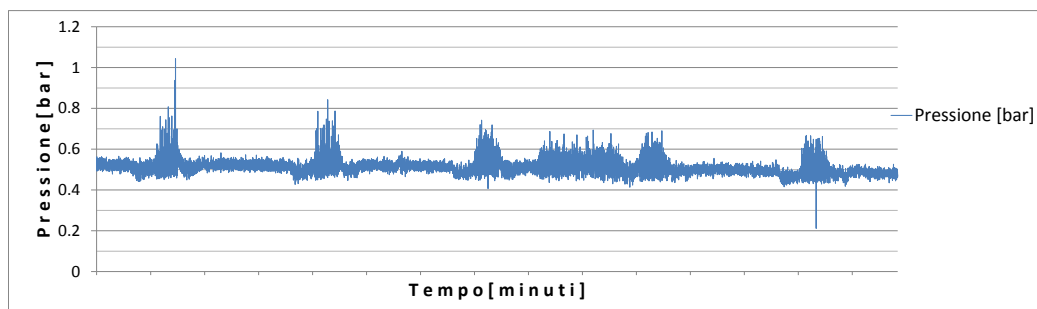


Figura 6-6 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 80W

### **6.1.3 PHP verticale a 100W**

Raggiunti i 100W di potenza termica le temperature all'evaporatore divengono estremamente irregolari e le oscillazioni molto ampie, risulta difficile riconoscere anche le parabole. La pressione è mediamente aumentata rispetto ai casi precedenti per via dell'aumento della temperatura media del sistema, il suo comportamento è molto nervoso e sono registrati numerosi picchi sia di alta che di bassa pressione che al dodicesimo minuto hanno anche provocato l'intervento del sistema di sicurezza spegnendo i riscaldatori. In questa situazione molto caotica possiamo apprezzare come le fasi a 1.8g siano sempre benefiche al sistema e tendano a riportare le temperature in una fascia ristretta ed omogenea, prima dell'innesco dei transitori provocati dalla microgravità. Ormai il funzionamento della PHP è completamente compromesso e le prestazioni termiche in queste condizioni sono così basse da renderne quasi impossibile l'utilizzo.

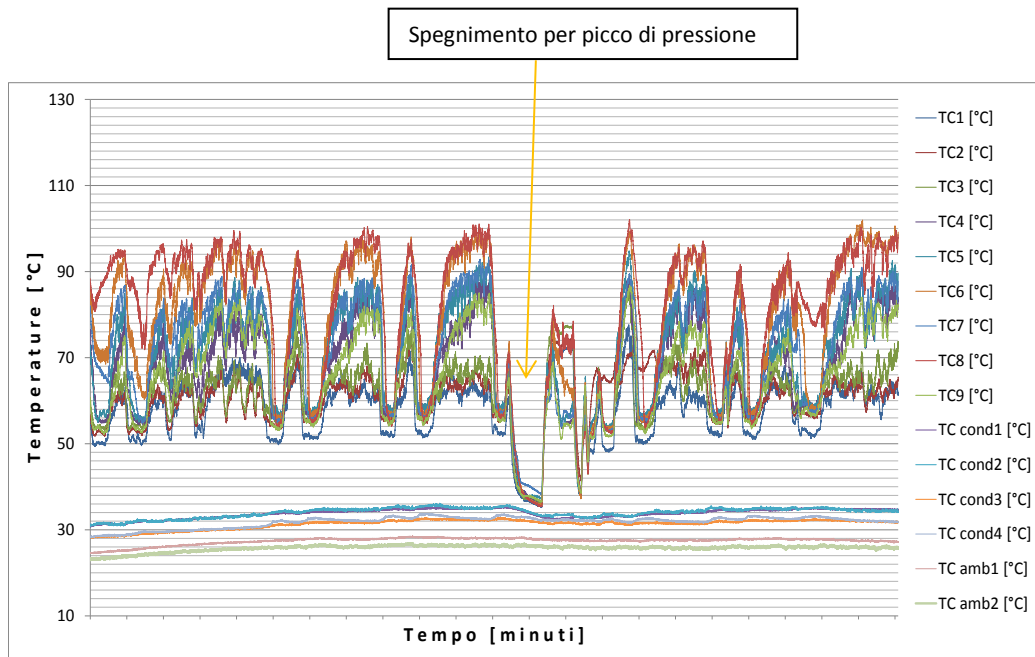


Figura 6-7 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 100W

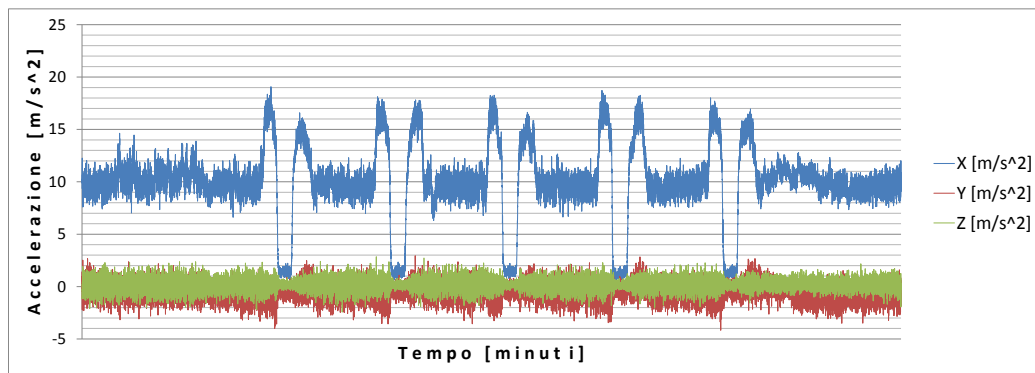


Figura 6-8 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

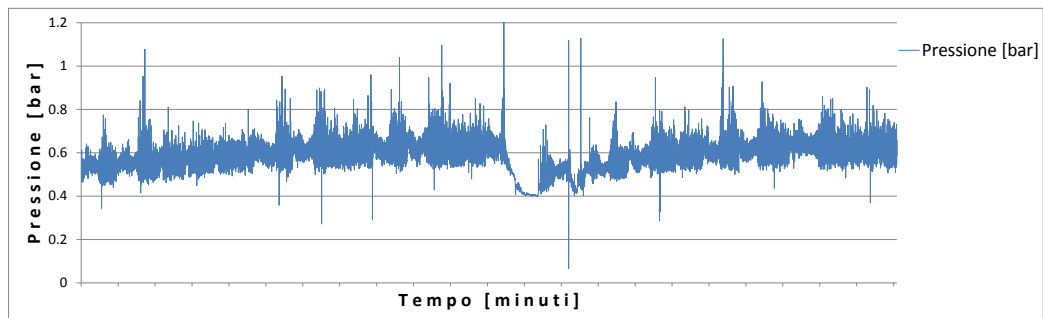


Figura 6-9 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 100W

## **6.2 Secondo giorno di volo parabolico, PHP verticale da 100W a 50W**

Come già detto all'inizio del capitolo, si è voluto ricalcare le prove della scorsa campagna. Il secondo giorno è stato quindi dedicato alla discesa di potenza termica partendo da 100W per arrivare a 50W.

### **6.2.1 PHP verticale a 100W**

Come per lo step a 100W in salita il funzionamento è molto irregolare e le prestazioni termiche sono decisamente pessime, la pressione è sempre molto nervosa e i picchi hanno provocato anche in questo caso lo spegnimento dei riscaldatori per via del sistema di sicurezza. Successivamente a 90W la situazione ritorna nella norma.

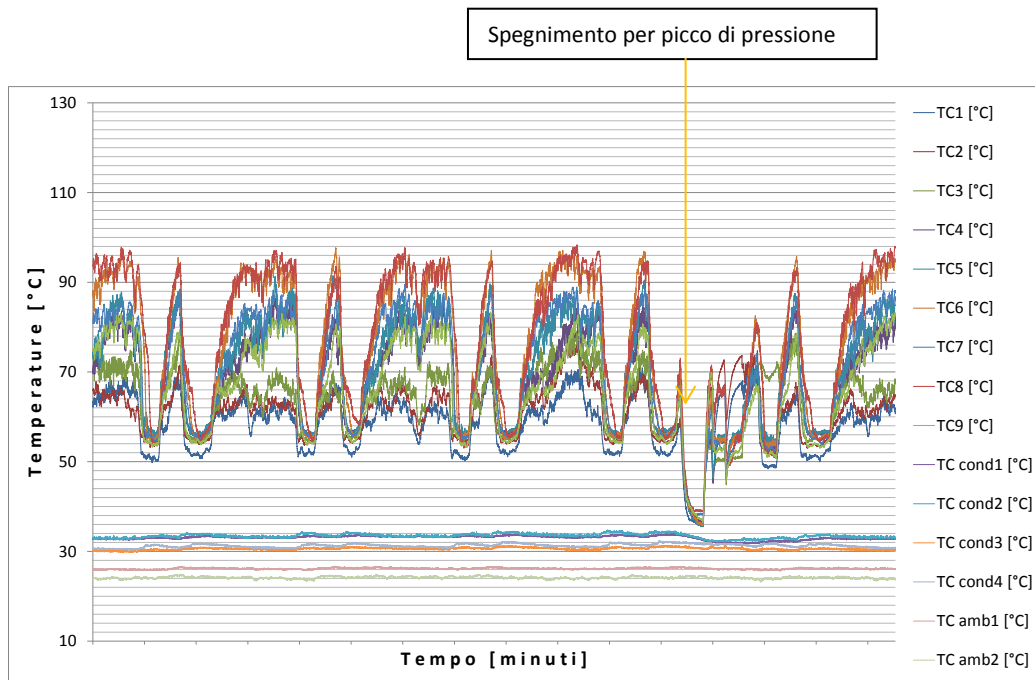


Figura 6-10 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 100W

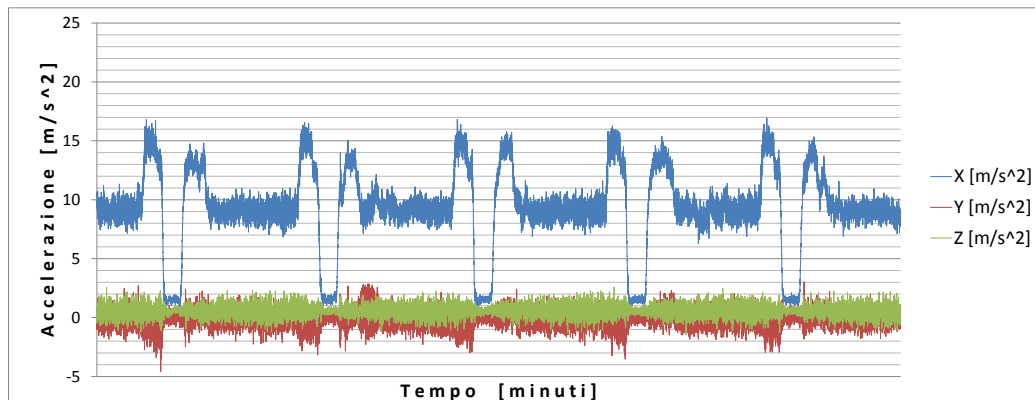


Figura 6-11 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

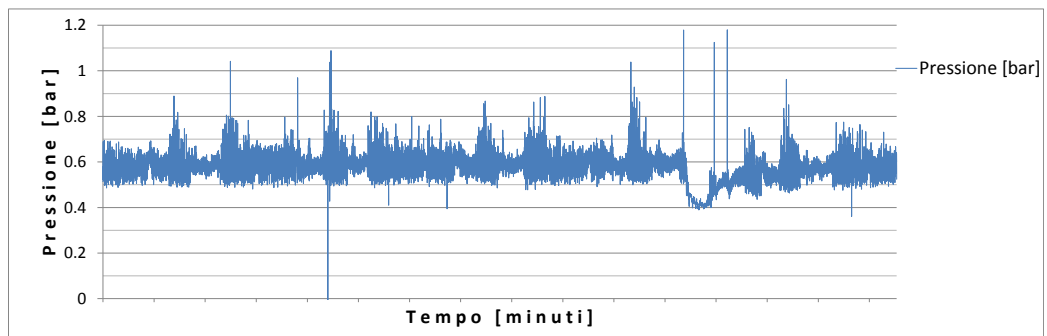


Figura 6-12 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 1000W

### **6.2.2 PHP verticale a 90W**

Come anticipato la PHP ritorna ad avere un comportamento regolare e le temperature all'evaporatore cessano le loro ampie oscillazioni occupando un range più basso, ristretto e regolare. Prima della serie di parabole le prestazioni termiche sono ancora pessime per via dell'isteresi ma possiamo osservare come grazie all'effetto benefico della fase a 1.8g riescano a ritornare alla normalità.

Spegnimento per picco di pressione

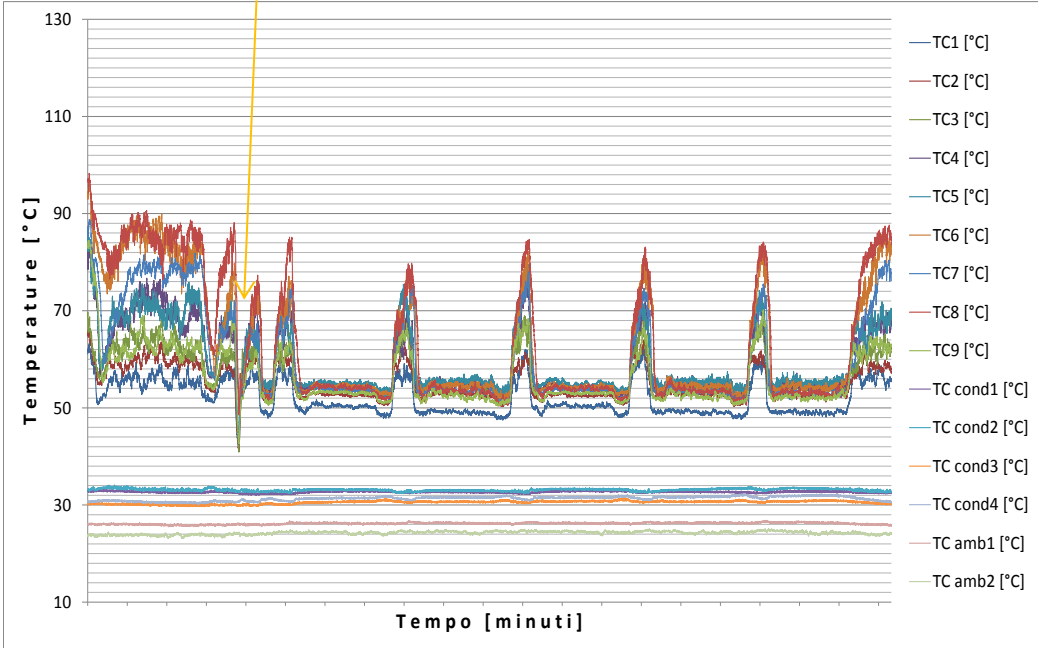


Figura 6-13 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 90W

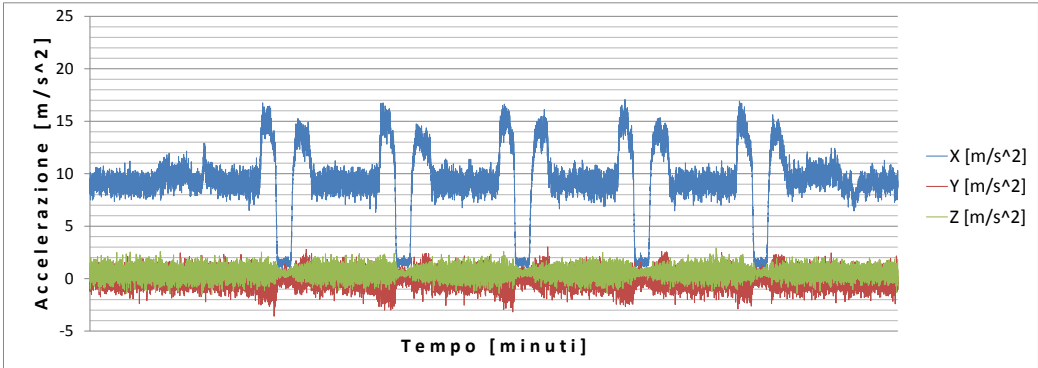


Figura 6-14 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

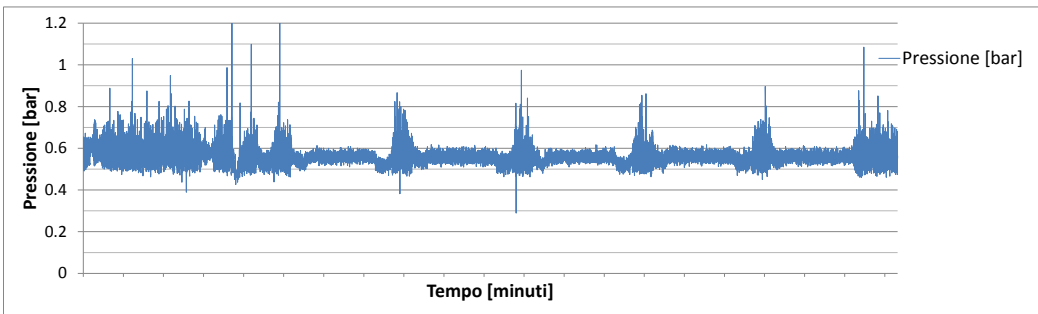


Figura 6-15 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 90W

N.B.: le altre serie di parabole possono essere consultate all'appendice H

### **6.3 Terzo giorno di volo parabolico, diversi percorsi per arrivare a 70W**

Durante l'ultimo volo si è deciso di cambiare il tipo di prova prevista e non testare la PHP in configurazione orizzontale. Dalla precedente campagna è constatabile con una certa ripetibilità (vedi capitolo 4) che in posizione orizzontale il comportamento termico della PHP non viene influenzato dalla forza di gravità. Inoltre risultano significativi i test effettuati in iper-gravità dall'università di Bergamo in Settembre (vedi modifiche set-up alla fine del capitolo 2): per valori di accelerazioni da 1g a 20g la PHP in posizione orizzontale non è influenzata in alcun modo. Da ciò è tranquillamente deducibile che una situazione con 0g, anche con un livello di riempimento diverso, non porterebbe cambiamenti significativi e le temperature nella zona di evaporazione semplicemente non varierebbero. Per questo a livello scientifico sembra molto più interessante osservare il comportamento della PHP a 70W, cioè in una situazione ottimale, raggiungendo la potenza attraverso differenti percorsi per scoprire se per caso compaiono delle variazioni nel funzionamento dovute alla storia delle potenze precedenti.

Il percorso termico seguito per ogni serie di parabole è il seguente:

- PHP a 70W
- PHP a 100W
- PHP a 40W
- PHP a 70W
- PHP a 100W, non significativo

La prova si è svolta come sopra descritto e quello che si è constatato è che la PHP a 70W si comporta sempre allo stesso modo nonostante i diversi percorsi che sono stati pensati per raggiungere le condizioni di ottimo funzionamento.

N.B.: i grafici delle prove possono essere consultati all'appendice I



## 6.4 Confronti resistenze termiche

Una confronto molto interessante è quello che si può fare tra le resistenze termiche ricavate durante le due campagne di volo parabolico. Esse sono calcolate come:

$$R_{eq} = \Delta \bar{T}_{e-c} / \dot{Q} [K / W]$$

Equazione 6-1 Calcolo resistenza termica equivalente

Con:

- $\Delta \bar{T}_{e-c}$  differenza di temperature media tra condensatore ed evaporatore [K]
- Q calore fornito all'evaporatore [W]

Si è pensato di effettuare il calcolo per le varie potenze con accelerazione pari a 1g e durante le fasi di microgravità. In questo modo è possibile osservare come, durante le fasi a 1g, le resistenze termiche del dispositivo assumano valori molto vicini tra loro nonostante la diversa percentuale di riempimento della PHP. Durante la microgravità non si riesce ad esaurire il transitorio, tuttavia è chiaro dai grafici in figura 6-16 e 6-17, come in la resistenza termica del dispositivo sembri essere più bassa in microgravità per filling ratio pari al 70%. A 1g, aumentando il livello di riempimento, si ha un lieve peggioramento dalle prestazioni termiche: il filling ratio pari al 50% è più vicino alle condizioni di ottimo. Tuttavia in condizioni di microgravità si assiste ad un peggioramento più marcato rispetto a quello che si ha con percentuale di riempimento pari al 70%: da qui si può dedurre che il livello di riempimento per ottimizzare le prestazioni termiche sia differente in condizioni di microgravità rispetto a quello ricavabile dai test a terra.

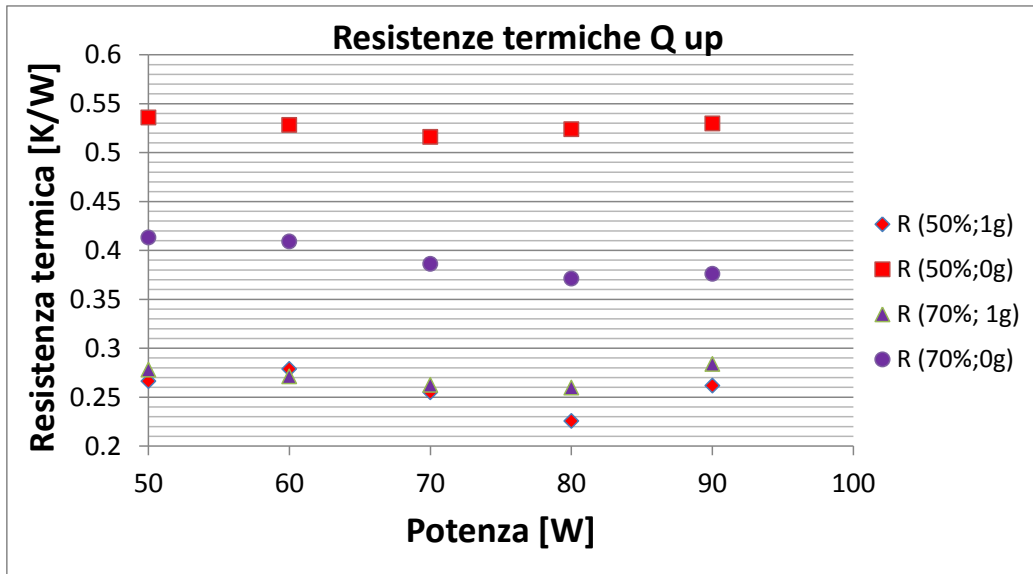


Figura 6-16 Resistenza termica PHP in volo a 1g e 0g con Q up

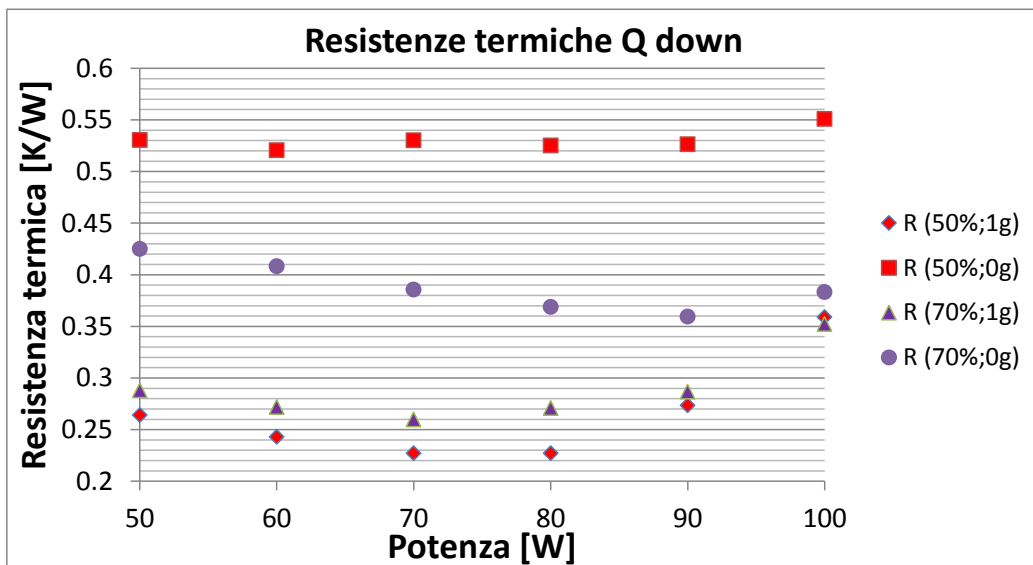


Figura 6-17 Resistenza termica PHP in volo a 1g e 0g con Q down

## 6.5 Sviluppi futuri

Possiamo considerare questo lavoro come un mattone all'interno dell'edificazione dei criteri per il dimensionamento delle pulsating heat pipe; è necessario infatti un continuo e pesante studio sperimentale variando i numerosi parametri per il dimensionamento. In un futuro prossimo sarebbe molto interessante studiare come reagisce durante un volo parabolico una PHP identica a quella testata ma con diversi fluidi, oppure con lo stesso fluido e diversi livelli di riempimento per ricavare le condizioni di ottimo e magari scoprire che queste possono differire in assenza di gravità rispetto al caso a terra. Un altro parametro che è risultato essere significativo e andrebbe studiato è l'influenza delle vibrazioni, si è infatti osservato sperimentalmente a terra che, in caso di canali otturati dal vapore, basta percuoterli manualmente per ottenere immediati miglioramenti per il pompaggio. L'altro parametro principe è il diametro, come è stato detto nel primo capitolo esso rappresenta un criterio fondamentale nel dimensionamento per permettere alla capillarità di agire e consentire la suddivisione del fluido mantenendo un'alternanza di fasi nel condotto. I criteri fino ad ora sviluppati considerano sempre al loro interno l'effetto della forza peso, sarebbe necessario trovarne di nuovi da poter applicare in microgravità e quindi testare delle PHP con diametri più grandi rispetto a quelli suggeriti dai criteri a terra. Sarebbe poi interessante studiare gli effetti dell'assenza di peso per periodi più lunghi, ad esempio lanciandola sul TexUS, un razzo che permette, grazie ad una prolungata caduta libera, un periodo di microgravità di ben 388s. Essendo l'isteresi un fenomeno dominante nelle PHP, è utile testare anche vari percorsi per raggiungere le potenze termiche desiderate: possiamo così ottenere importanti informazioni su possibili inaspettati comportamenti o simili. Durante i test a terra preliminari della 59<sup>a</sup> campagna di volo parabolico è stata ipotizzata una possibile influenza della temperatura del condensatore sul regime di moto riscontrabile nel serpentino di rame, in futuro si potrebbero fare dei test controllando questa variabile e studiarne l'influenza sul comportamento termico del dispositivo. Un'altra interessante questione, decisamente più tecnica, è l'analisi approfondita delle regole di Novespace per montare gli esperimenti sull'aereo, si potrebbe analizzarle una ad una per poterla migliorare e/o giustificare tramite prove sperimentali in laboratorio ed analisi agli elementi finiti per le strutture. L'ambizione sarebbe anche quella di permettere la realizzazione futura di apparati sperimentali ben curati: i suggerimenti tecnici, il metodo di lavoro e i numerosi accorgimenti riportati nel capitolo 2, dovrebbero aiutare a progettare e realizzare sistemi di qualità.



## 7 Conclusioni generali

Riassumendo tutte le principali conclusioni ricavate da questo lavoro di tesi possiamo ritenerci ampiamente soddisfatti dei risultati ottenuti e dei mezzi impiegati. La progettazione del rack ha rispecchiato tutti gli aspetti di qualità che ci si era proposti di seguire: grazie all'efficace design tutte le operazioni necessarie sono state massimamente agevolate, portando anche ad avere tempo di riserva per gestire eventuali emergenze durante le due campagne di volo parabolico. La versatilità con cui è stato pensato ha reso facile il suo utilizzo anche alla centrifuga dell'ESA per i test in ipergravità, il tutto con semplici e veloci modifiche. Tanti piccoli accorgimenti tecnici e un'approfondita analisi delle schede tecniche hanno giovato ampiamente all'attività scientifica svolta e all'aggiornamento delle regole di Novespace. A livello scientifico è stata dimostrata l'influenza del campo gravitazionale sul comportamento termico della PHP, il tutto contando anche su un'adeguata ripetibilità delle prove svolte. Oltre a questo, dalle prove a terra e in volo, sono stati ricavati gli effetti provocati da fenomeni d'isteresi sul sistema. Riassumendo: la configurazione verticale risente delle fasi di microgravità attraverso l'innesco di un transitorio che ne peggiora le prestazioni termiche. Le fasi di ipergravità, con quest'ultima orientazione, giovano al moto del fluido e alle prestazioni termiche: contribuiscono infatti a smuovere le bolle di vapore che rimangono bloccate nelle curve dell'evaporatore contrastando il fenomeno del dry-out.

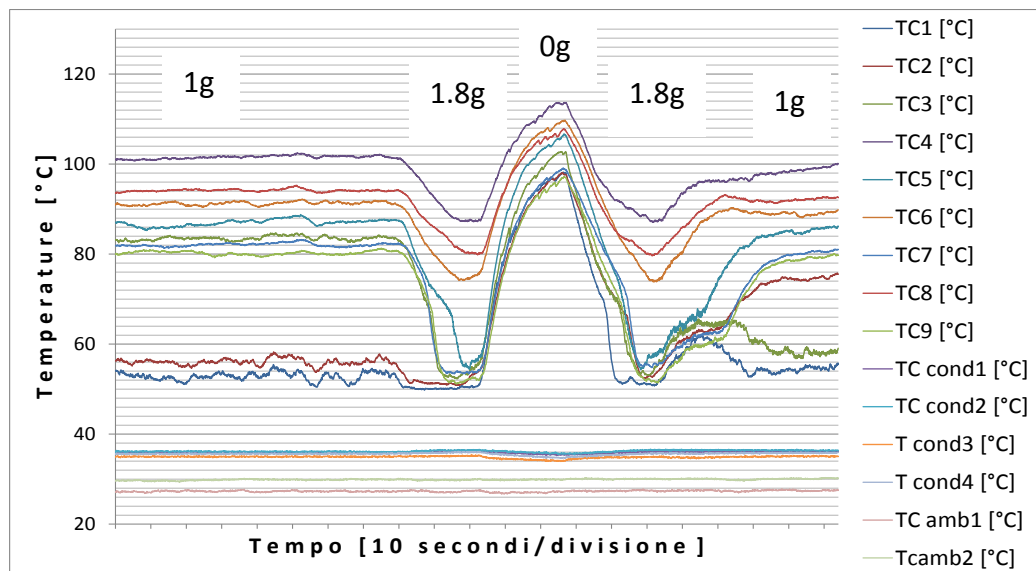


Figura 7-1 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 100W durante una parabola

La PHP in orizzontale non è invece influenzata dalle variazioni del campo gravitazionale: le temperature non mostrano cambiamenti e la resistenza termica equivalente è praticamente identica a quella ricavata dai test a terra.

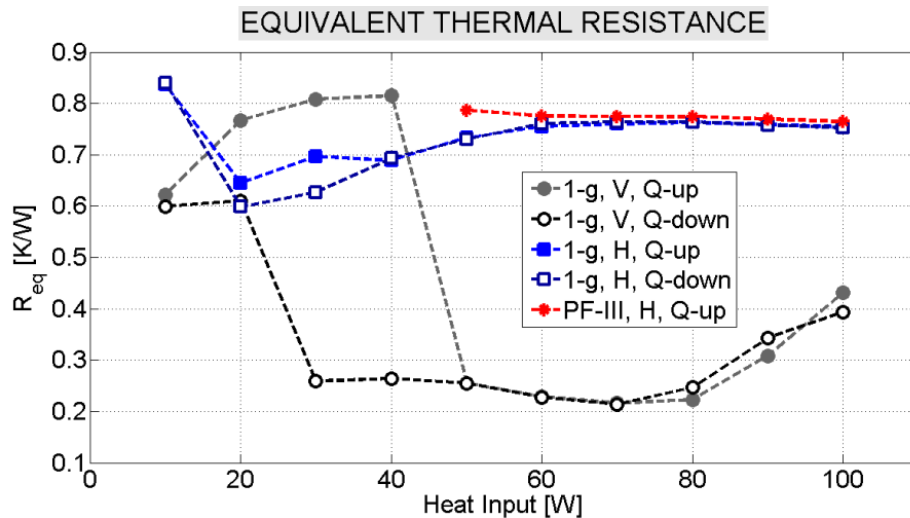


Figura 7-2 Resistenza termica della PHP misurata nelle prove e in microgravità con PHP in orizzontale

Simulando i transitori a terra, semplicemente cambiando orientazione della PHP, sono stati ottenuti dei transitori assolutamente compatibili con quelli ottenuti in volo nelle configurazioni verticali. Cambiando orientazione alla PHP e lasciandole raggiungere regime sono state ottenute importanti informazioni riguardo la durata dei transitori: da questi test risulta che siano sufficienti 120s per raggiungere lo pseudo regime stazionario. Grazie alle analisi spettrali della pressione sembra che le vibrazioni provocate sia dal moto del fluido che da condizioni esterne, abbiano influenza sul comportamento della pressione. Quest'ultima conclusione è comunque da verificare ampiamente visti anche i probabili effetti benefici delle vibrazioni sul moto del fluido per contrastare il dry-out all'evaporatore. Durante la seconda campagna di volo parabolico qui trattata sono state realizzate delle prove per avere la ripetibilità dei risultati precedentemente ottenuti, ma con una PHP avente filling ratio differente (si è passati dal 50% a 70%). I comportamenti ottenuti in quest'ultimo caso sono analoghi a quelli della precedente campagna; tuttavia sono state osservate delle particolari condizioni di malfunzionamento ed instabilità, per alti livelli di potenza, che sembrano essere influenzate dalla temperatura del condensatore. Anche quest'ultimo punto merita di essere ampliato con altri test a terra. Le resistenze termiche misurate a 1g con filling ratio pari al 50% sono lievemente più basse di quelle al 70% sempre a 1g: la PHP al 50% si trova quindi, a terra, più vicina alle condizioni di ottimo funzionamento. In condizioni di microgravità, invece, il peggioramento delle prestazioni termiche con

percentuale di riempimento pari al 70% è più moderato rispetto al caso a 50%. Da qui si può dedurre come le condizioni di ottimo siano differenti a terra rispetto a situazioni in cui la forza di gravità sia trascurabile. I dati ricavabili da queste prove dovranno comunque essere confrontati con altri test a terra con orientazione orizzontale per avere delle maggiori verifiche.

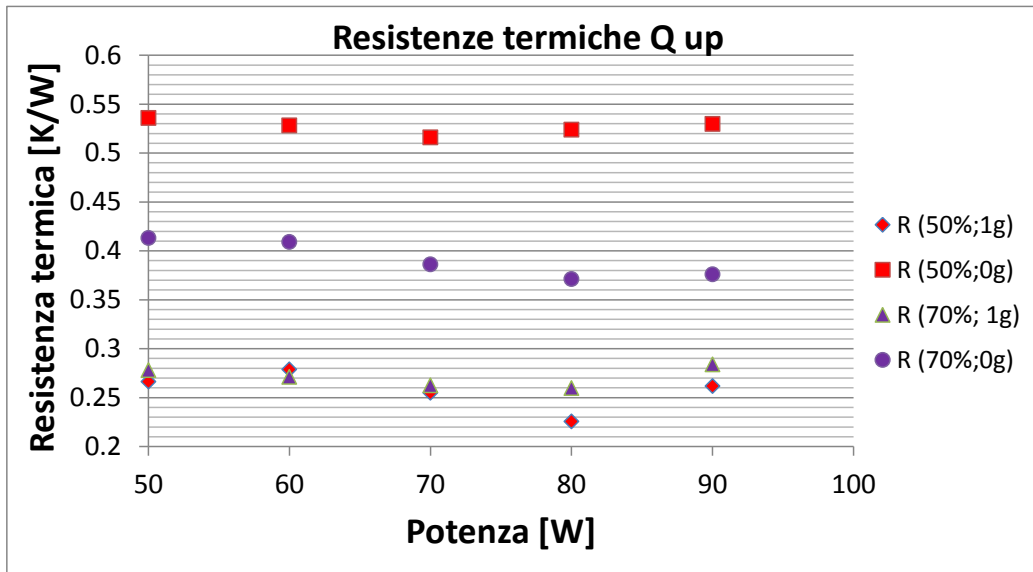


Figura 7-3 Resistenza termica della PHP rilevata durante le due campagne di volo parabolico a 1g e a 0g con orientazione verticale

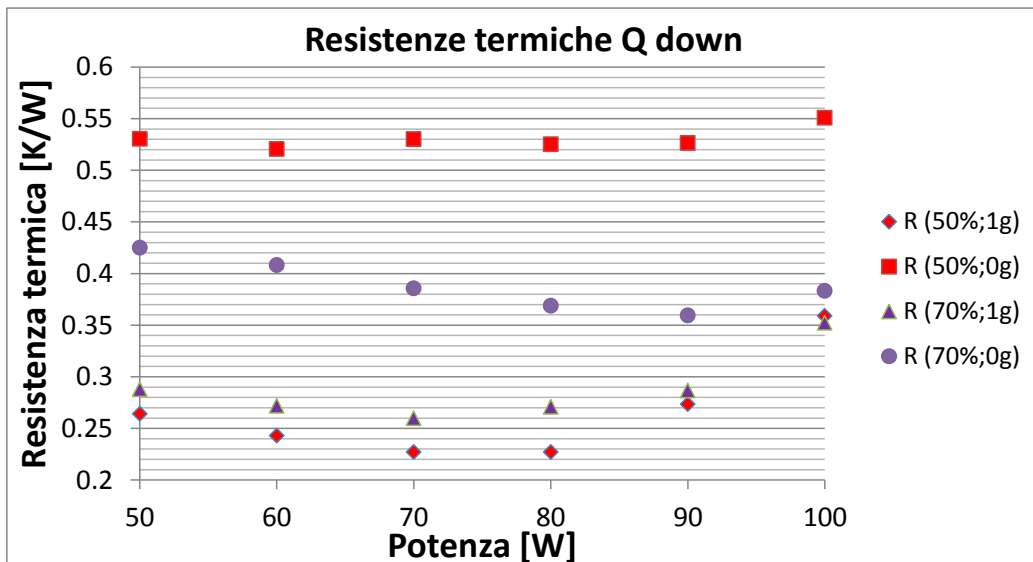


Figura 7-4 Resistenza termica della PHP rilevata durante le due campagne di volo parabolico a 1g e a 0g con orientazione verticale





## Bibliografia

- [1] Khandekar-Groll, PHP attractive entrants in the family of closed passive 2phase systems, *Journal of Energy, Heat, and Mass Transfer*, vol. 26, Marzo-Dicembre 2004
- [2] Karimi-Culham, Review and Assesment of PHP Mechanism for High Heat Flux Electronic Cooling, *Inter Society conference on thermal Phenomena (2004)*
- [3] Asfia, Cooling apparatus system and associated method, US7345877 (2008)
- [4] Chien, A novel design of pulsating heat pipe with fewer turns applicable to all orientations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55 (2012) 5722-57-28
- [5] Delil, *Microgravity Two-Phase Flow and Heat Transfer*, NLR-TP-99429
- [6] Mameli, PhD thesis, Università degli studi di Bergamo, 2012
- [7] Akachi, H., Structure of a heat pipe, US Patent 4,921,041. ( 1990).
- [8] Akachi, H., Polasek, F and stulk, P., 1996, Pulsating Heat Pipes, *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Heat Pipe Symp.*, Melbourne, Australia, pp. 208-217, 1996.
- [9] Mameli M., Manno V., Filippeschi S., M., Marengo, 2013, Effect of Gravity on the Thermal Instability Of a Closed Loop Pulsating Heat Pipe, *8<sup>th</sup> World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics* June 16-20, 2013, Lisbon, Portugal.
- [10] Gu, J., Kawaji, M., Futamata, R., Effects of gravity on the performance of pulsating heat pipes. *J. Thermophys, Heat Transf.* 18(3), 370–378 (2004).
- [11] Gu, J., Kawaji, M., Futamata, R., Microgravity performance of micro pulsating heat pipe, *Microgravity Sci. Technol.* 16, 181–185 (2005).
- [12] Mameli, M., Marengo, M. ,Zinna, S., 2012, Numerical investigation of the effects of orientation and gravity in a Closed Loop Pulsating Heat Pipe. *Microgravity Science and Technology Int. J.*, DOI: 10.1007/s12217-011-9293-2
- [13] Novespace, Rules and guidelines, revision 2009-2, aprile 2009
- [14] Harichian T, Garimella S. A Comprehensive Flow Regime Map For Microchannel Flow Boiling with Quantitative Transition Criteria. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2010 Vol. 53, pp. 694-702.
- [15] Khandekar S., Dollinger N., Groll M., 2003, Understanding Operational Regimes Of Closed Loop Pulsating Heat Pipes: An Experimental Study, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, No. 6, pp 707-719.
- [16] Charoensawan-Terdtoon, Thermal Performance of Horizontal CLPHP, *Applied Thermal Engeneering* 28 (2008) 460-466

- [17] Novespace, Parabolic flight medical document, Febbraio 2013
- [18] PEEK scheda tecnica, Ensinger Issue 580/05 from 02.09.00
- [19] Scheda tecnica Thermocoax, <http://www.thermocoax.com/>
- [20] Scheda tecnica GW Instek 3610A, <http://www.gwinstek.com>
- [21] Scheda tecnica ventilatori ebmpapst 8412N/2GH-214, <http://www.rs-online.com>
- [22] Scheda tecnica alimentatore ventilatori GBC 34.0110.60, [www.gbconline.it](http://www.gbconline.it)
- [23] Scheda tecnica sensore di pressione ETL/T 312, [www.kulite.com](http://www.kulite.com)
- [24] Scheda tecnica sensore di gravità DE-ACCM3D, <http://www.dimensionengineering.com>
- [25] Scheda tecnica data logger NI-cRIO-9073, NI-9214, [www.ni.com](http://www.ni.com)
- [26] Scheda tecnica alimentatore per data logger GBC 34.0110.65, [www.gbconline.it](http://www.gbconline.it)
- [27] Scheda tecnica Multipresa commerciale GBC 22.0576.05, [www.gbconline.it](http://www.gbconline.it)
- [28] Scheda proprietà e sicurezza per refrigerante FC-72, [www.3m.com](http://www.3m.com)
- [29] Item [www.item24.it](http://www.item24.it)
- [30] Scheda tecnica termoprotettori [www.dmpsrl.com](http://www.dmpsrl.com)
- [31] Mevaco, <http://mevaco-catalogo-italiano.mevaco.com/>
- [32] Graepel, <http://www.graepel.com>
- [33] Rmig, <http://www.rmig.com/it>
- [34] Gatti Precovi, <http://www.gattiprecorvi.it>
- [35] L.P.S., <http://www.lpslamiereforate.it>
- [36] Actis Furio, <http://www.actisfurio.com/>
- [37] RS, [www.rsonline.it](http://www.rsonline.it)
- [38] GBC, [www.gbconline.it](http://www.gbconline.it)
- [39] Ambrogio Colombo S.r.l., <http://www.ambrogicolombo.it/>

## Appendice A (PHP verticale Q up, 50%)

Grafici volo parabolico PHP verticale da 40W a 90W

Serie di parabole con PHP verticale a 50W

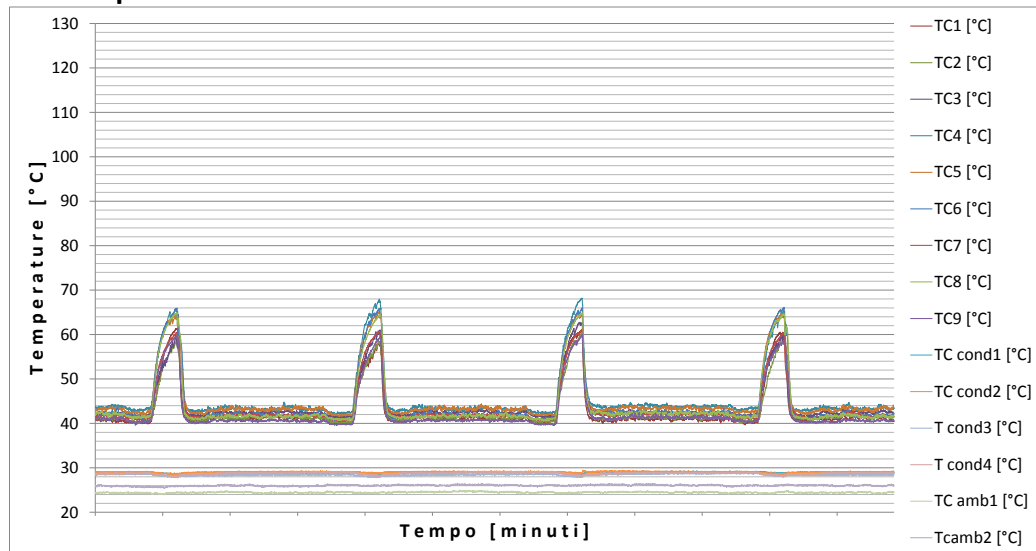


Figura 1 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 50W

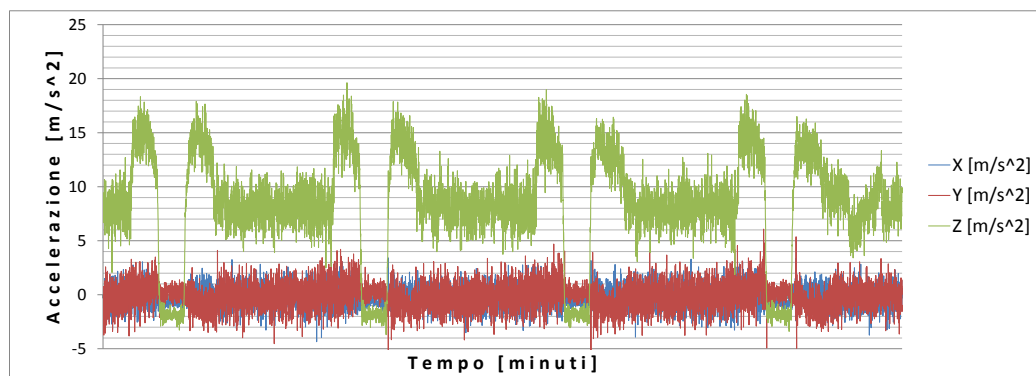


Figura 2 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

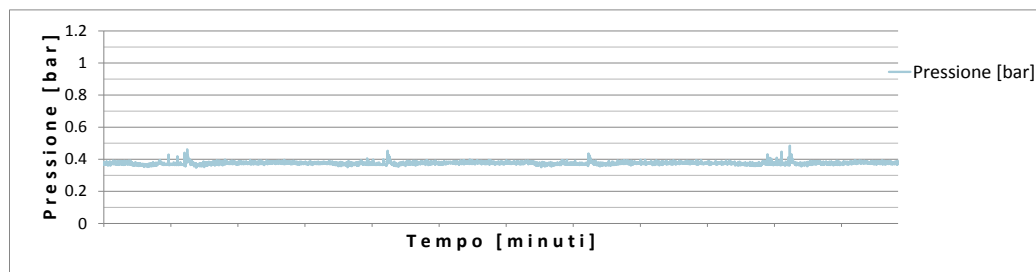


Figura 3 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 50W

### **Serie di parabole con PHP verticale a 60W**

Come nel caso precedente Si possono osservare un aumento della temperatura media dell'evaporatore nella fase a 1g e dei picchi raggiunti nella fase a 0g. Questa volta nella fase a 1g non è molto facile individuare una temperatura media dato che prima della seconda parabola sembra che debba essere ancora raggiunto uno stato stazionario; successivamente tutte le termocoppie danno valori compresi tra 41°C e 47°C. I picchi raggiunti sono invece tra i 74°C e i 76°C. La pressione continua a comportarsi come nel caso precedente.

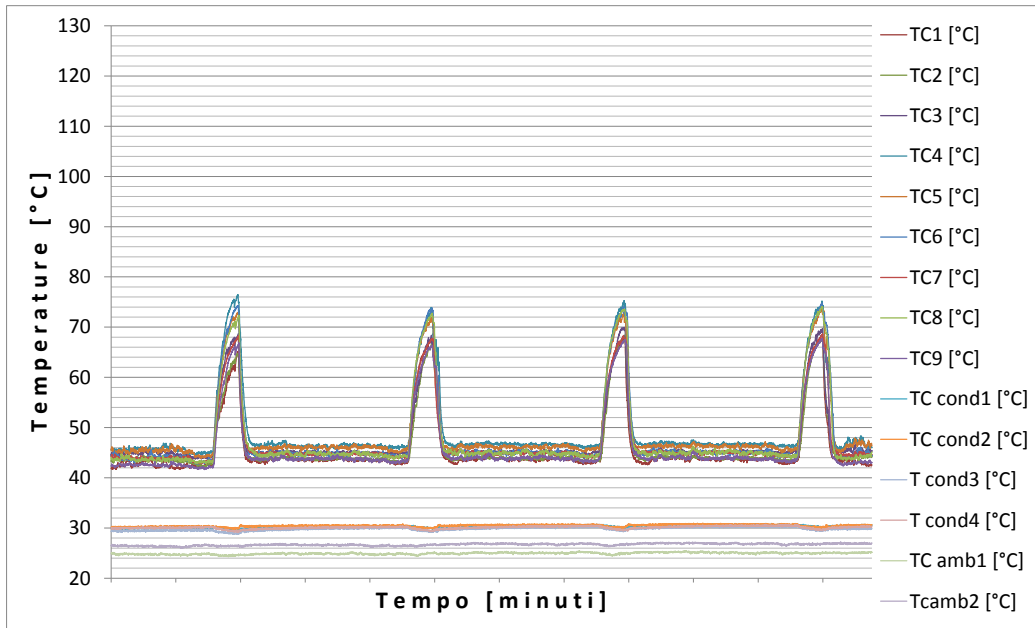


Figura 4 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 60W

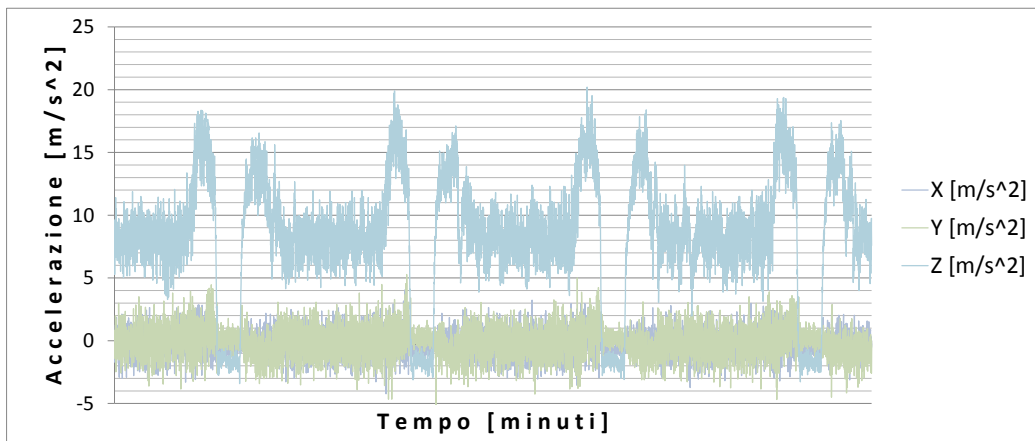


Figura 5 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

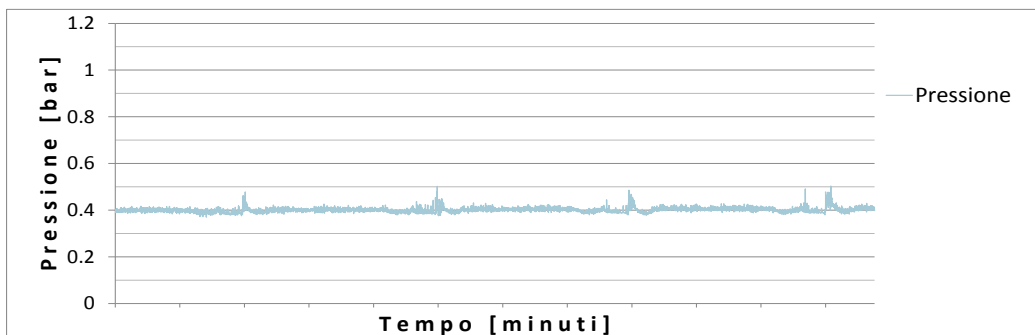


Figura 6 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 60W

### **Serie di parabole con PHP verticale a 70W**

Ancora possiamo osservare un innalzamento del range di temperatura per la fase a 1g che questa volta si trova nella fascia dei 45°C e 50°C. Anche i picchi della fase a 0g toccano valori prossimi agli 85°C. Possiamo osservare, subito dopo la seconda e la terza parabola, dei picchi di temperatura (molto evidenti dopo la terza parabola), essi sono dovuti a delle diminuzioni di gravità provocate da manovre dell'areo al di fuori della parabola, osservando i grafici ingranditi possiamo osservare la correlazione tra essi e dei picchi nella diminuzione di g nel rispettivo grafico.

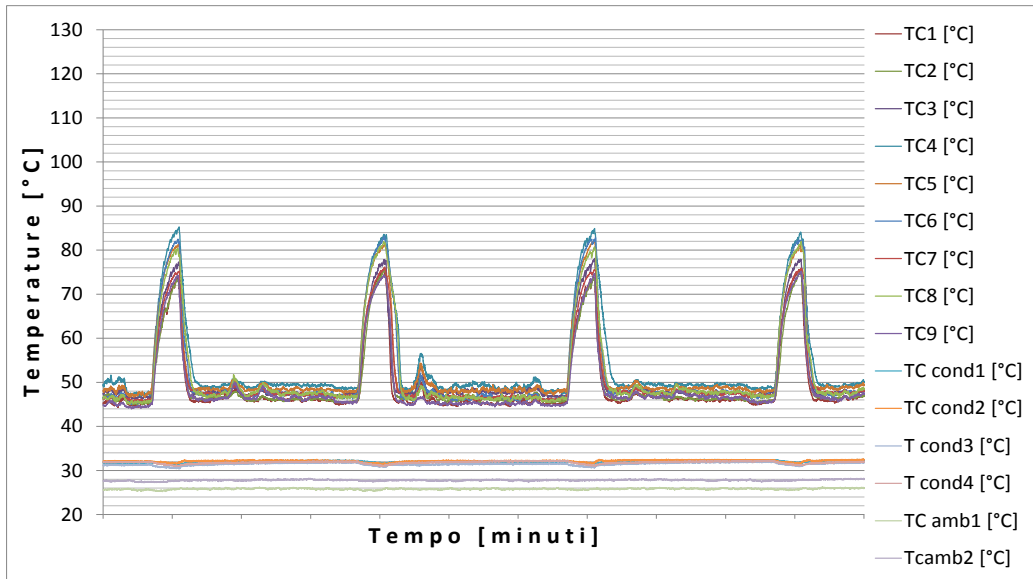


Figura 7 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 70W

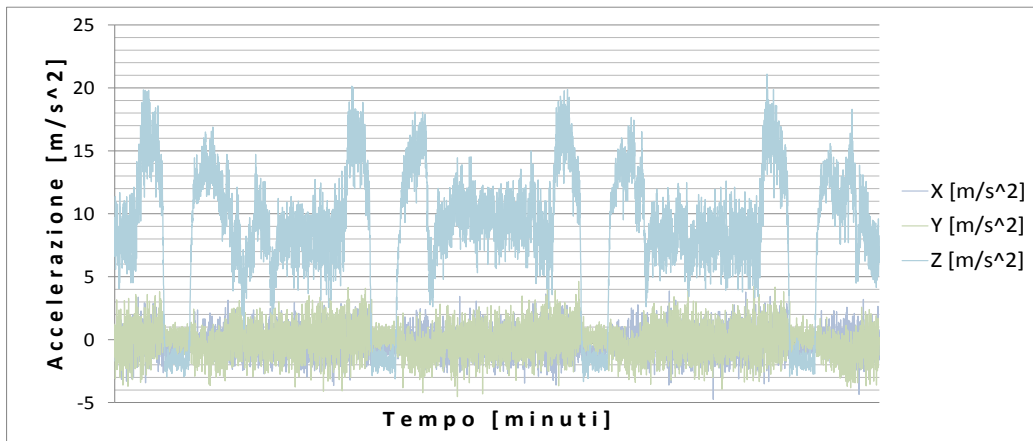


Figura 8 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

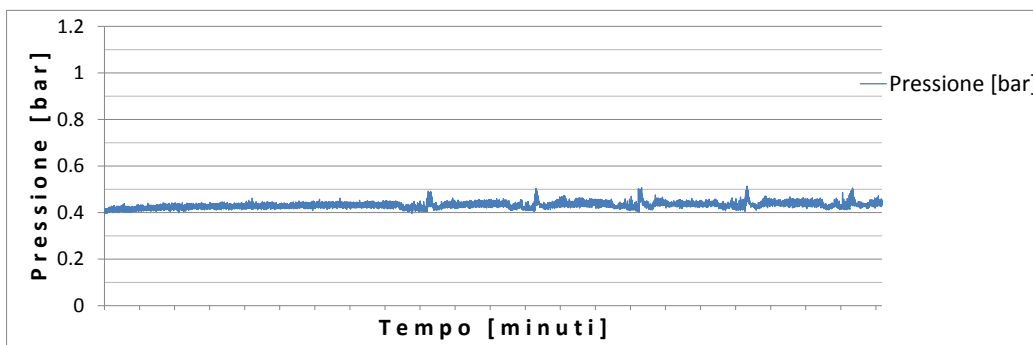


Figura 9 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 70W

## Particolare uscita dalla terza parabola

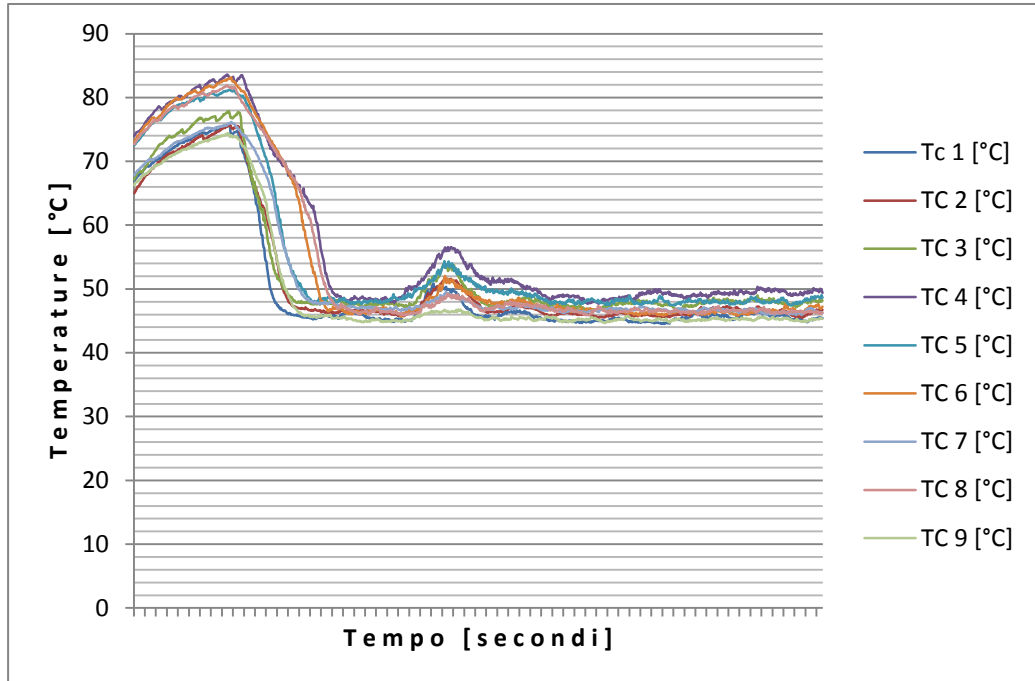


Figura 10 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo, particolare uscita terza parabola

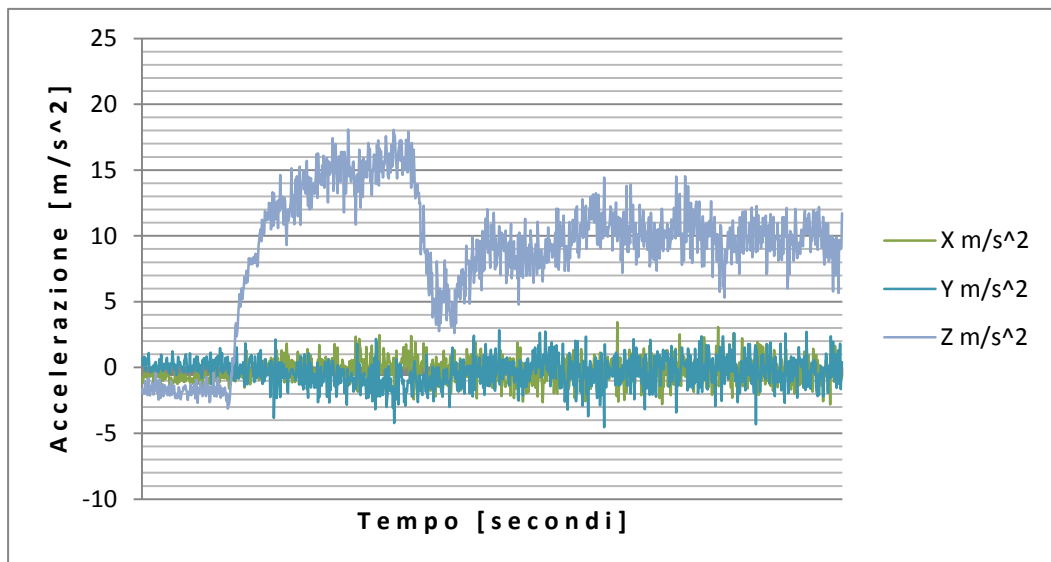


Figura 11 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo, particolare uscita terza parabola

In questo caso il fenomeno termico è chiaramente correlato alla variazione imprevista di accelerazione provocata dalla manovra dell'aereo.



### **Serie di parabole con PHP verticale a 80W**

Si osserva il solito aumento delle temperature all'evaporatore nella fase a 0g e relativo lieve schiacciamento nella fase a 1.8g. Le temperature nella fase a 1g si trovano tra i 45°C e i 55 °C nella fase a 1g mentre i picchi sfiorano punte di 95°C. E' interessante notare come dopo la seconda parabola le temperature occupino una fascia più ampia, in genere stanno tra i 45°C e i 55°C, questo è sintomo che il funzionamento della PHP comincia a non essere più ottimale e la circolazione al suo interno inizia a presentare le prime di difficoltà dovute al cambio di regime del moto di fluido per via dell'elevata potenza termica da smaltire.

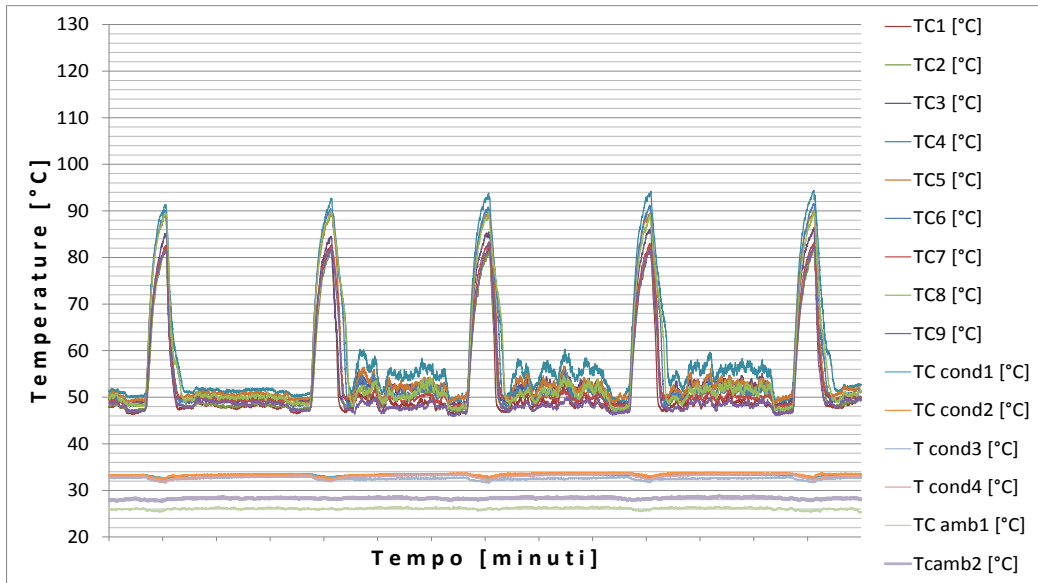


Figura 12 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 80W

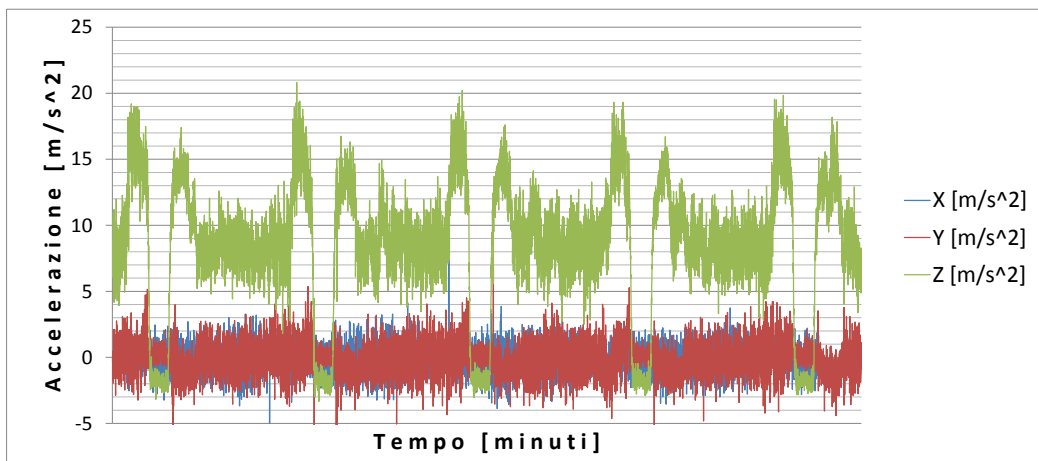


Figura 13 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

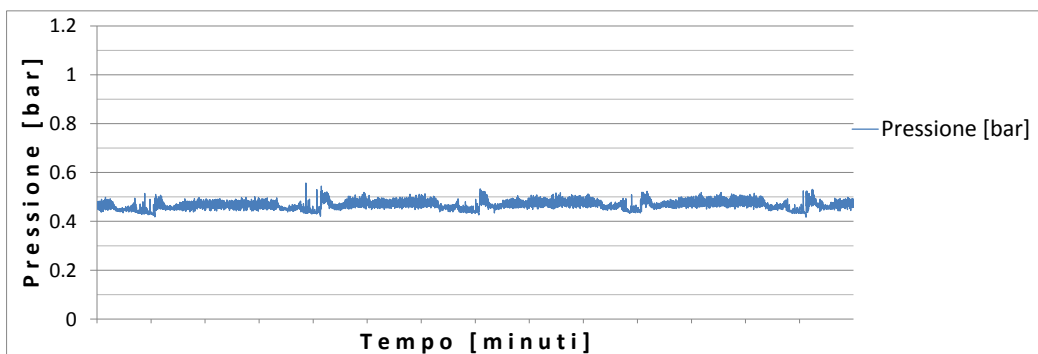


Figura 14 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 80W

## Appendice B (PHP verticale Q down, 50%)

### Grafici volo parabolico PHP verticale da 100W a 50W

#### Serie di parabole con PHP verticale a 70W

Le temperature all'evaporatore tendono ad abbassarsi , anche la fascia in cui si trovano tende ad essere più omogenea e, sebbene dopo la seconda parabola alcune temperature si allontanino, rimangono comunque abbastanza vicine a tutte le altre. Ci troviamo davanti a una condizione di funzionamento più efficiente rispetto al caso precedente.

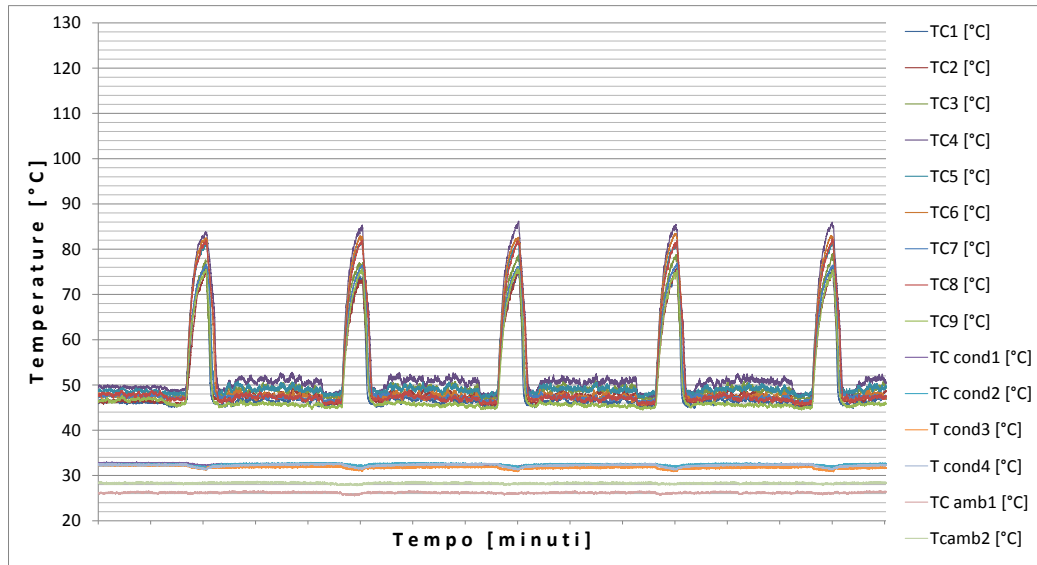


Figura 1 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 70W

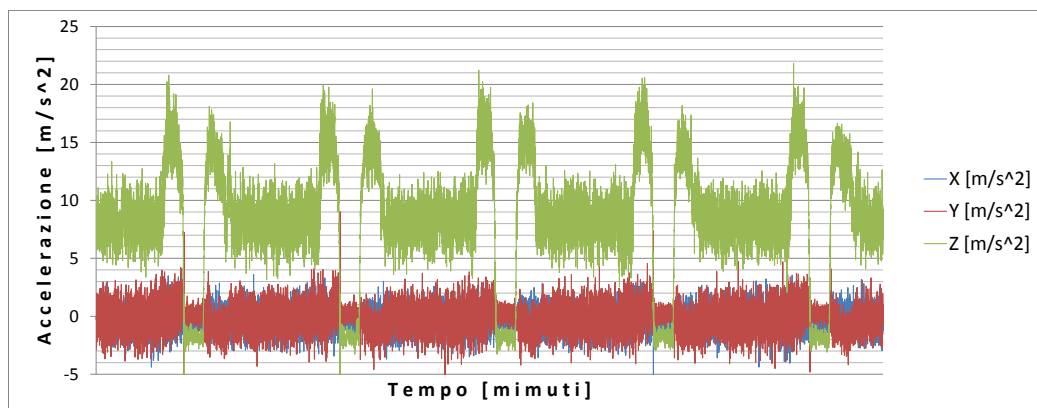


Figura 2 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

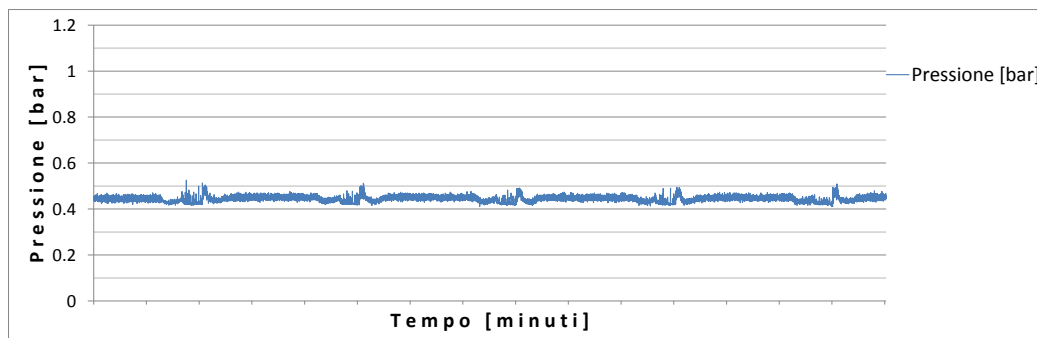


Figura 3 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 70W

### **Serie di parabole con PHP verticale a 60W**

Le temperature dell'evaporatore sono tutte rientrare in un range piuttosto ristretto di valori e si sono giustamente abbassate rispetto al livello di potenza precedente. Ora il funzionamento è molto regolare e anche i picchi si sono abbassati tra i 75°C e gli 80°C. Il lieve picco delle temperature dopo la seconda parabola è dovuto a una accidentale diminuzione dell'accelerazione di gravità causato da una manovra dell'aereo non prevista.

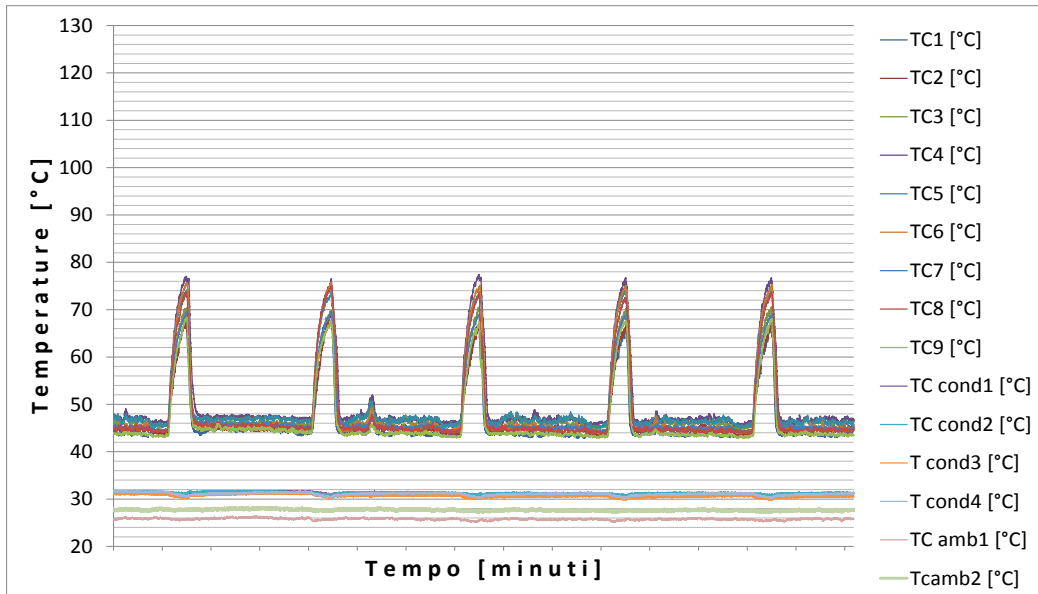


Figura 4 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 60W

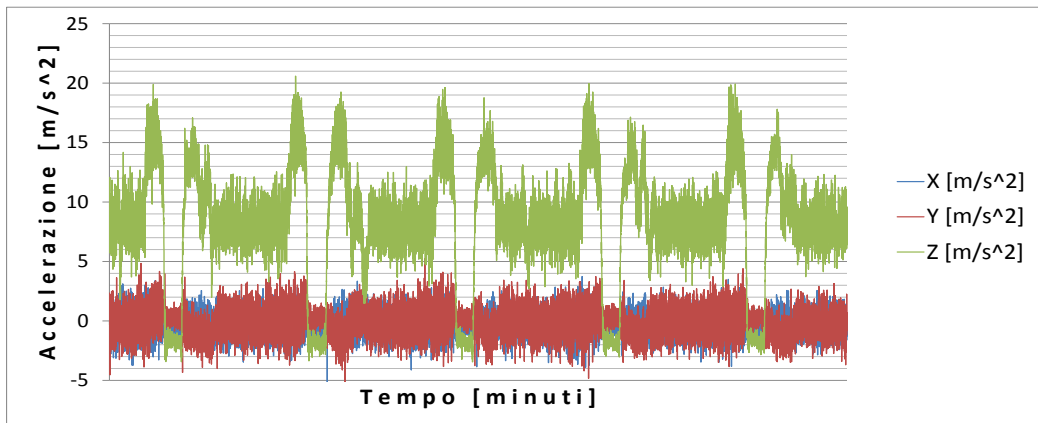


Figura 5 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

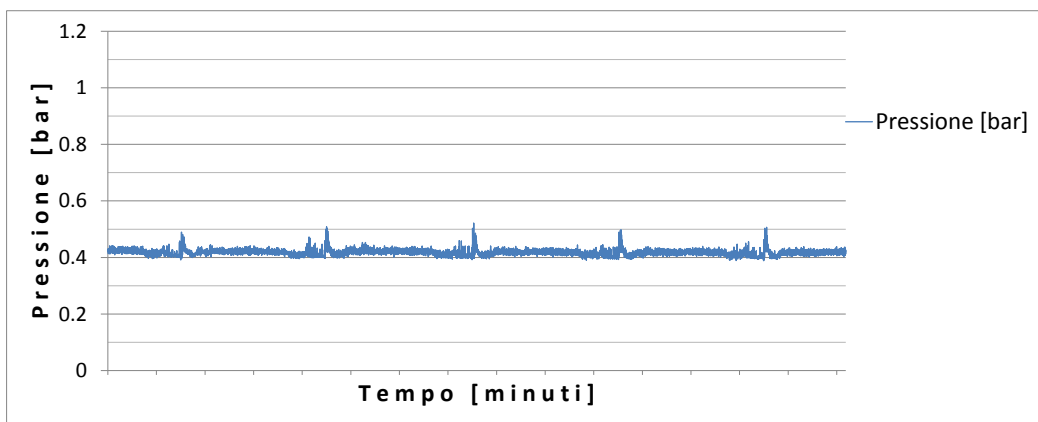


Figura 6 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 60W

**Serie di parabole con PHP verticale a 50W**

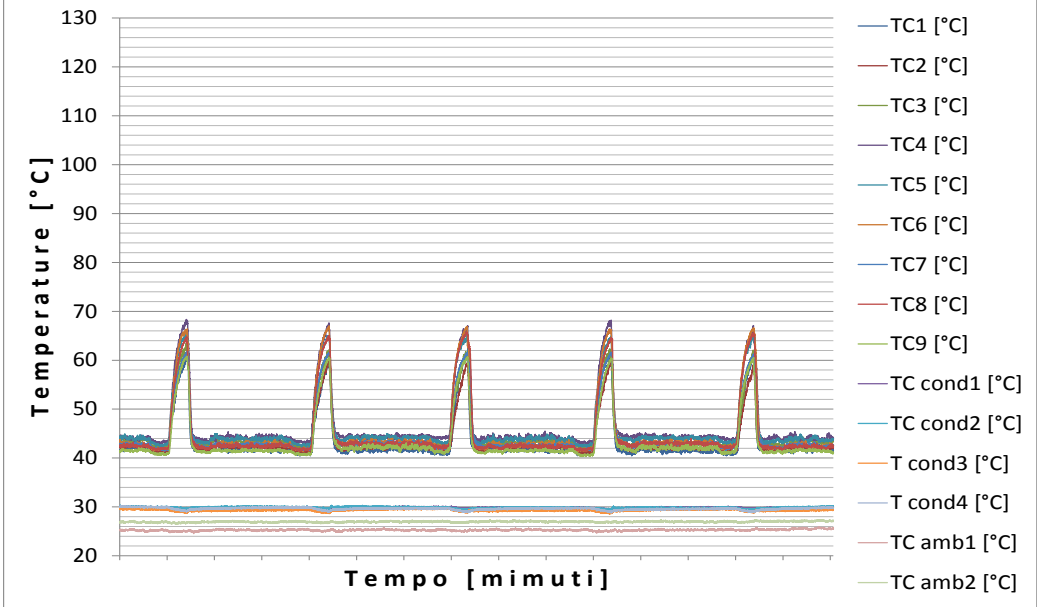


Figura 7 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP verticale a 50W

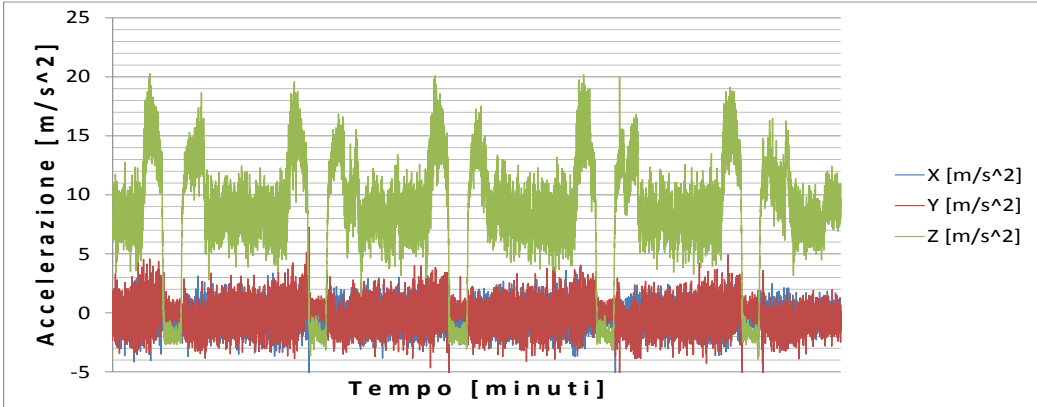


Figura 8 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

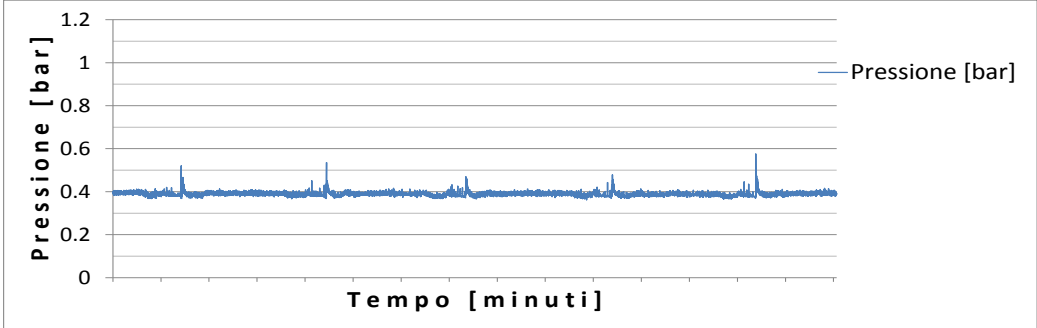


Figura 9 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 50W





## Appendice C (PHP orizzontale Q up, 50%)

### Grafici volo parabolico PHP orizzontale da 50W a 100W

#### Serie di parabole con PHP orizzontale a 60W

All'aumentare della potenza termica fornita la fascia entro la quale vanno a stabilizzarsi le temperature si alza. Anche qui notiamo l'andamento indipendente delle temperature rispetto all'accelerazione di gravità. La pressione comincia ad assumere un comportamento più nervoso e con più picchi.

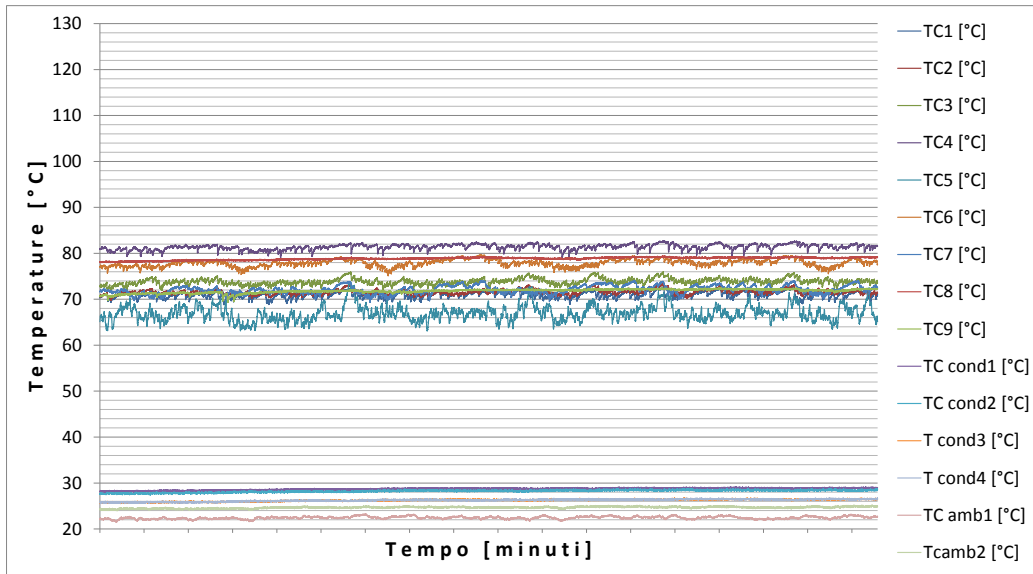


Figura 1 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 60W

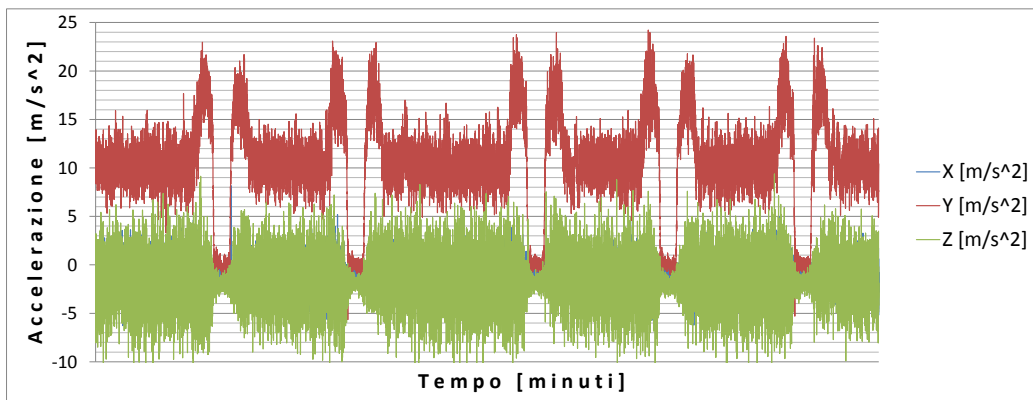


Figura 2 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

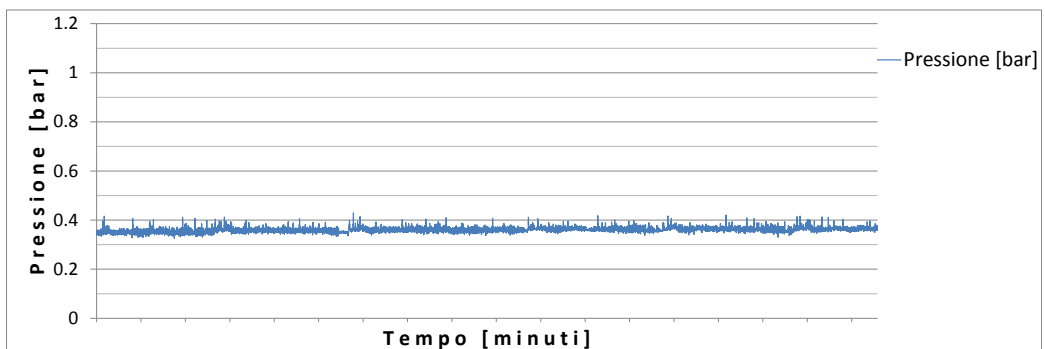


Figura 3 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 60W

### Serie di parabole con PHP orizzontale a 70W

Come nel caso precedente le temperature all'evaporatore si alzano ancora, senza però risentire dell'effetto dell'accelerazione di gravità.

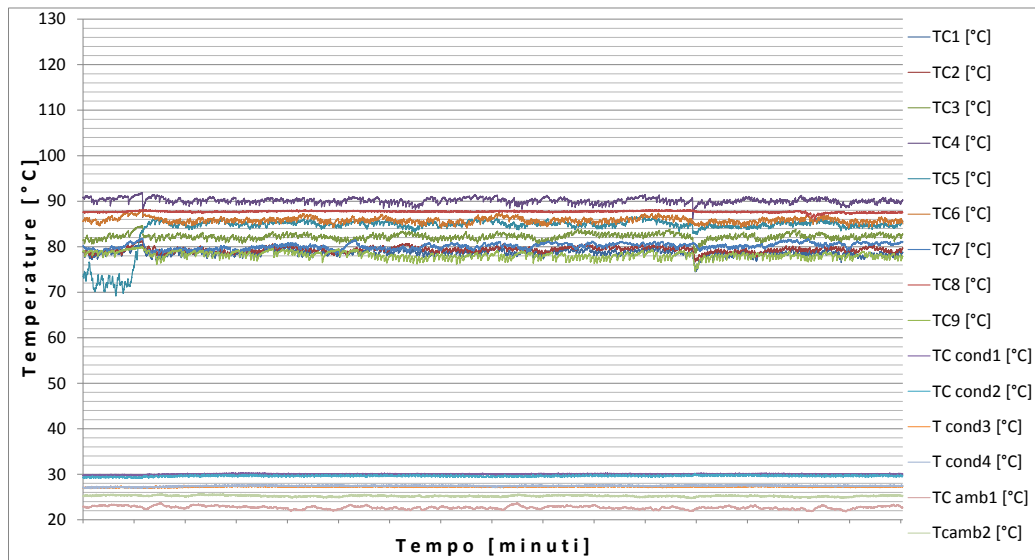


Figura 4 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 70W

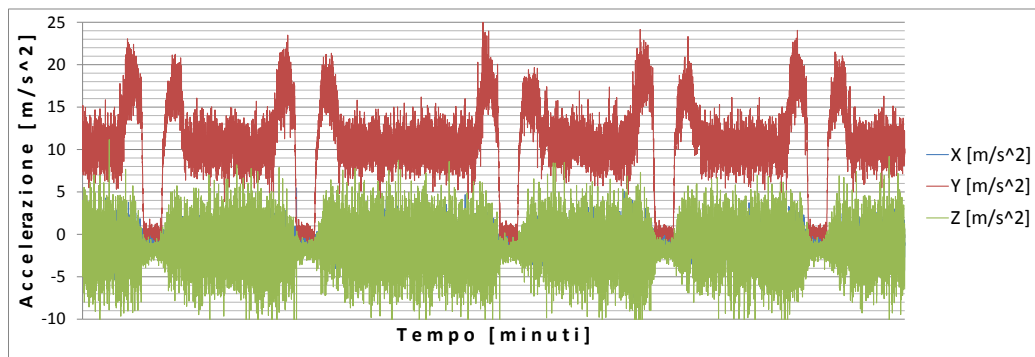


Figura 5 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

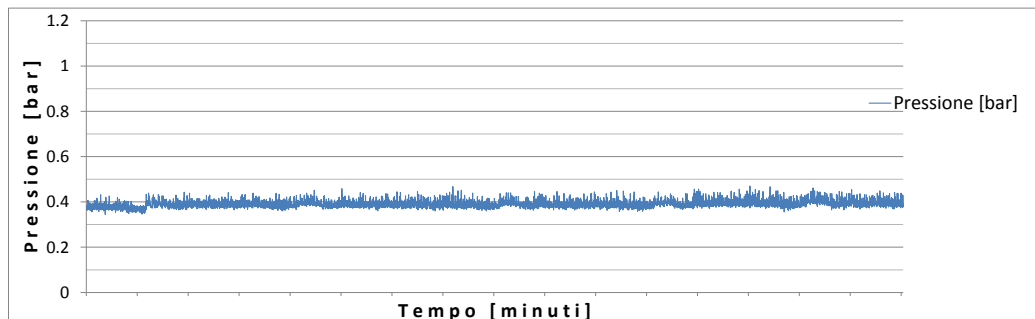


Figura 6 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 70W

### Serie di parabole con PHP orizzontale a 80W

Le temperature nella zone di evaporazione salgono ancora di una decina di gradi continuando a non risentire delle variazioni di accelerazione di gravità. Per il momento rimangono ancora tutte allineate in una fascia di valori piuttosto omogenea anche se quest'ultima tende ad allargarsi rispetto ai casi precedenti.

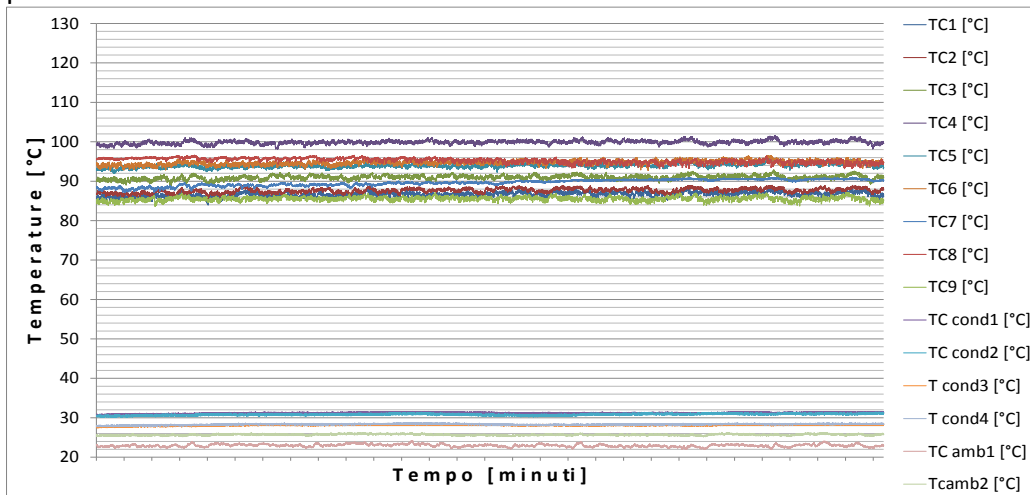


Figura 7 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 80W

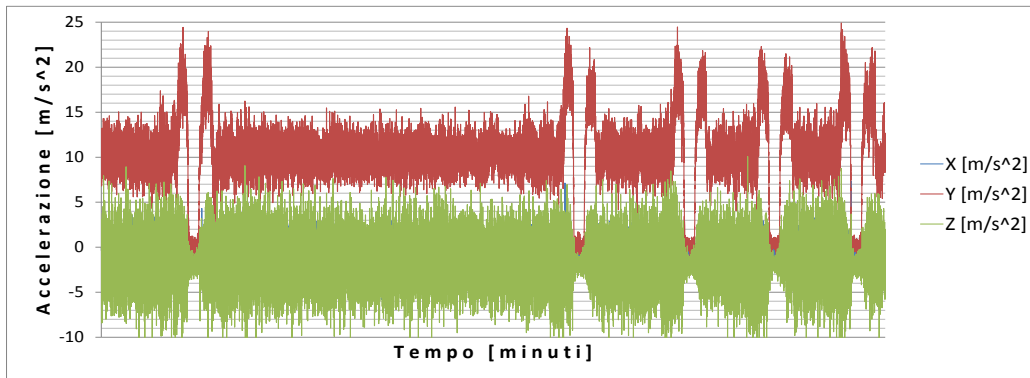


Figura 8 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

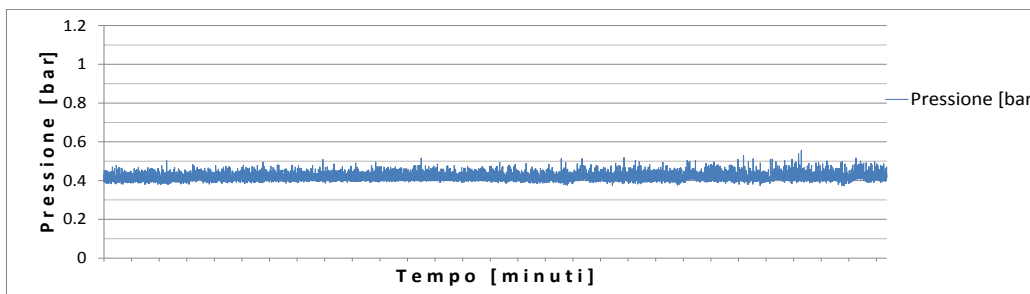


Figura 9 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 80W

### Serie di parabole con PHP orizzontale a 90W

Allo step successivo di potenza abbiamo ancora un aumento di circa 10°C della fascia di temperature sempre senza vedere alcun effetto dovuto alla forza di gravità. La fascia di valori occupati dalle temperature continua ad allargarsi fino a diventare di circa 20°C.

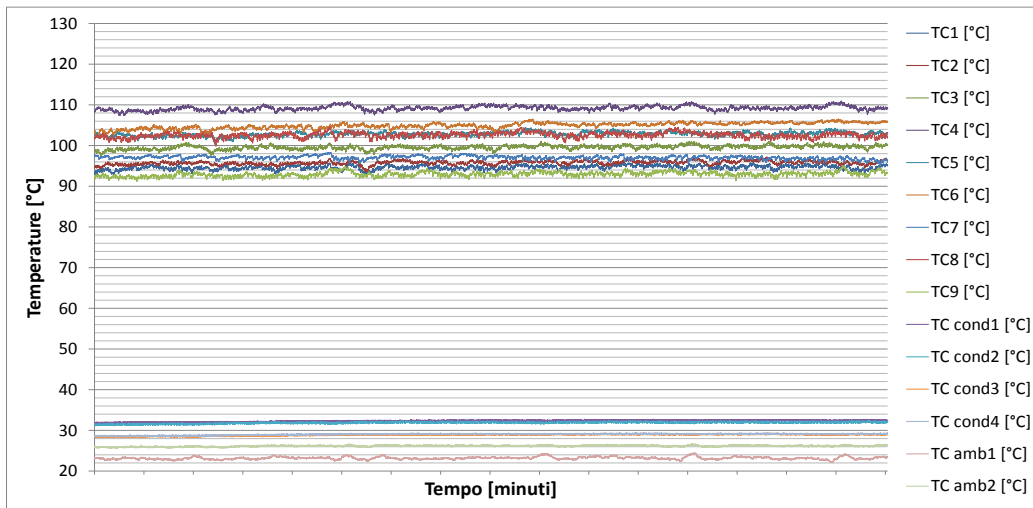


Figura 10 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 90W

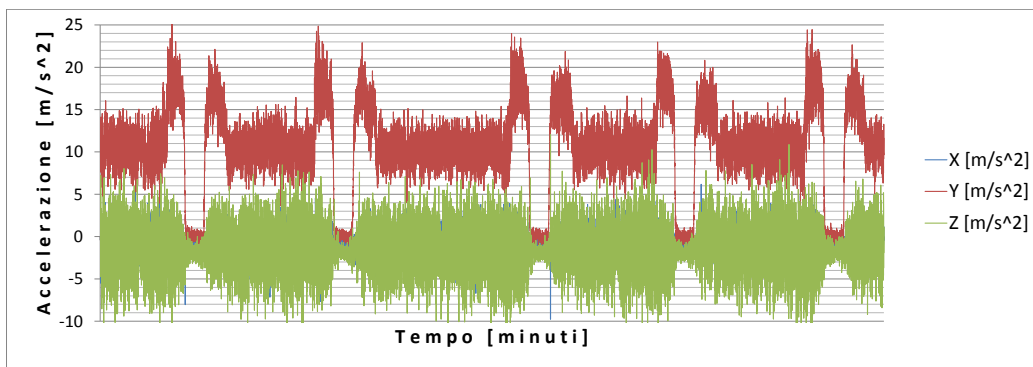


Figura 11 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

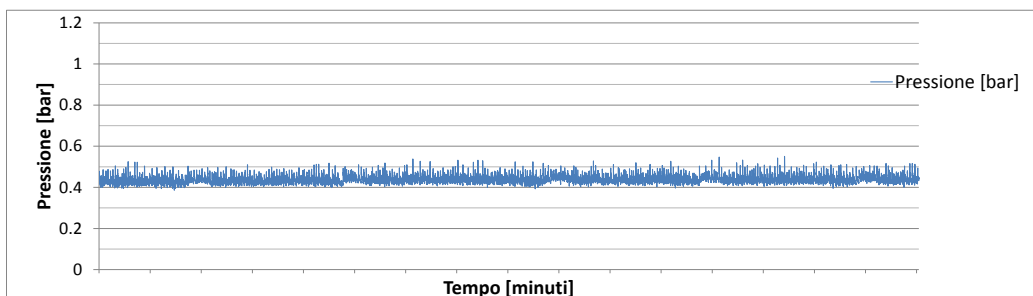


Figura 12 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 90W

### **Serie di parabole con PHP orizzontale a 100W**

Si registra il solito incremento di circa 10°C della fascia in cui vanno a stabilizzarsi le temperature dell'evaporatore, in questa fase delle prove siamo appena al di sotto dei 120°C, temperatura alla quale il software di controllo toglierebbe l'alimentazione per questione di sicurezza. Come nei casi precedenti non notiamo alcuna variazione di queste temperature con l'accelerazione di gravità.

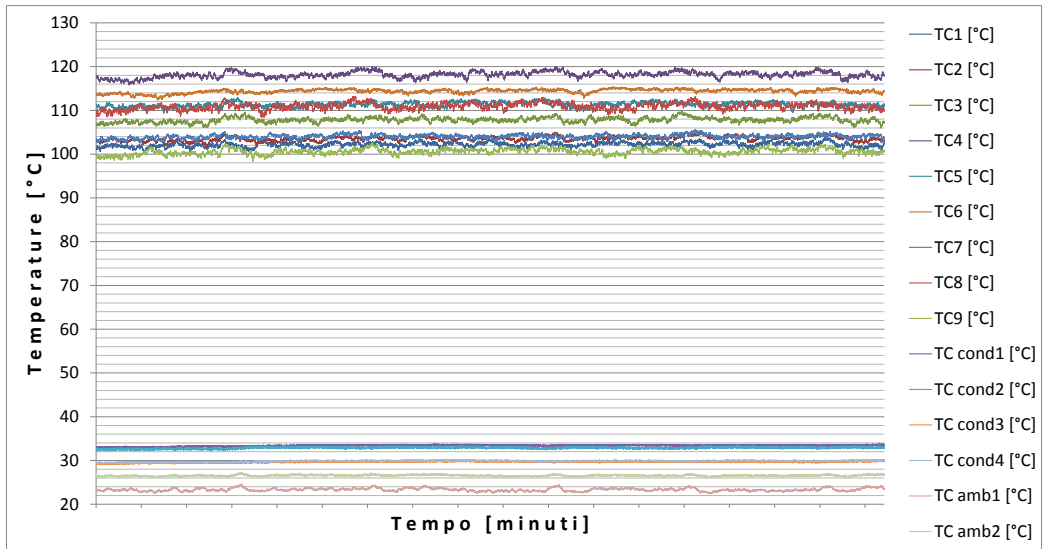


Figura 13 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 100W

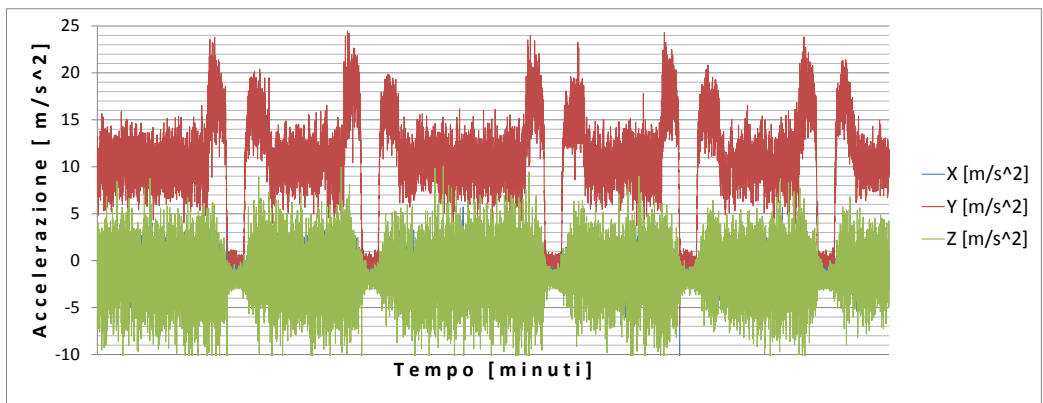


Figura 14 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

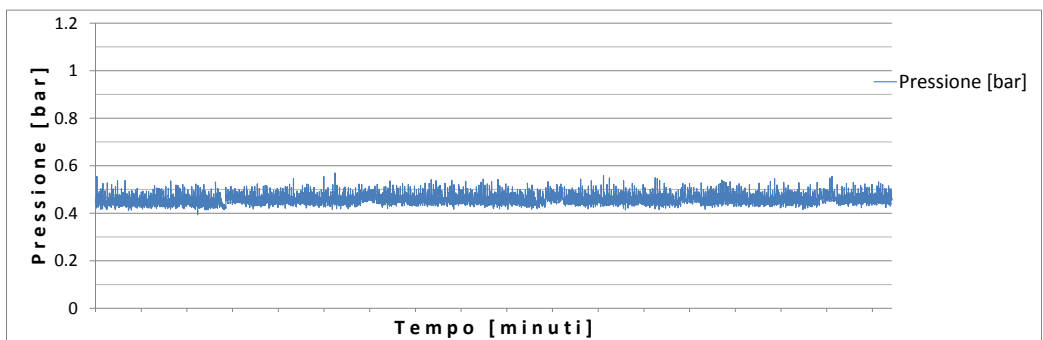


Figura 15 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 100W





## Appendice D (transitori simulati Q up)

### Grafici simulazioni transitori a terra con potenza in salita

#### Transitorio a terra cambiando orientazione con PHP a 50W

Possiamo osservare dei comportamenti analoghi per gli step successivi di potenza termica. A 50W a terra, nel caso di regime stazionario, le temperature stanno tra i 40°C e i 46°C, durante i picchi si toccano invece valori pari a circa 68°C. Considerando un valore medio di circa 44°C otteniamo così delle differenze di temperatura pari a 24°C.

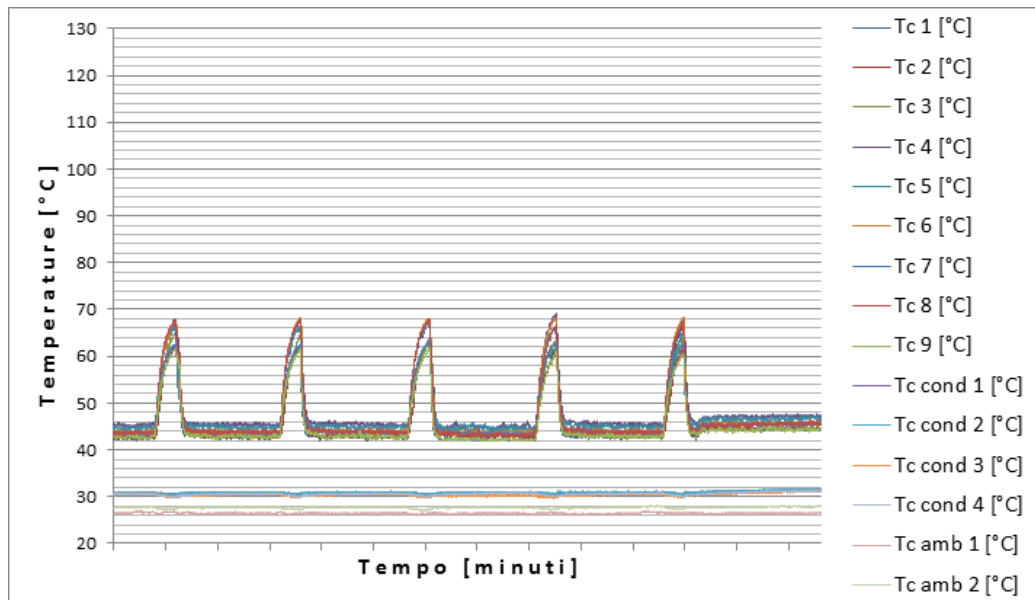


Figura 1 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 50W

**Transitorio in volo cambiando regime di gravità con PHP a 50W**

In volo, sempre in virtù della più bassa temperatura ambiente, le temperature nella zona di evaporazione rimangono comprese tra i 40°C e i 44°C, nelle fasi di transitorio si raggiungono invece valori intorno ai 68°C. Considerando una temperatura media di circa 42°C otteniamo delle differenze di circa 26°C, comunque molto vicine a quelle ottenute coi transitori a terra.

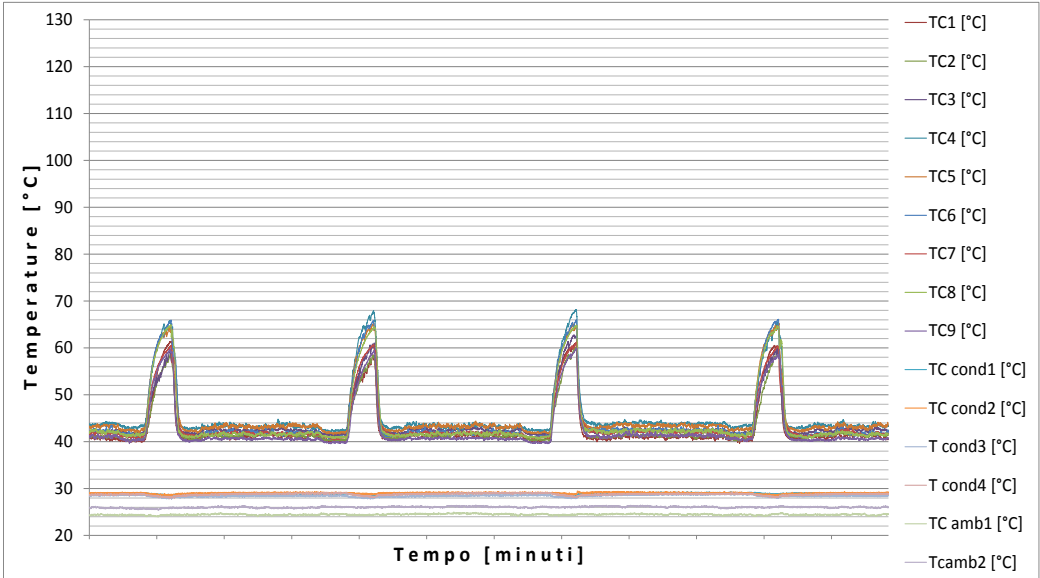


Figura 2 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio in volo e PHP a 50W

### Transitorio a terra cambiando orientazione con PHP a 60W

Con questa potenza fornita le temperature nello stato stazionario stanno tra i 44°C e i 48°C, i livelli raggiunti durante il picco assumono invece valori vicini ai 78°C. Assumendo una temperatura media pari a 46°C otteniamo delle differenze di temperatura pari a circa 32°C. Possiamo notare come ad ogni step di potenza la temperatura media raggiunta nello stato stazionario aumenti sempre di circa 2°C. I picchi aumentano, invece, di circa 10°C.

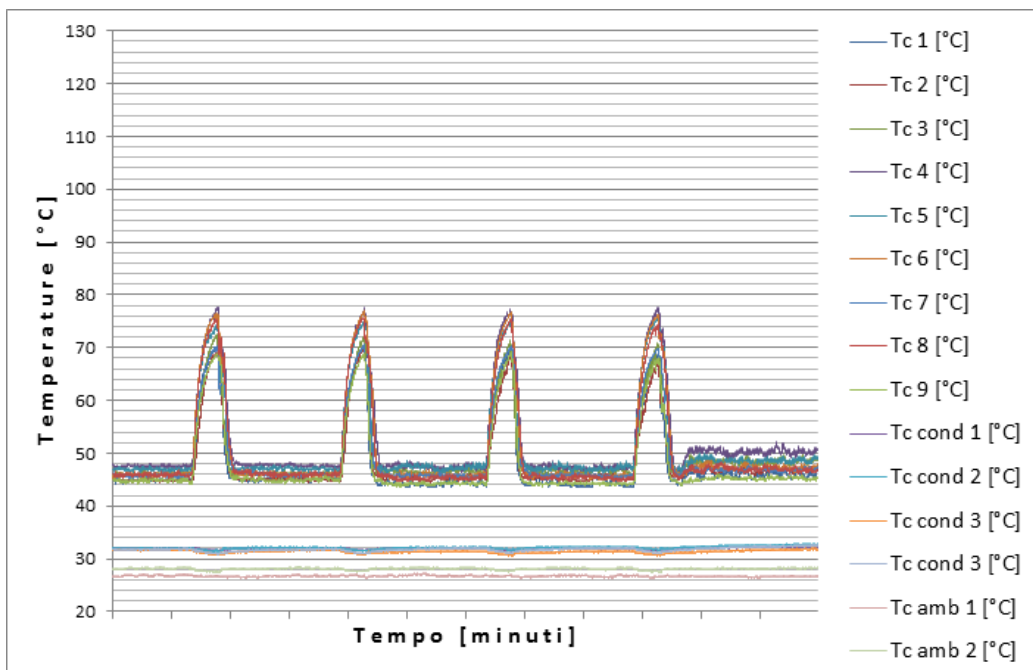


Figura 3 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 60W

### Transitorio in volo cambiando regime di gravità con PHP a 60W

In volo le temperature a regime si trovano tra i 42°C e i 46°C, i picchi toccano invece valori intorno ai 76°C. Considerando una temperatura media a regime di 44°C otteniamo delle differenze di 32°C, perfettamente compatibili con quelli trovati nelle prove a terra. Possiamo osservare, nelle prove in volo, gli stessi cambiamenti e aumenti riscontrati a terra correlati con gli aumenti di potenza termica fornita ai riscaldatori. Tutto rimane sempre traslato più in basso per via della più bassa temperatura ambiente.

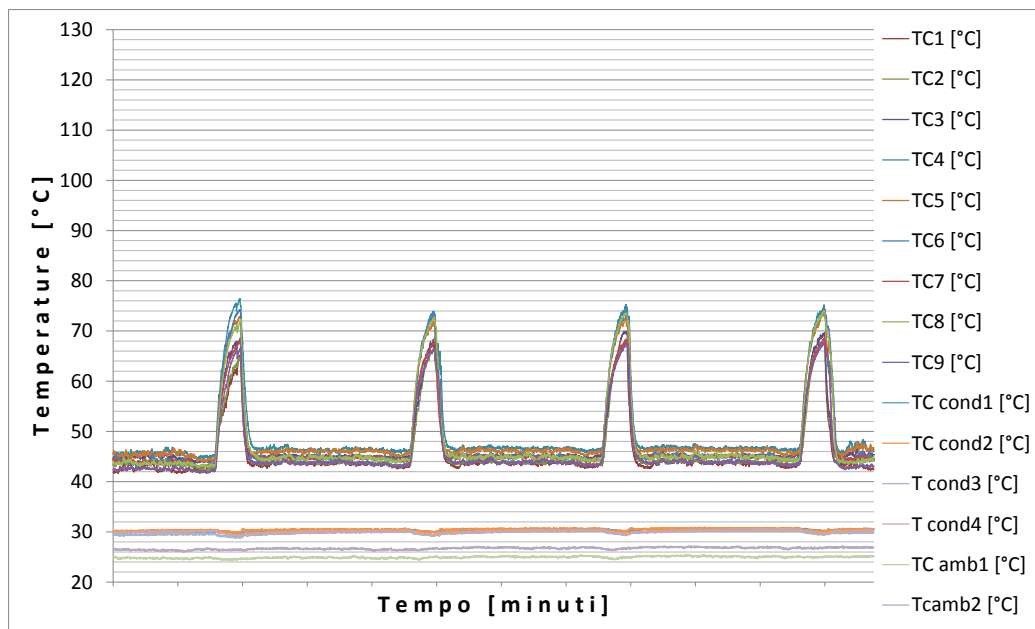


Figura 4 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio in volo e PHP a 60W

### Transitorio a terra cambiando orientazione con PHP a 70W

Aumentando ulteriormente la potenza possiamo notare come la fascia di temperature dell'evaporatore allo stato stazionario tenda ad allargarsi: ora esse stanno comprese tra i 46°C e i 52°C, considerando una temperatura media di circa 49°C. I picchi raggiungono valori intorno agli 87°C, otteniamo quindi delle differenze di circa 38°C.

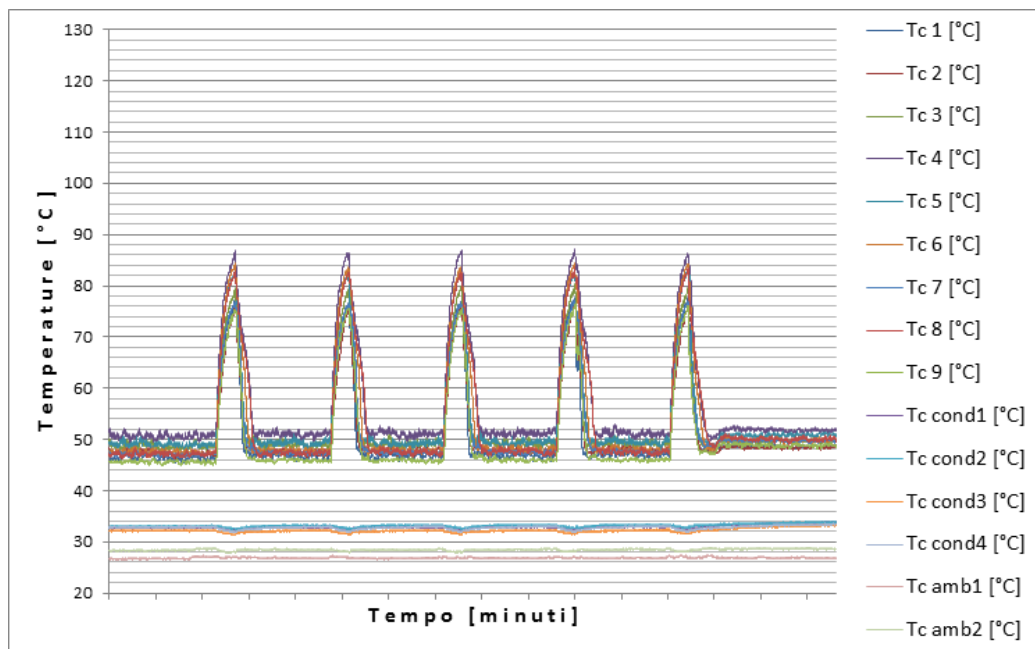


Figura 5 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 70W

**Transitorio in volo cambiando il regime di gravità con PHP a 70W**

Anche in volo la fascia di temperature per lo stato stazionario si allarga, esse sono comprese tra i 44°C e i 51°C, i picchi raggiungono valori intorno agli 84°C. Considerando una temperatura media di 47.5°C possiamo ricavare una differenza di temperaturapari circa 36.5°C.

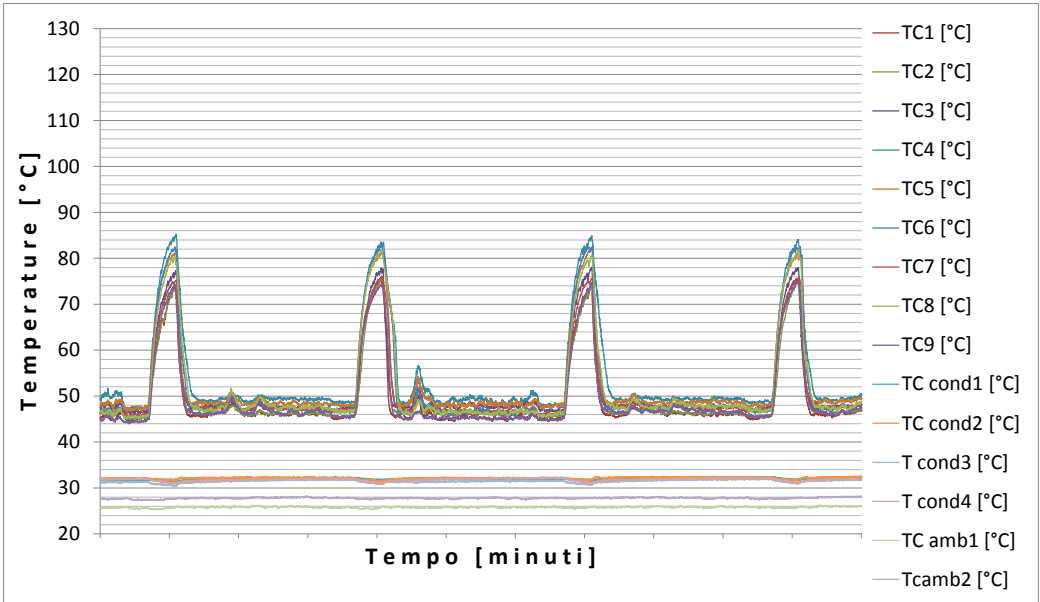


Figura 6 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio in volo e PHP a 70W

### Transitorio a terra variando l'orientazione con PHP a 80W

Possiamo notare come inizialmente le temperature si trovino in una fascia compresa tra 48°C e 52°C, però dopo un primo cambio di orientazione la fascia si allarga e tocca i 54°C con la TC\_4 che addirittura si aggira attorno ai 56°C. Sempre quest'ultima temperatura fatica leggermente a riabbassarsi e a tornare nel range delle altre; iniziano a vedersi i primi sintomi di malfunzionamento. I picchi di temperatura si aggirano attorno ai 95°C, considerando una temperatura media di 52°C otteniamo delle differenze pari a circa 43°C. Si può già notare, dal grafico sottostante, come un ulteriore aumento di temperatura provochi l'otturazione di alcuni canali e quindi il corretto funzionamento della PHP.

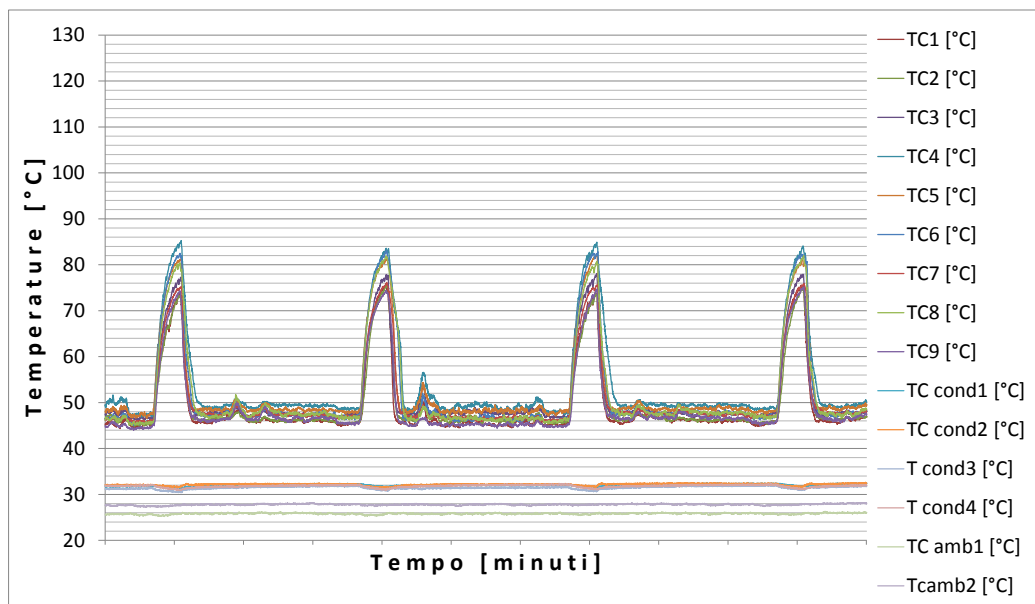


Figura 7 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 80W

### Transitorio in volo variando il campo gravitazionale con PHP a 80W

In volo le temperature all'evaporatore, dopo aver raggiunto il regime stazionario, si trovano in una fascia compresa tra i 48°C e i 52°C, questa fascia rimane fissa ma dopo la seconda parabola si allarga notevolmente e il suo estremo superiore si sposta a 58-60°C. Anche in questo caso possiamo iniziare a notare qualche problema di malfunzionamento, tuttavia nessuna temperatura fatica a rientrare dopo le parabole, questo perché l'accelerazione di 1.8g che si instaura a seguito della conclusione delle manovre dell'aereo aiuta maggiormente il moto del fluido rispetto alla normale accelerazione pari a 1g che si può ottenere a terra cambiando l'orientazione della PHP. Mediamente l'evaporatore si trova a una temperatura più bassa del caso a terra sempre per via di una minore temperatura ambiente. I Picchi raggiunti nei transitori si aggirano attorno ai 93°C. Anche in questo caso risulta leggermente più complicato stimare una temperatura media dell'evaporatore dato l'allargamento del range di temperature, considerando, per esempio, 52°C, otteniamo delle differenze di temperatura pari a circa 41°C, che sono ancora piuttosto vicini alle differenze di circa 43°C del caso a terra. Possiamo sempre affermare che i transitori hanno dei comportamenti molto simili nelle due situazioni ma che iniziano a differenziarsi leggermente (vedi difficoltà di rientro per TC\_4).

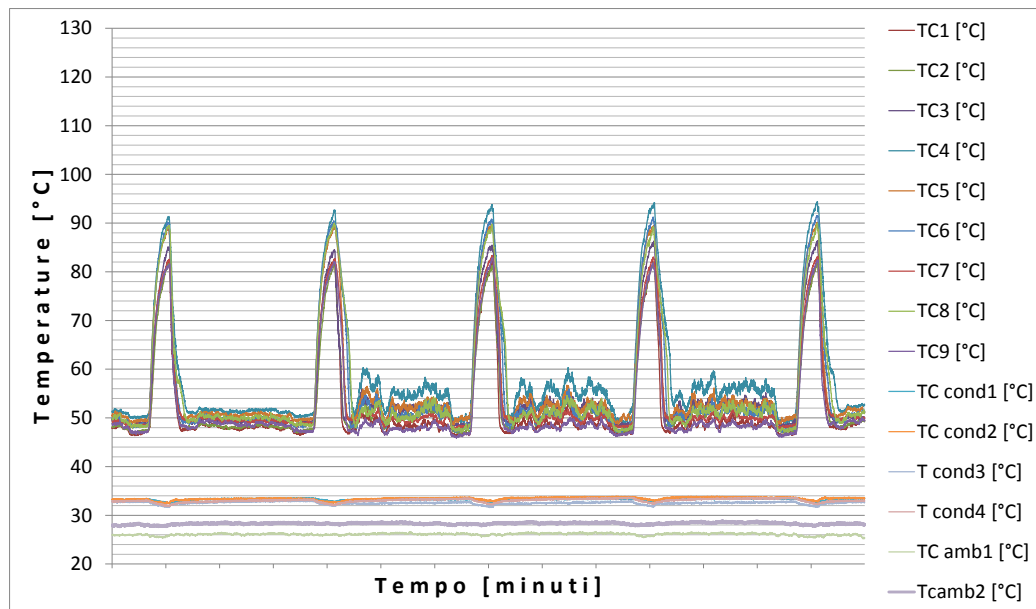


Figura 8 Temperature evaporatore, condensatore e ambiente per transitorio in volo e PHP a 80W



## Appendice E (transitori simulati Q down)

### Transitori simulati a terra con potenza in discesa

#### PHP a 70W Transitorio a terra ottenuto cambiando l'orientazione con PHP a 70W

Abbassando ulteriormente la potenza alle resistenze tutte le temperature assumono dei valori vicini all'interno di una fascia piuttosto ristretta, in genere si trovano tra i 47°C e i 51°C, solo dopo la seconda parabola la fascia si allarga assumendo come estremi i 46°C e i 53°C. Si può comunque assumere una temperatura media dell'evaporatore pari a 49°C, i picchi assumono valori di circa 86°C fornendo così una differenza di temperatura pari a 37°C. Anche in questo caso qualche rientro dopo il transitorio sembra essere leggermente più lento, probabilmente il passaggio manuale non era stato ottimale.

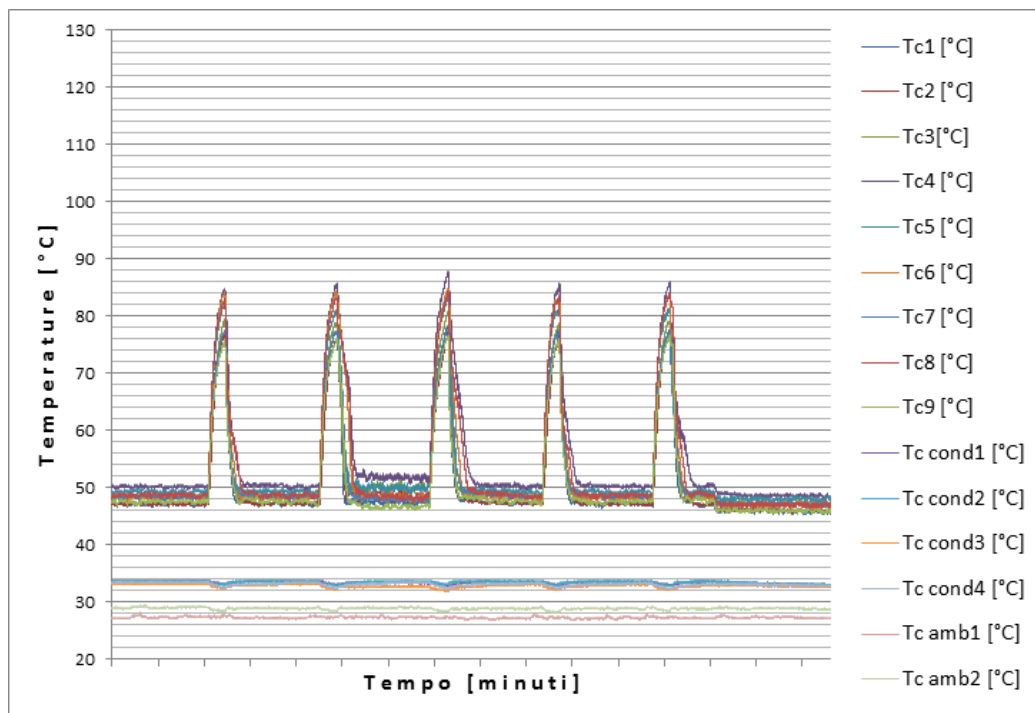


Figura 1 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 70W

### Transitorio in volo ottenuto variando il campo gravitazionale con PHP a 70W

Come nel caso a terra si presenta un range uniforme in cui si sono stabilizzate le temperature dopo lo stato stazionario, i valori che occupano in questo caso sono compresi tra i 46°C e i 50°C. Dopo la prima parabola la fascia si allarga, abbiamo quindi temperature comprese tra i 45°C e i 52°C, possiamo comunque assumere un valore medio di temperatura pari a 48.5°C. I picchi raggiungono dei valori intorno agli 86°C, otteniamo a questa maniera delle differenze di temperatura pari a 37.5°C, praticamente compatibili con quelli ottenuti dalle prove a terra. Si può notare che durante lo svolgimento del volo la temperatura ambiente tende ad abbassarsi, siamo ora più vicini ai 26°C.

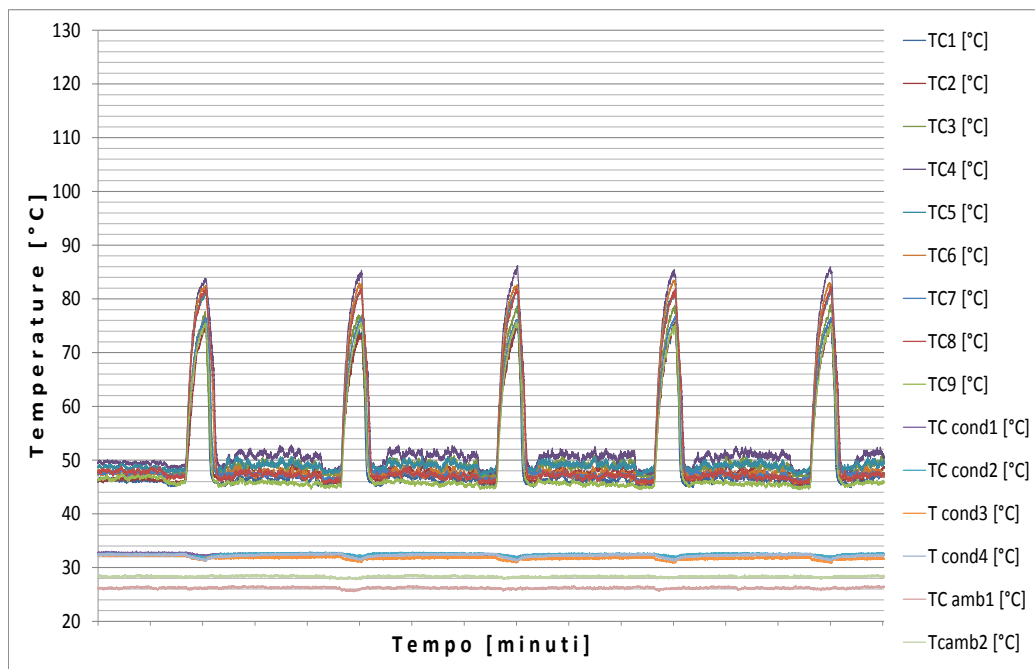


Figura 2 Temperature evaporatore, condensatore e ambiente per transitorio in volo e PHP a 70W

### Transitorio a terra cambiando orientazione con PHP a 60W

Con la diminuzione della potenza il comportamento si regolarizza molto, le temperature all'evaporatore rimangono sempre vicine e il range non varia, rimangono sempre tra i 45°C e i 49°C; si può allora assumere una temperatura media pari a 47°C. I picchi raggiungono valori vicini ai 78°C, si ottengono allora delle differenze di temperatura pari a 31°C.

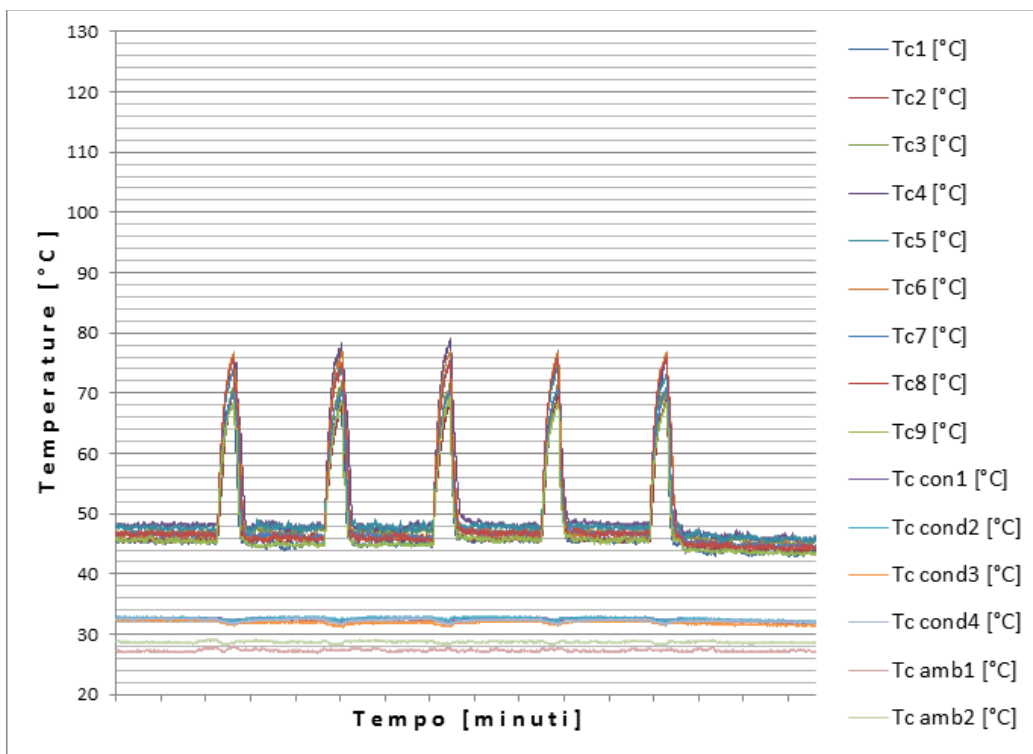


Figura 3 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 60W

### Transitorio in volo ottenuto variando il campo gravitazionale con PHP a 60W

Anche in questo caso le temperature si stabilizzano regolarmente tra i 44°C e i 48°C, rimangono sempre fisse in questo range aiutando l'evaporatore a rimanere il più possibile isoterma. Si può allora considerare una temperatura media pari a circa 46°C, contando che i picchi raggiungono valori di circa 77°C otteniamo delle differenze di temperatura pari a circa 31°C, assolutamente compatibili con quelli delle prove a terra. I valori massimi e medi dell'evaporatore tra le due situazioni iniziano a discostarsi per via della variazione della temperatura ambiente durante il volo, la quale è in diminuzione.

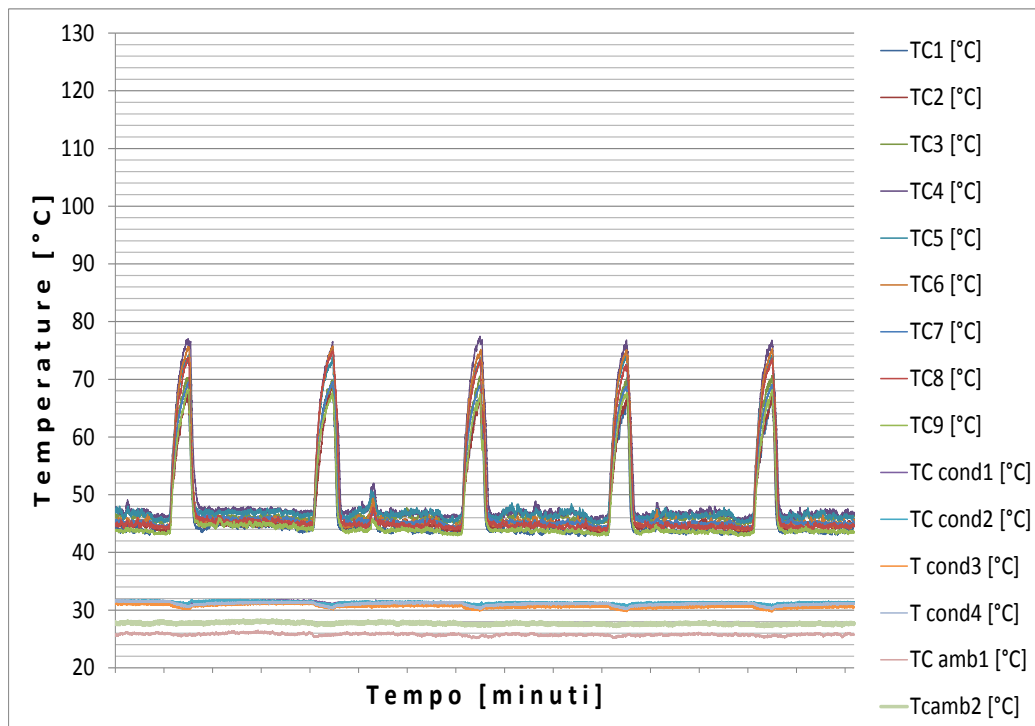


Figura 4 Temperature evaporatore, condensatore e ambiente per transitorio in volo e PHP a 60W

### Transitorio a terra ottenuto cambiando orientazione con PHP a 50W

Il funzionamento è sempre regolare, le temperature rimangono senza problemi tra i 43°C e i 46°C, da cui si evince una temperatura media di 44.5°C. I picchi raggiungono valori intorno ai 70°C, si può quindi ricavare una differenza di circa 25.5°C.

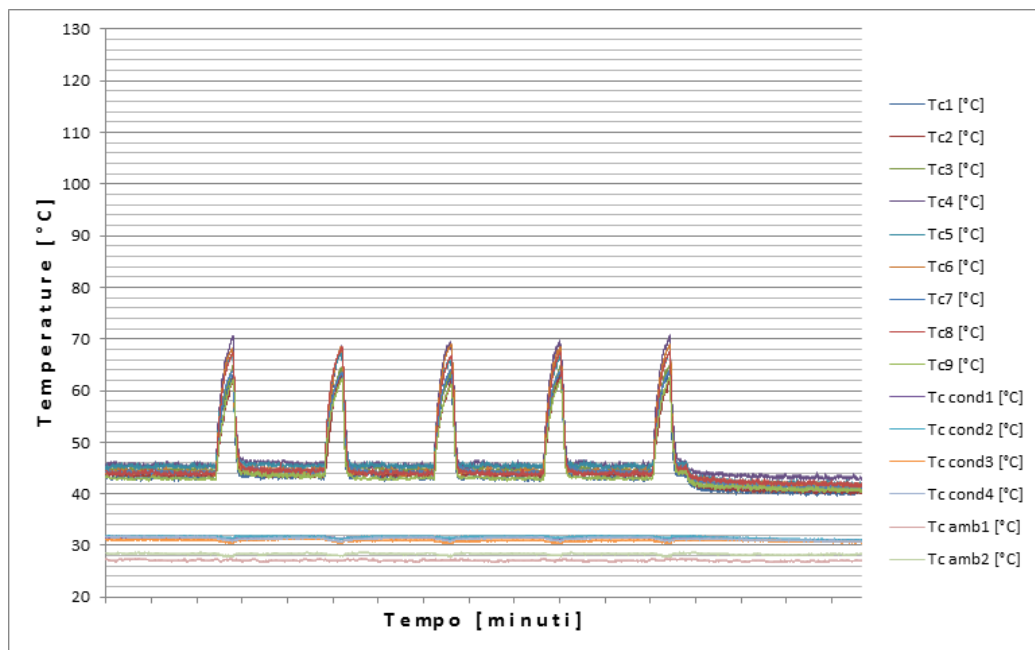


Figura 5 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente per transitorio a terra e PHP a 50W

### Transitorio in volo ottenuto variando il campo gravitazionale con PHP a 50W

Analogamente al caso a terra le temperature si comportano in maniera molto regolare e rimangono comprese tra i 41°C e i 45°C, mediamente possiamo affermare 43°C. Alla fine del transitorio si raggiungono valori massimi intorno ai 68°C, quindi con una differenza pari a circa 25°C, assolutamente compatibile con quelle riscontrate nelle prove a terra.

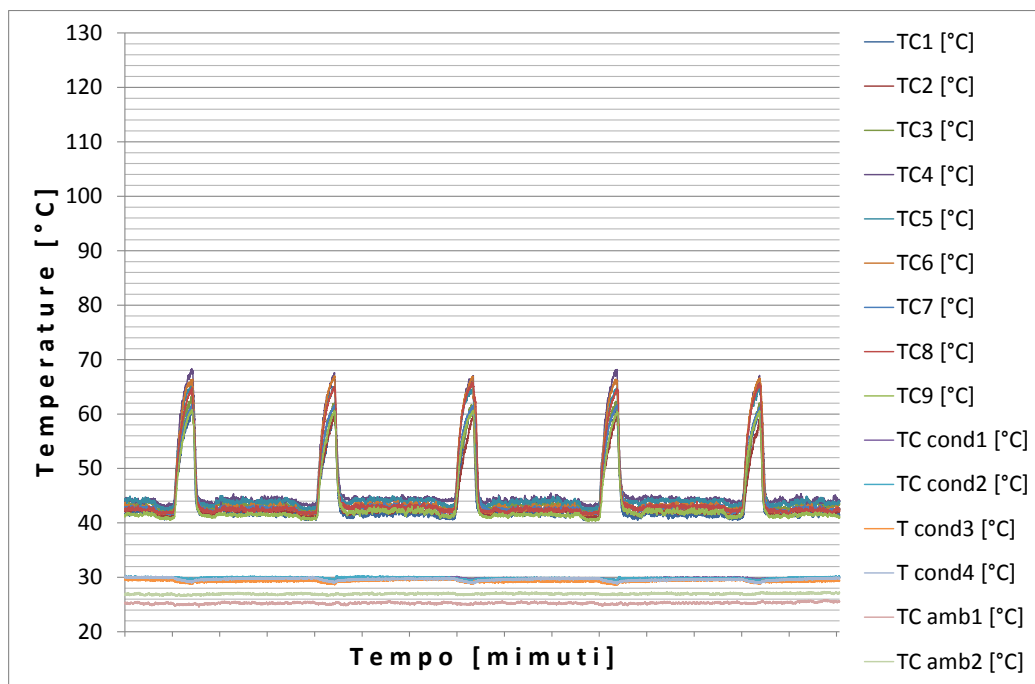


Figura 6 Temperature evaporatore, condensatore e ambiente per transitorio in volo e PHP

## Appendice F (spettri pressione e gravità)

### Grafici analisi spettrali

#### PHP verticale

#### PHP a 40W

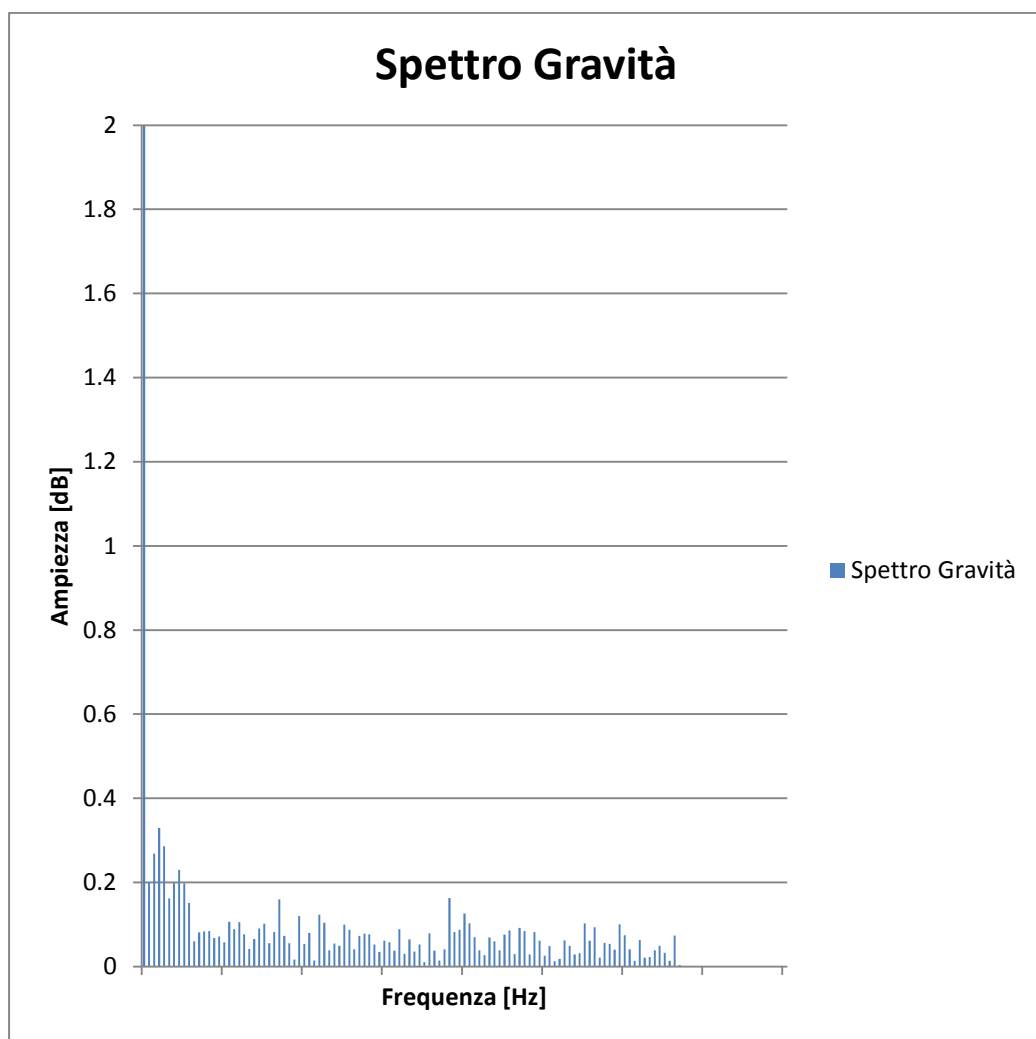


Figura 1 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 40W

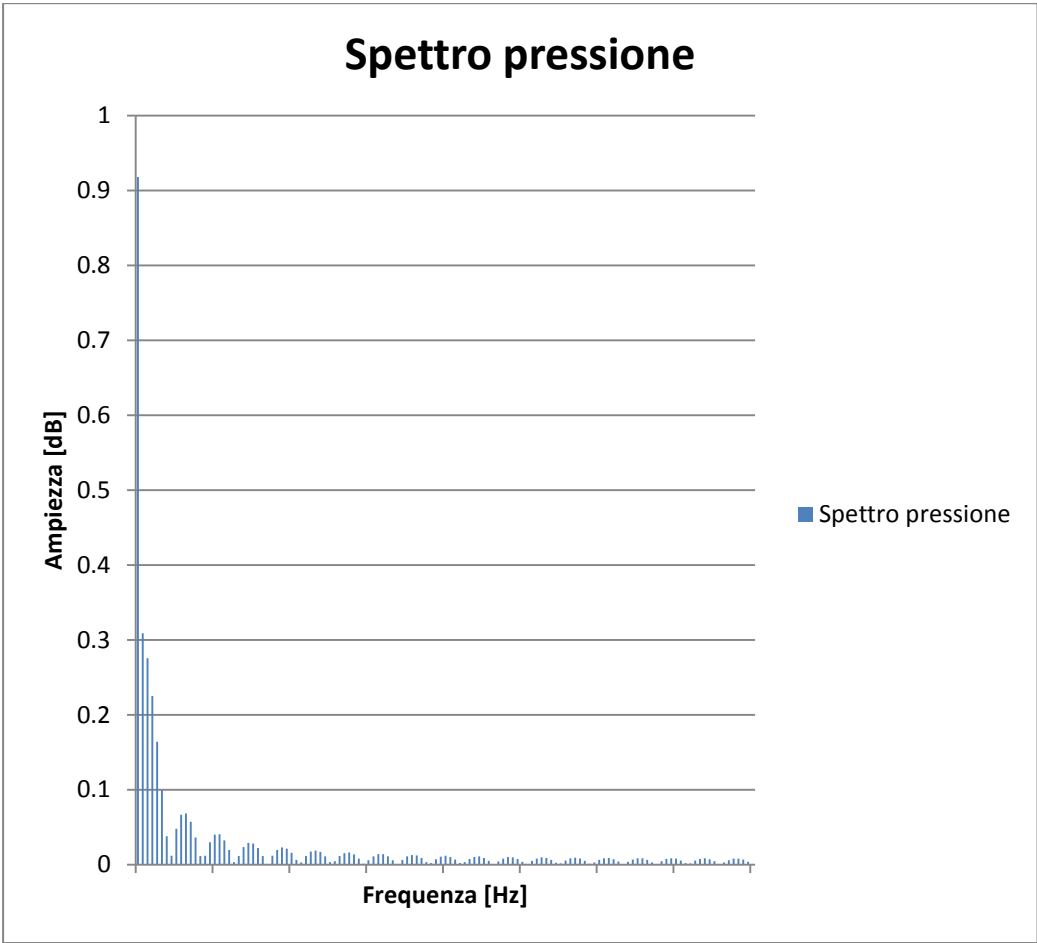


Figura 2 Spettro pressione per PHP a 40W



PHP a 50W

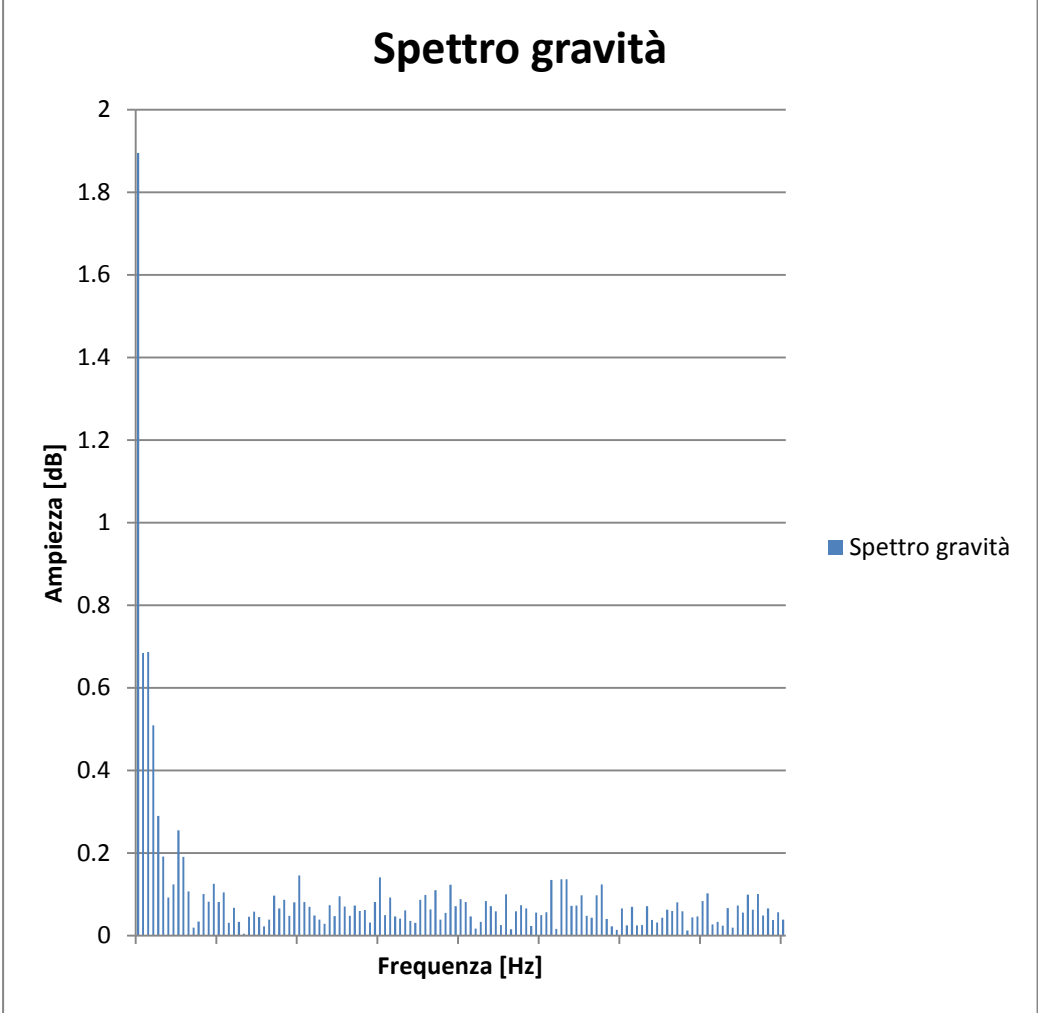


Figura 3 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 50W

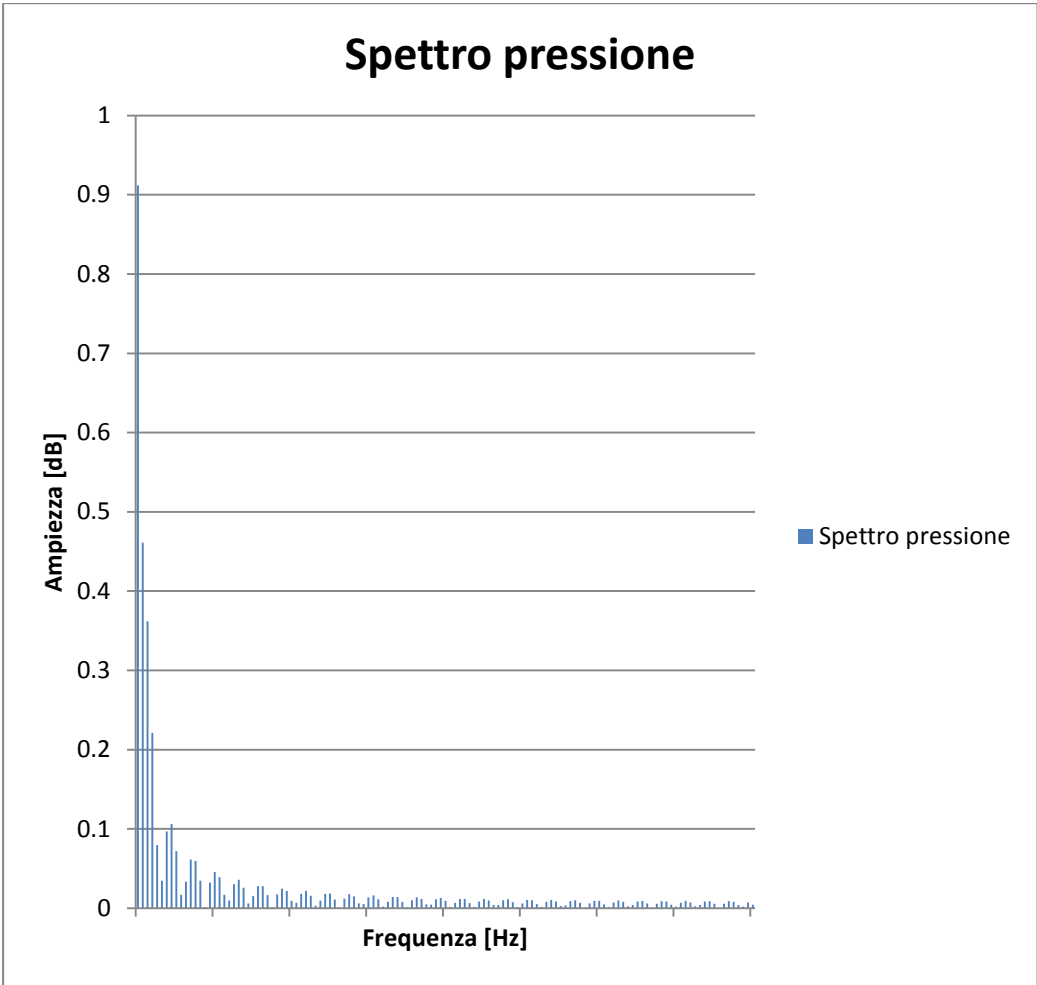


Figura 4 Spettro pressione per PHP a 50W

PHP a 60W

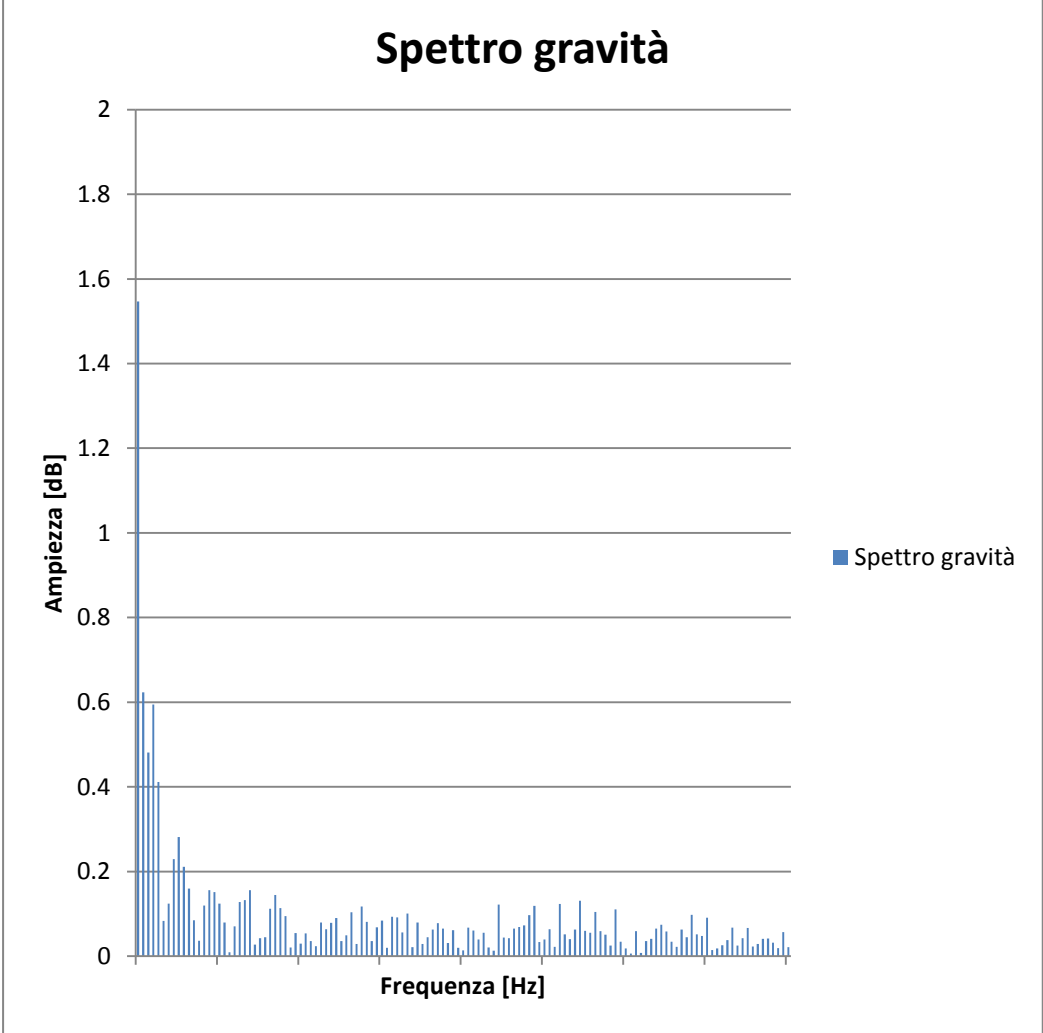


Figura 5 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 60W

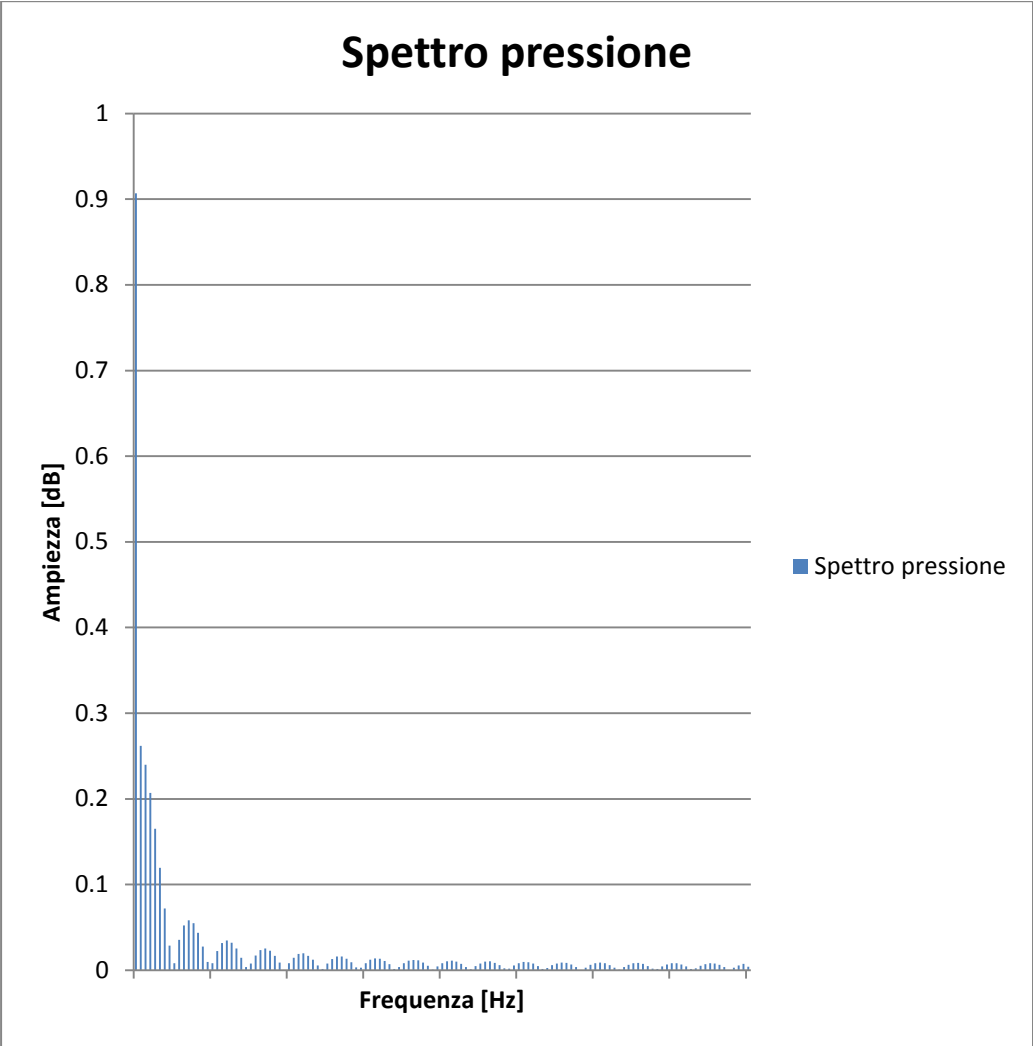


Figura 6 Spettro pressione per PHP a 60W

PHP a 70W

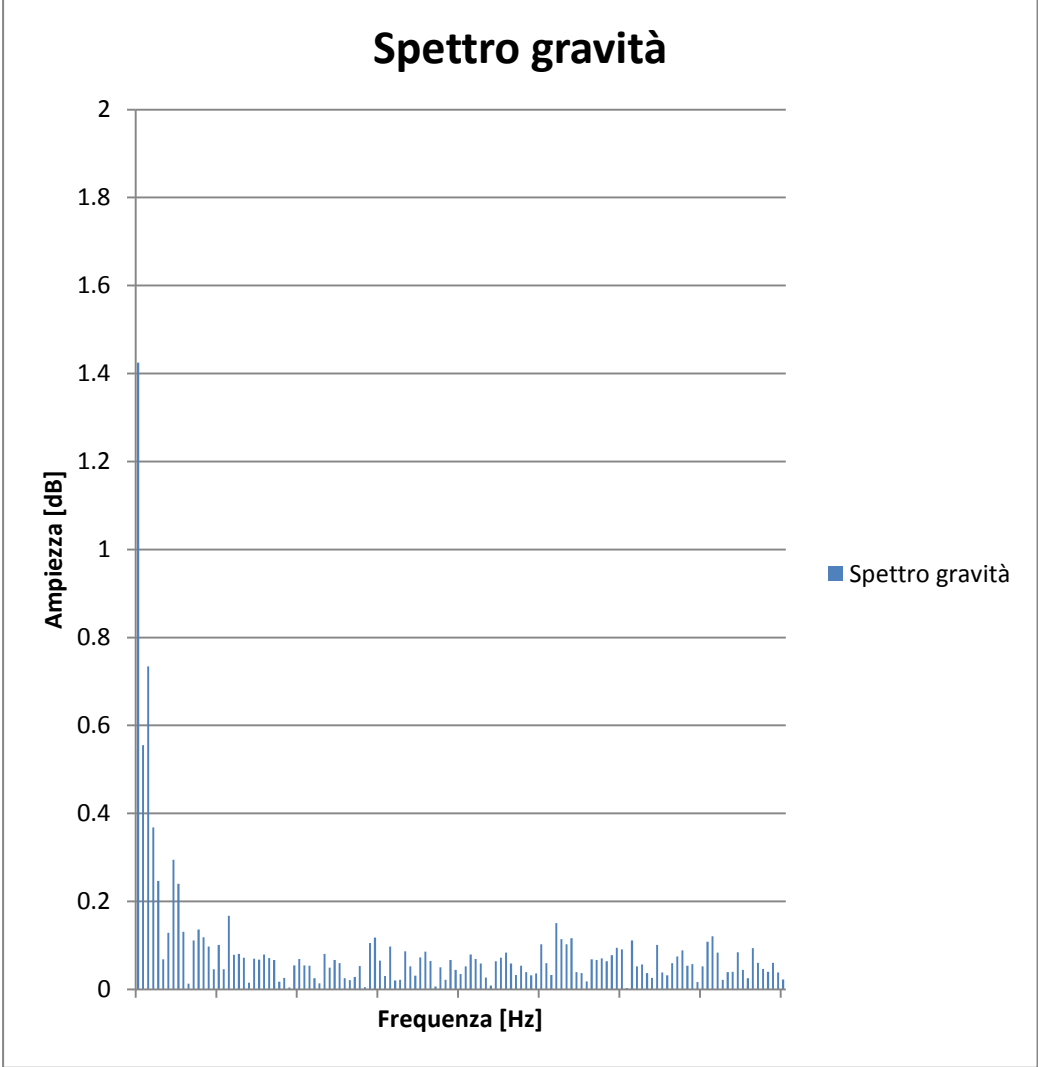


Figura 7 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 70W

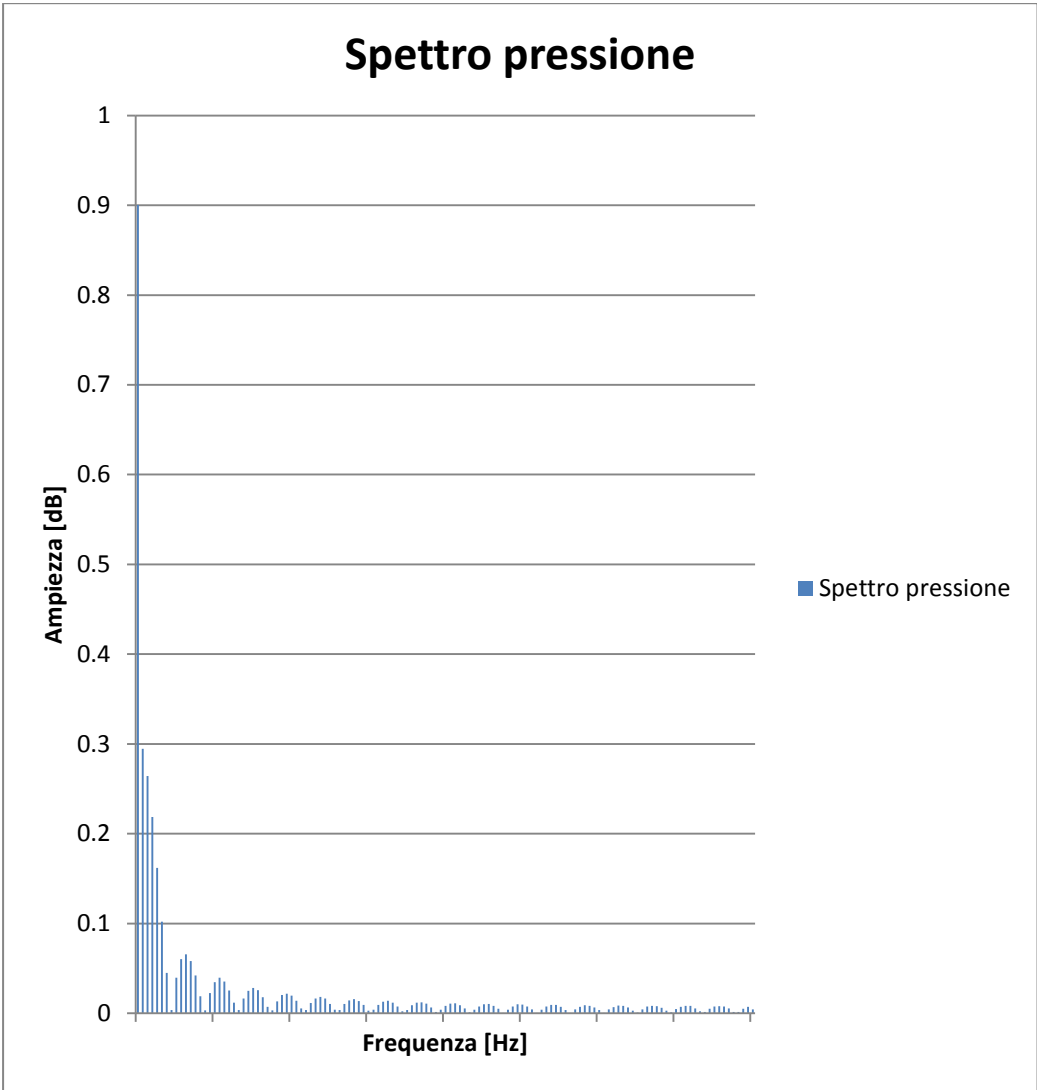


Figura 8 Spettro pressione per PHP a 70W

PHP a 80W

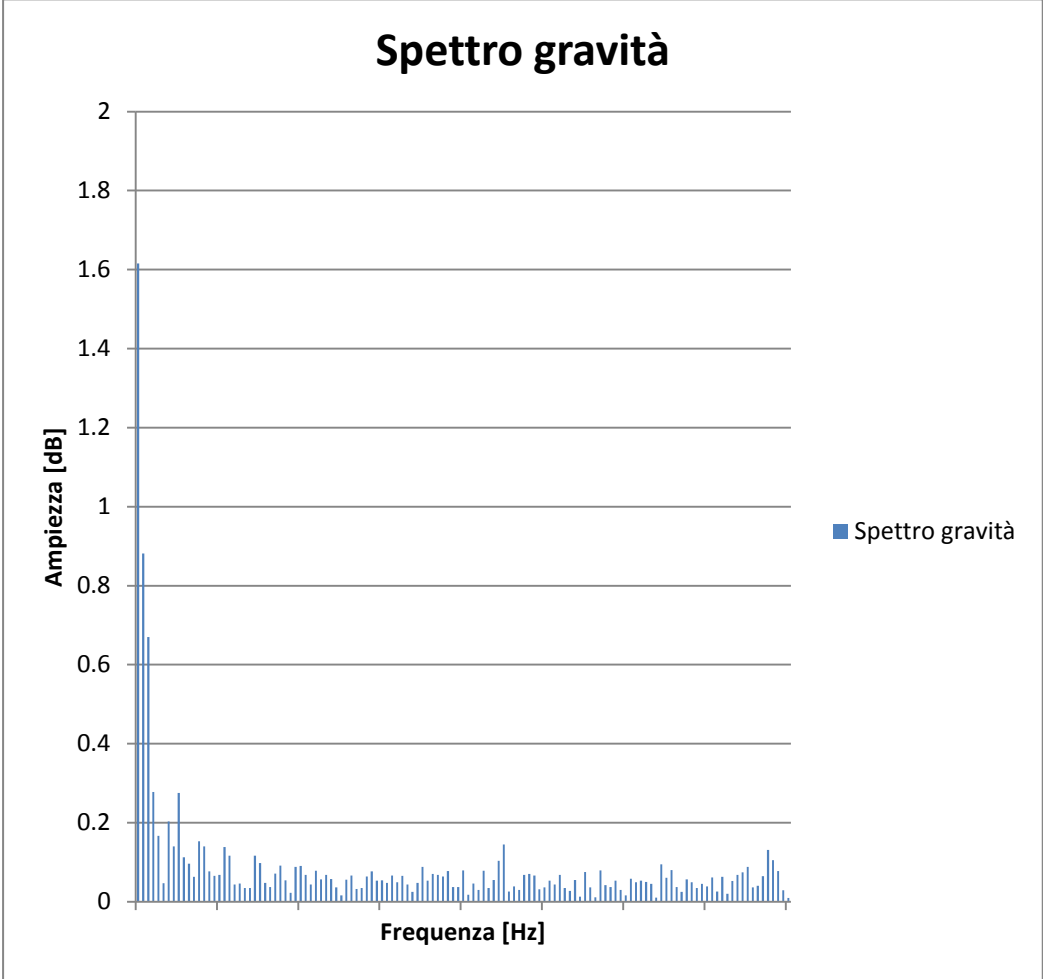


Figura 9 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 80W

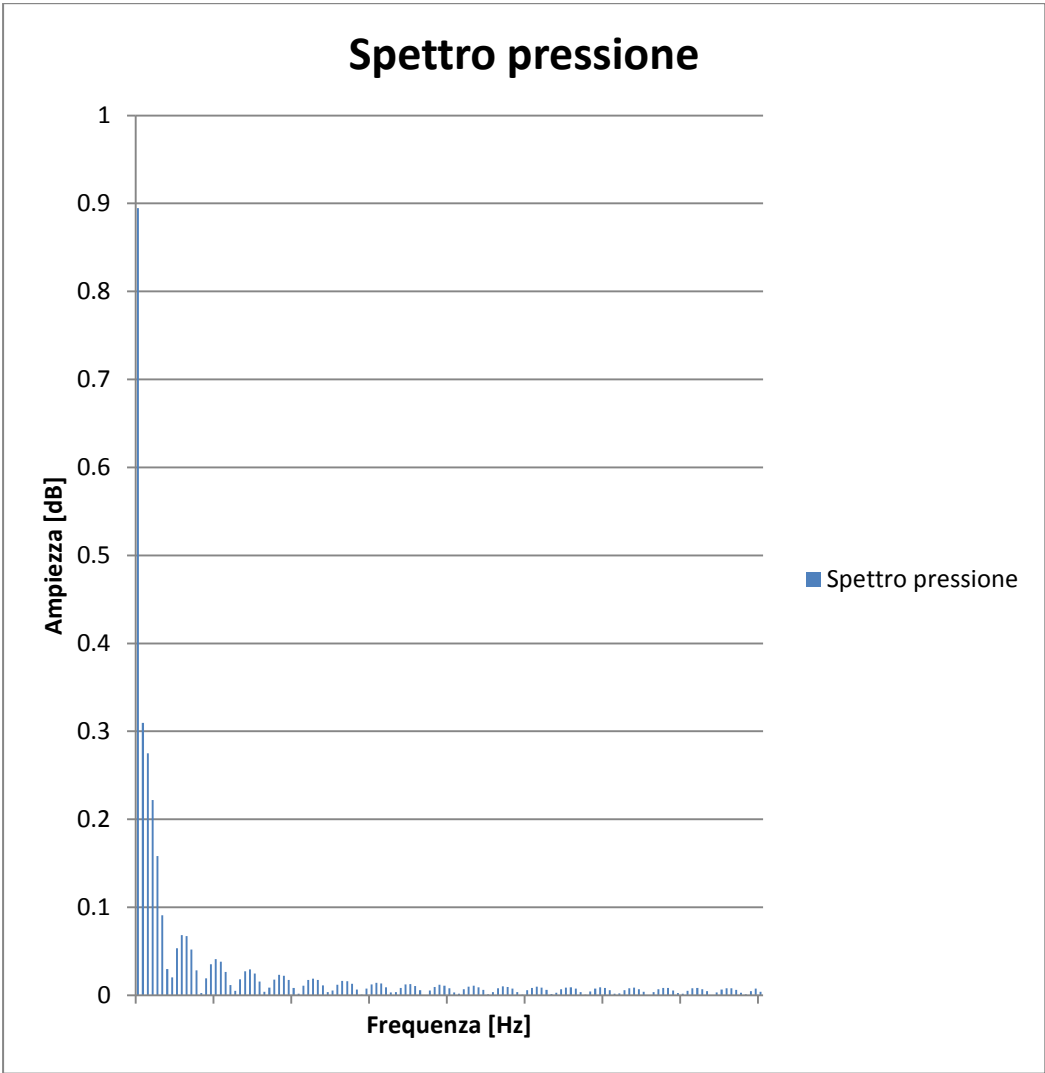


Figura 10 Spettro pressione per PHP a 80W



PHP a 90W

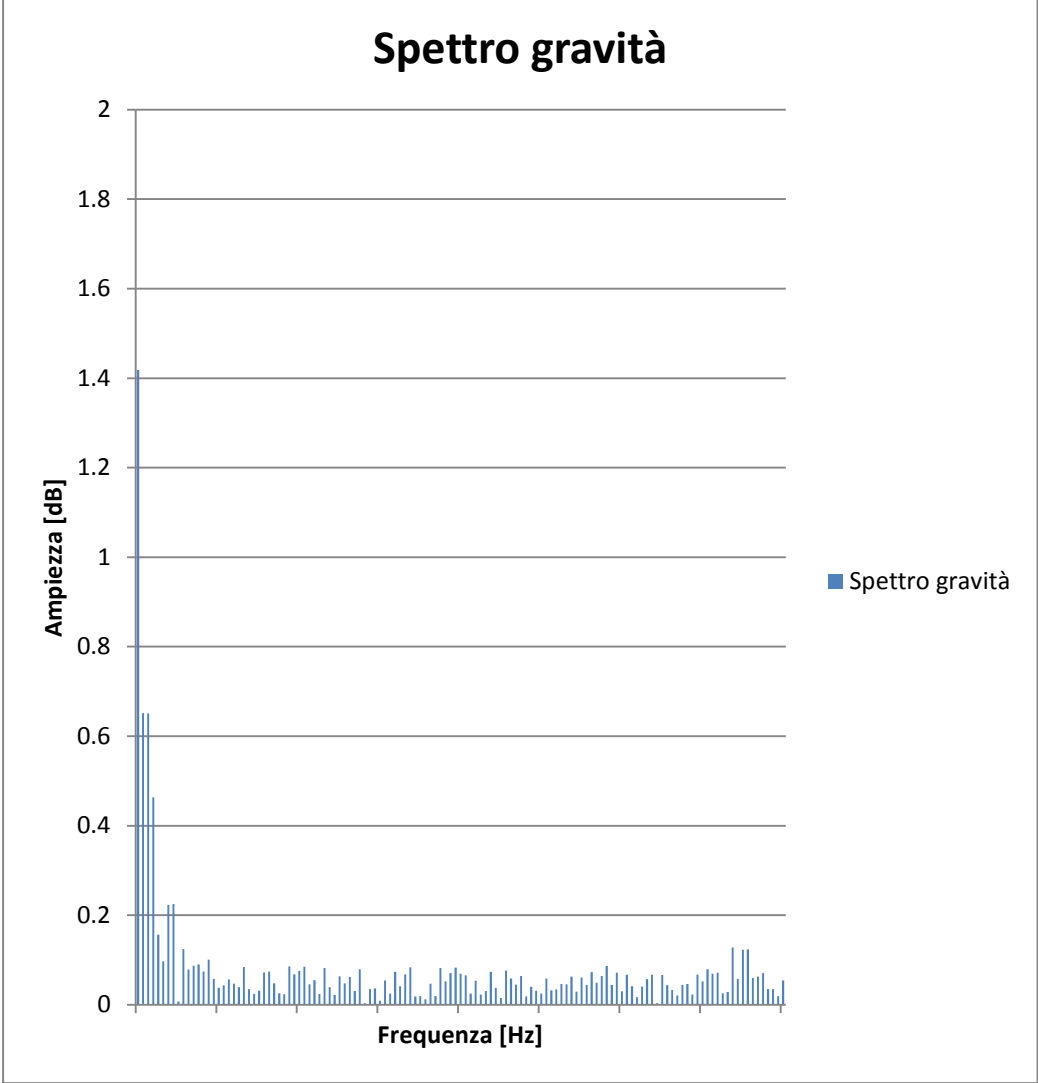


Figura 11 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 90W

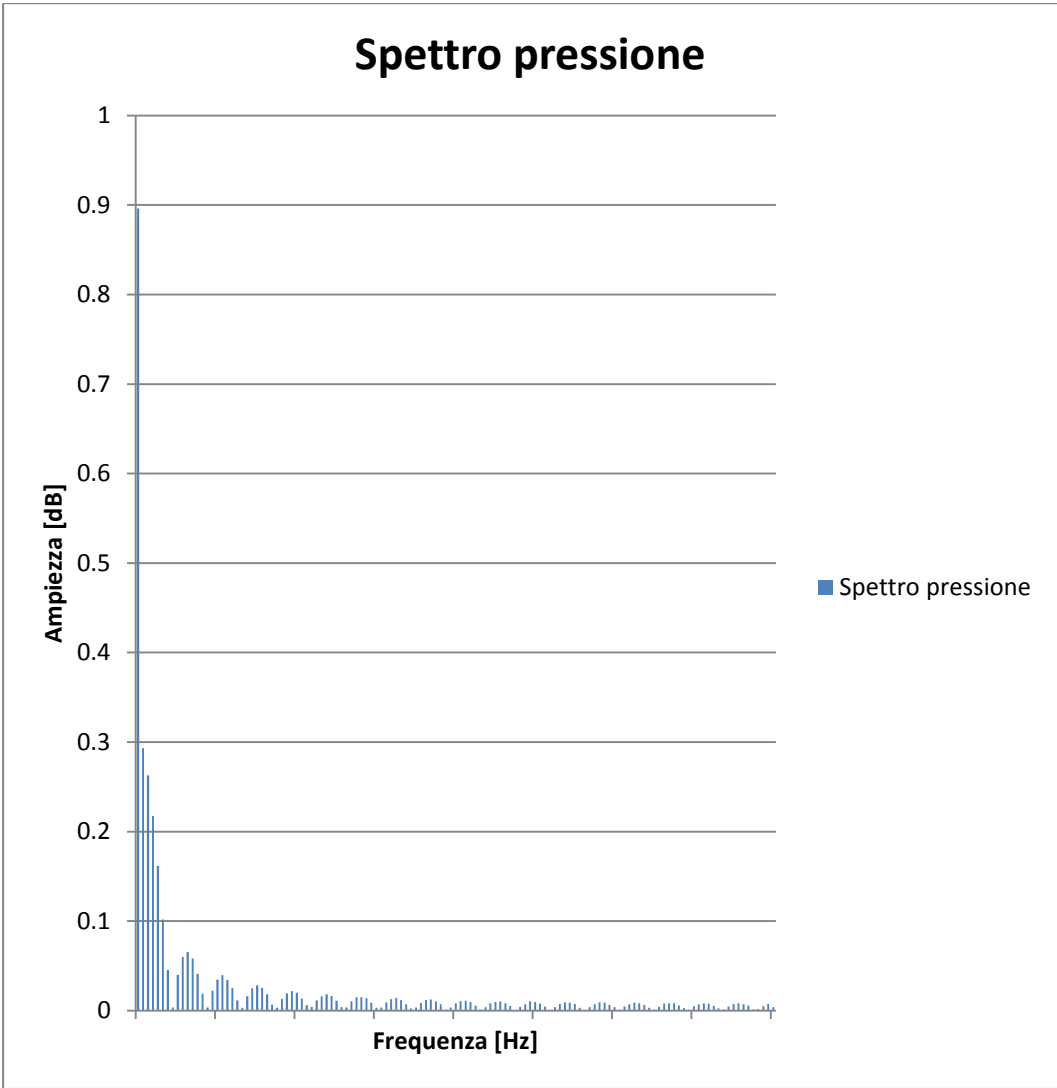


Figura 12 Spettro pressione per PHP a 80W

PHP orizzontale

PHP a 50W

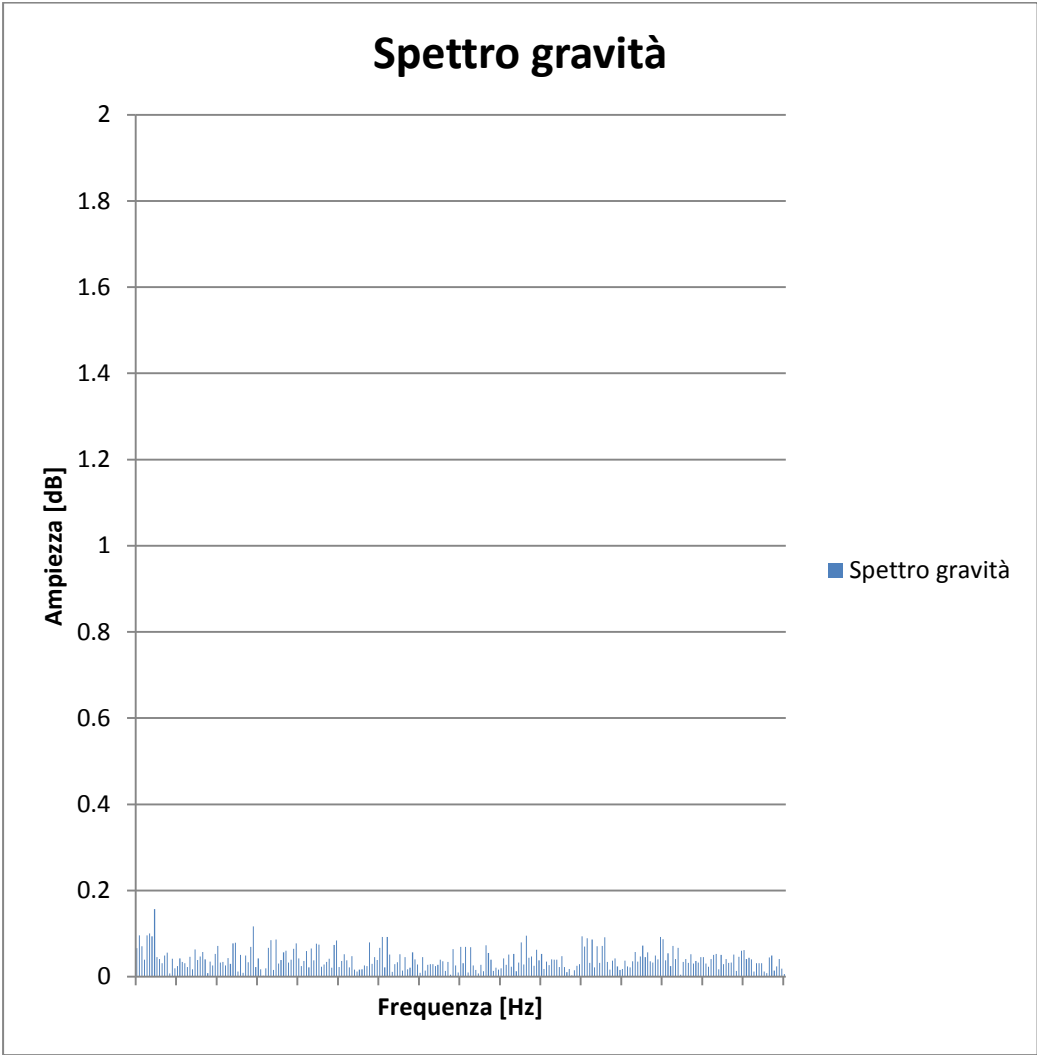


Figura 13 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 50W

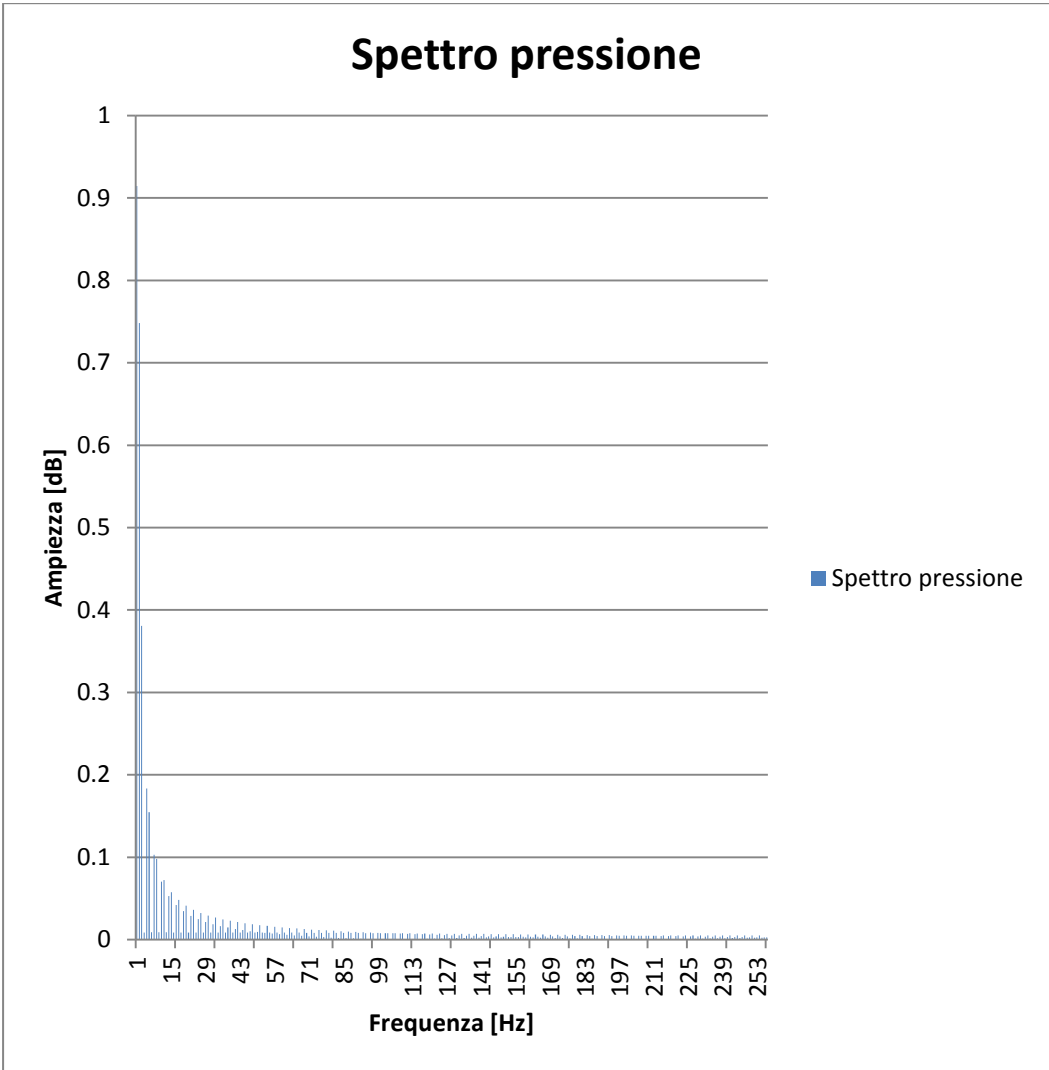


Figura 14 Spettro pressione per PHP a 50W

**PHP a 60W**

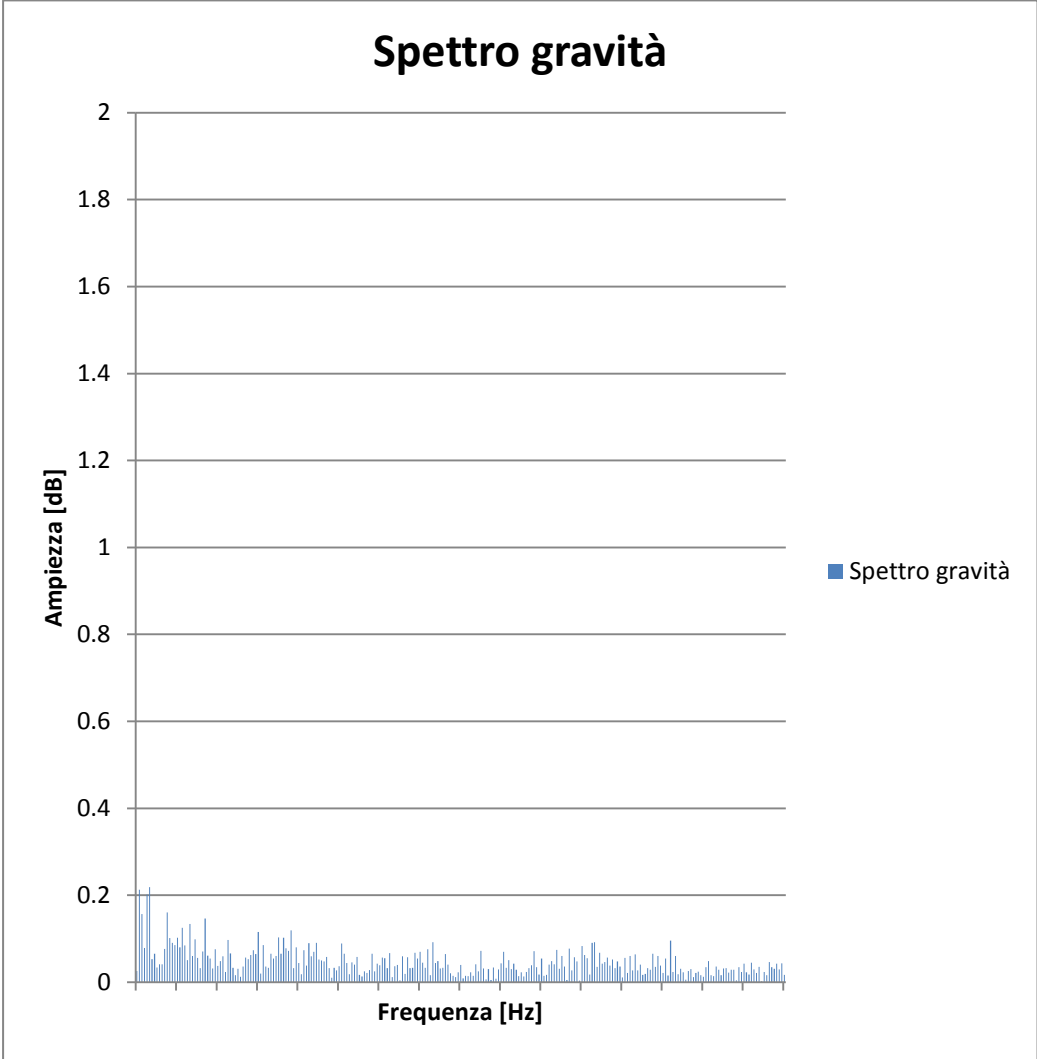


Figura 15 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 60W

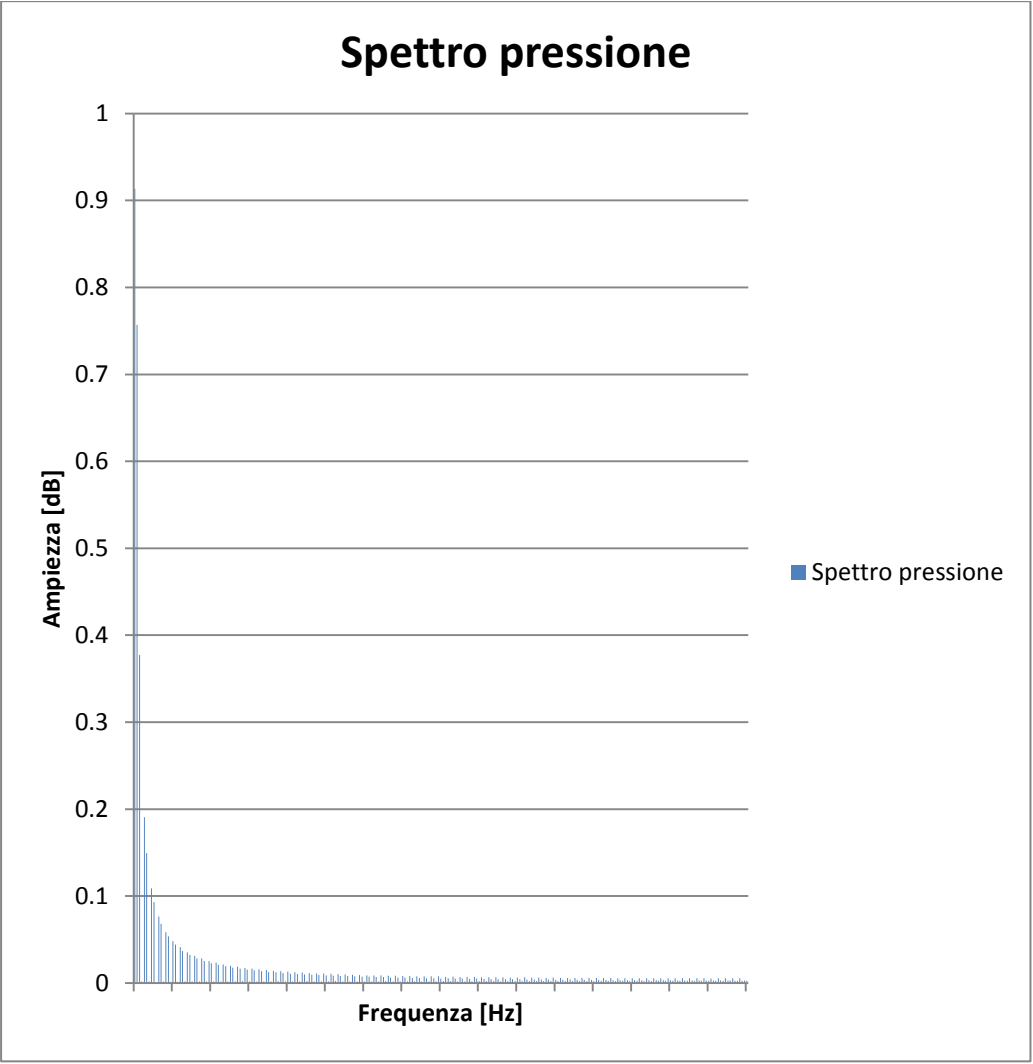


Figura 16 Spettro pressione per PHP a 60W

**PHP a 70W**

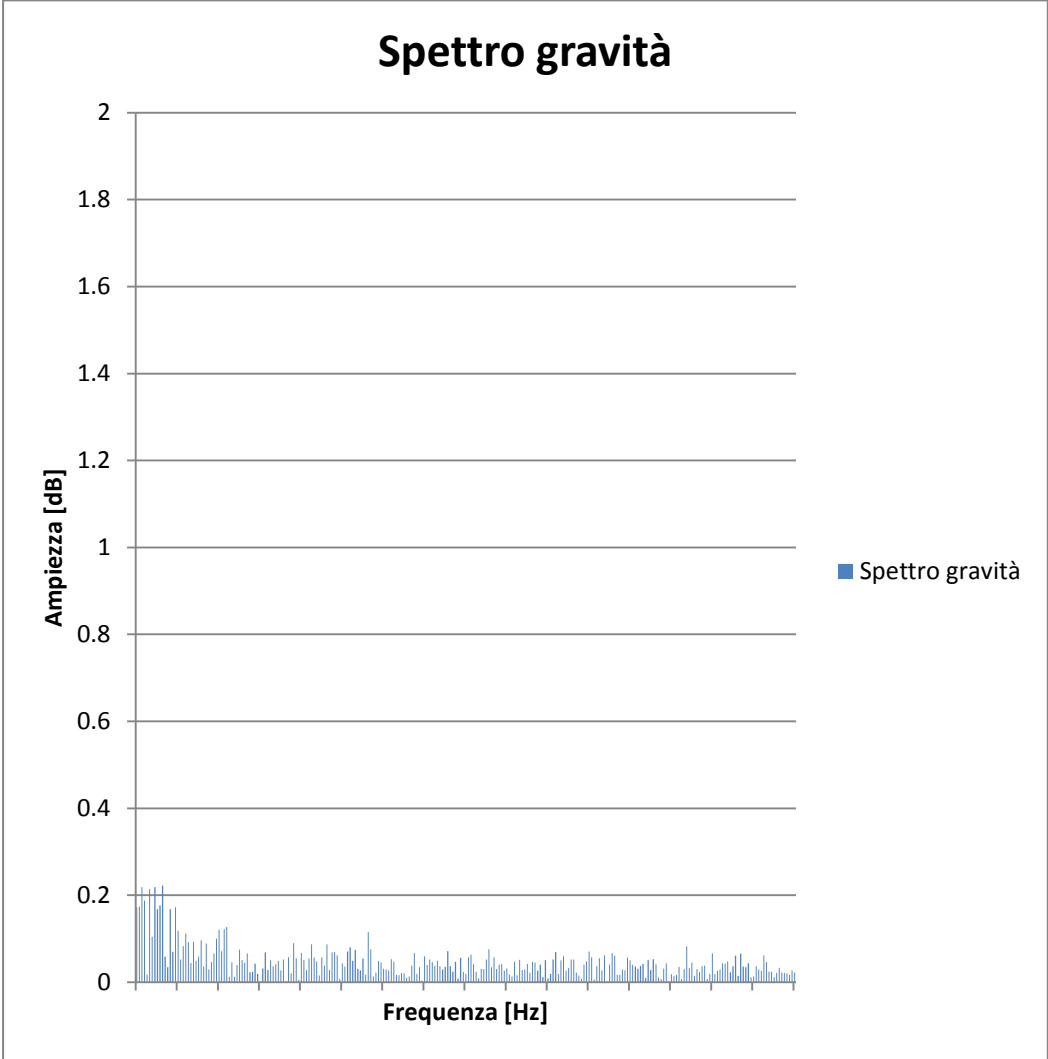


Figura 17 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 70W

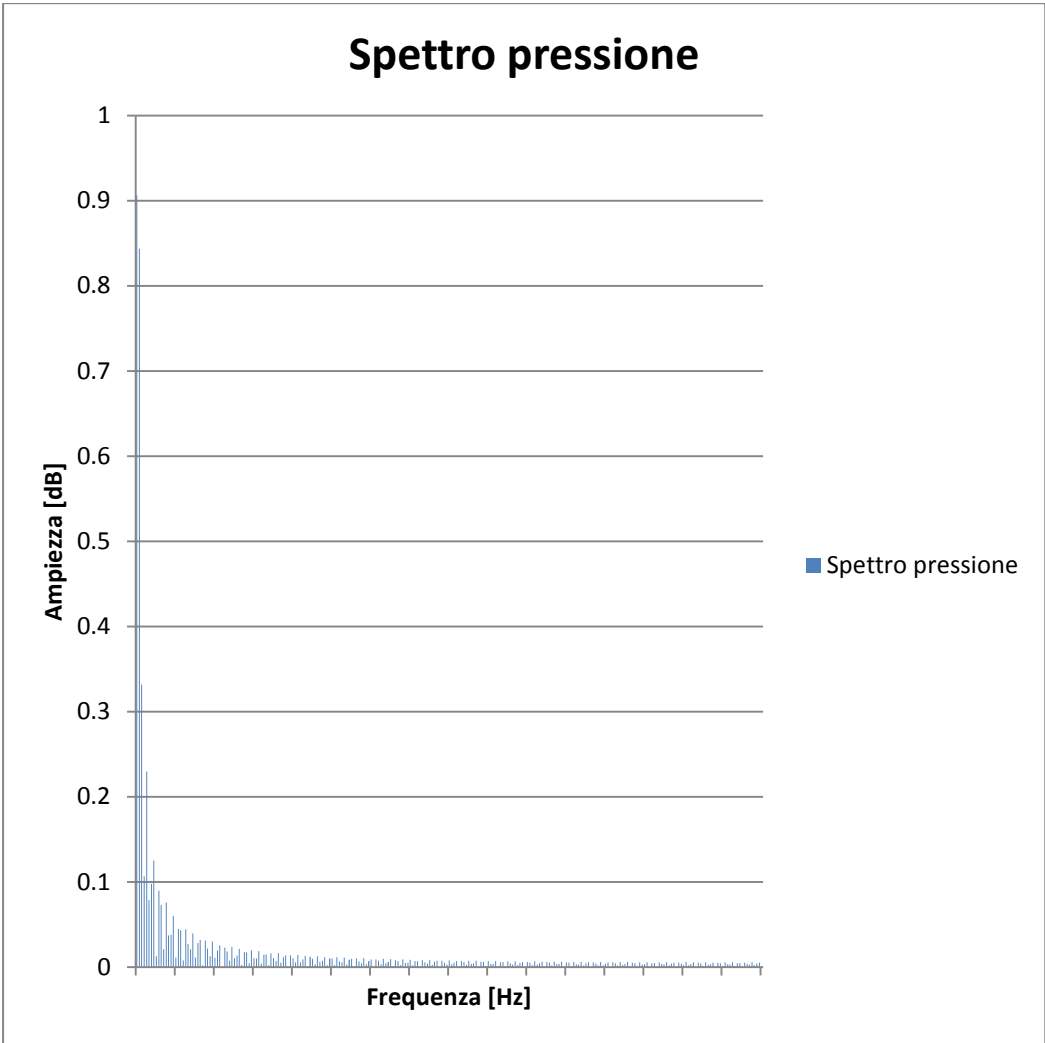


Figura 18 Spettro pressione per PHP a 70W



**PHP a 80W**

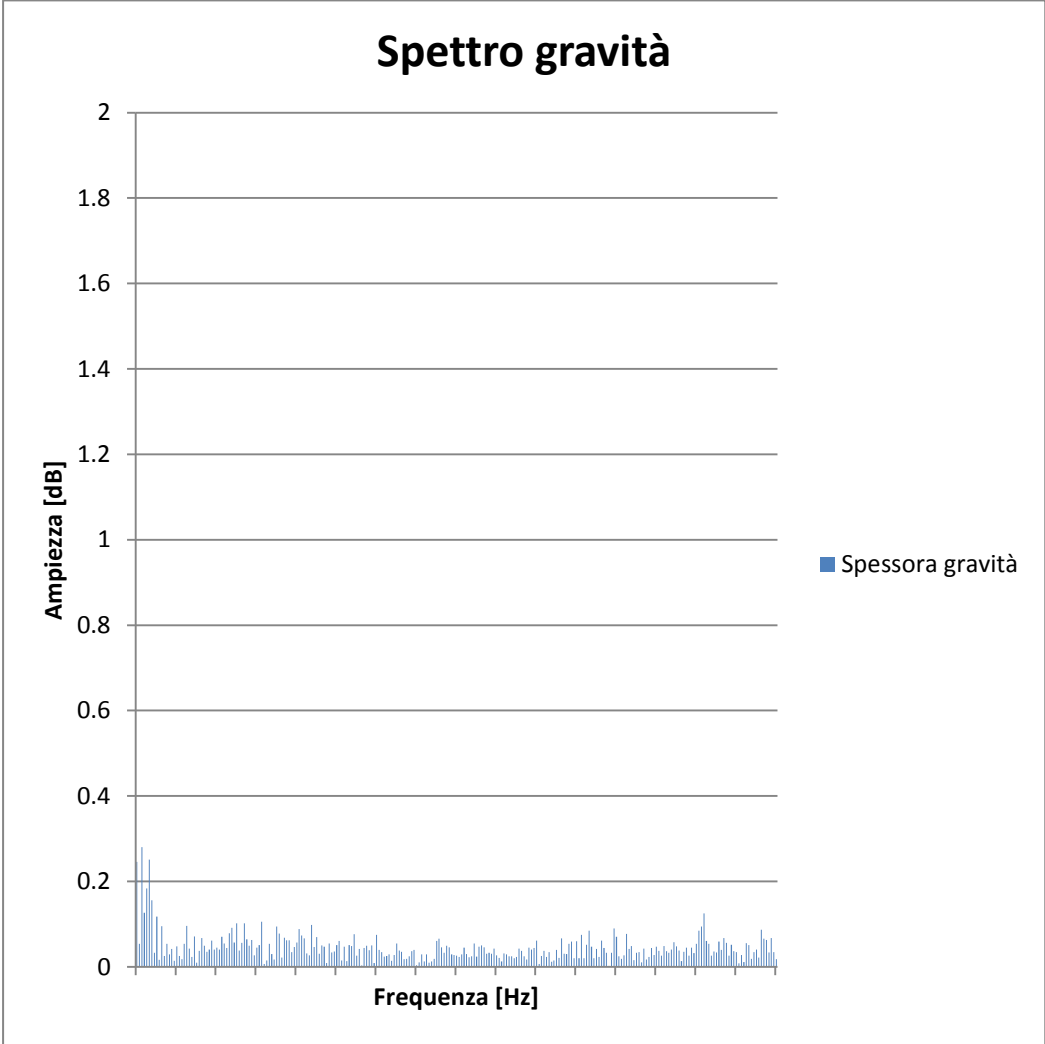


Figura 19 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 80W

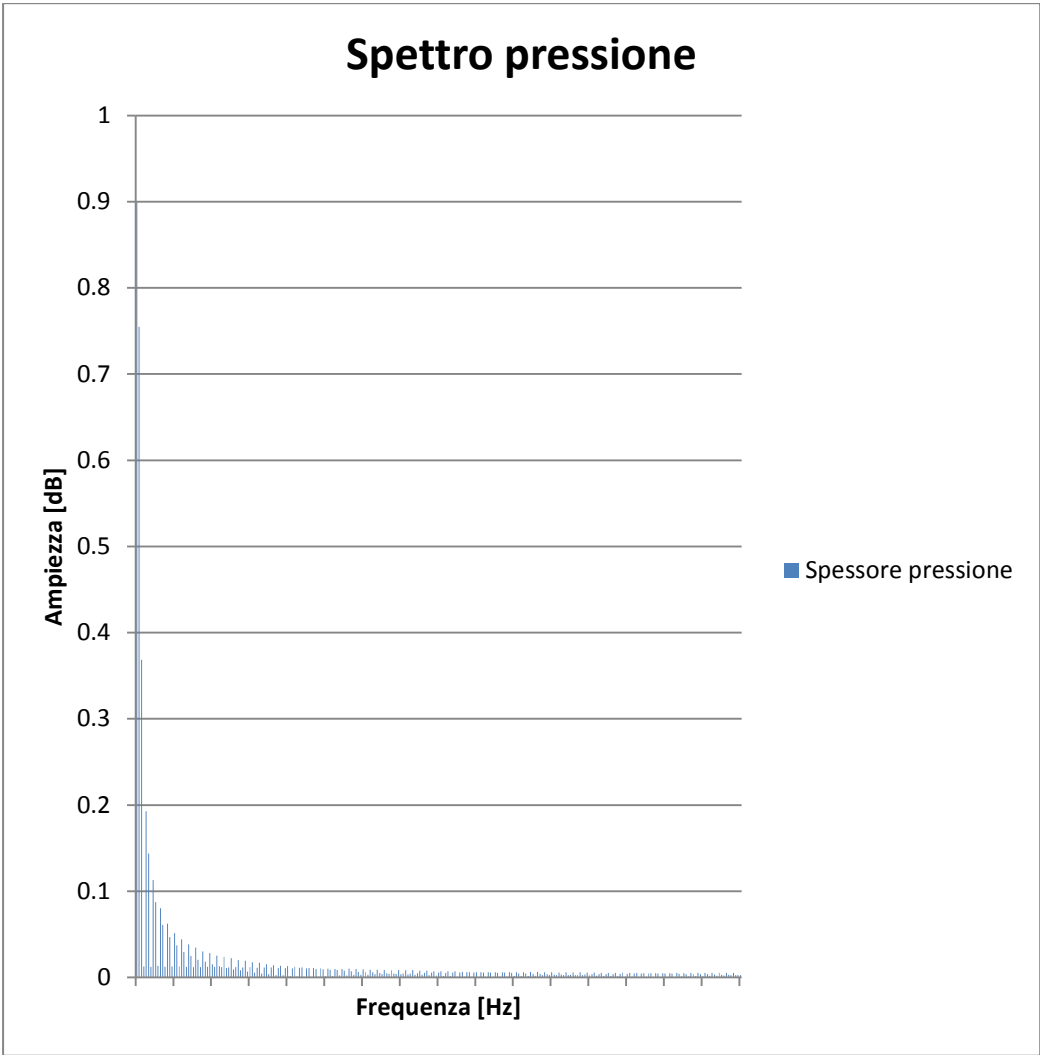


Figura 20 Spettro pressione per PHP a 80W

**PHP a 90W**

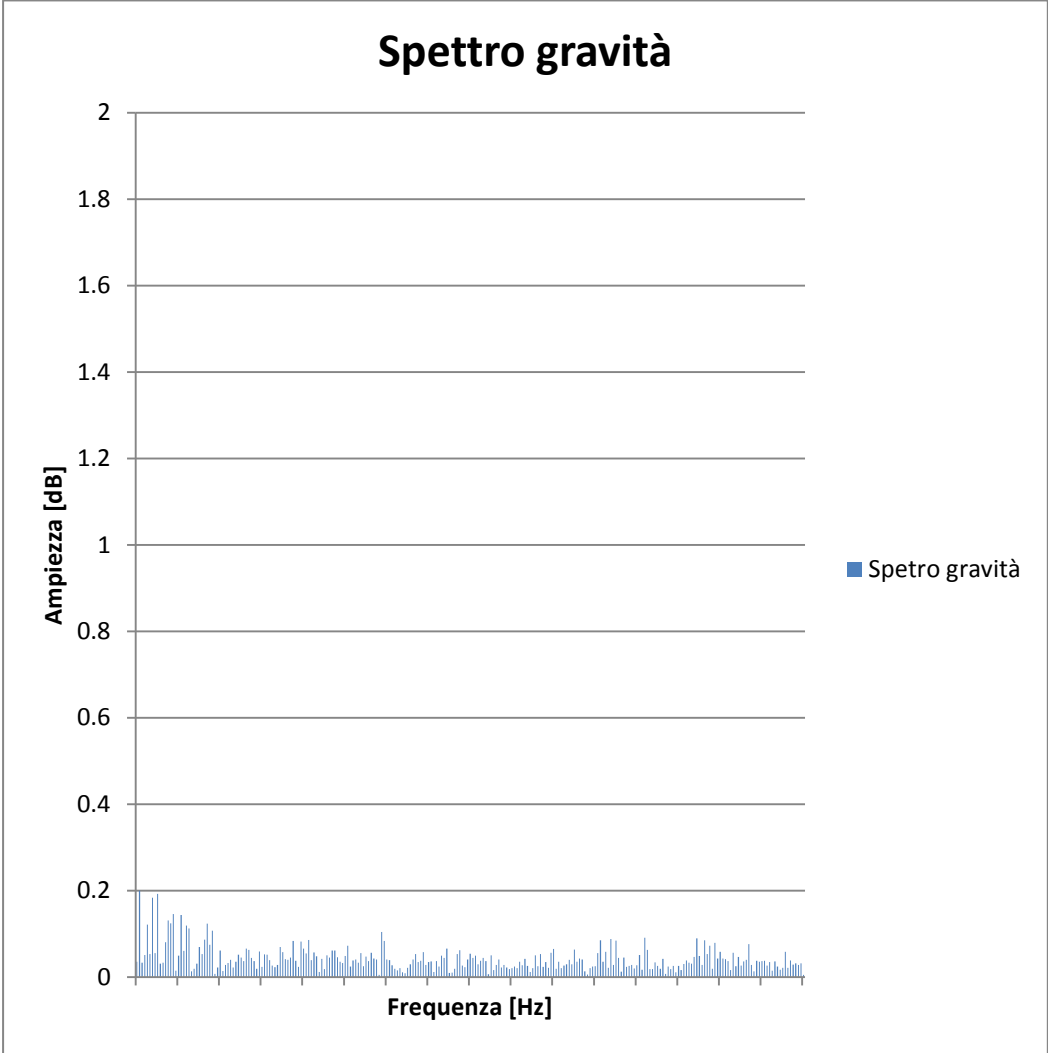


Figura 21 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 90W

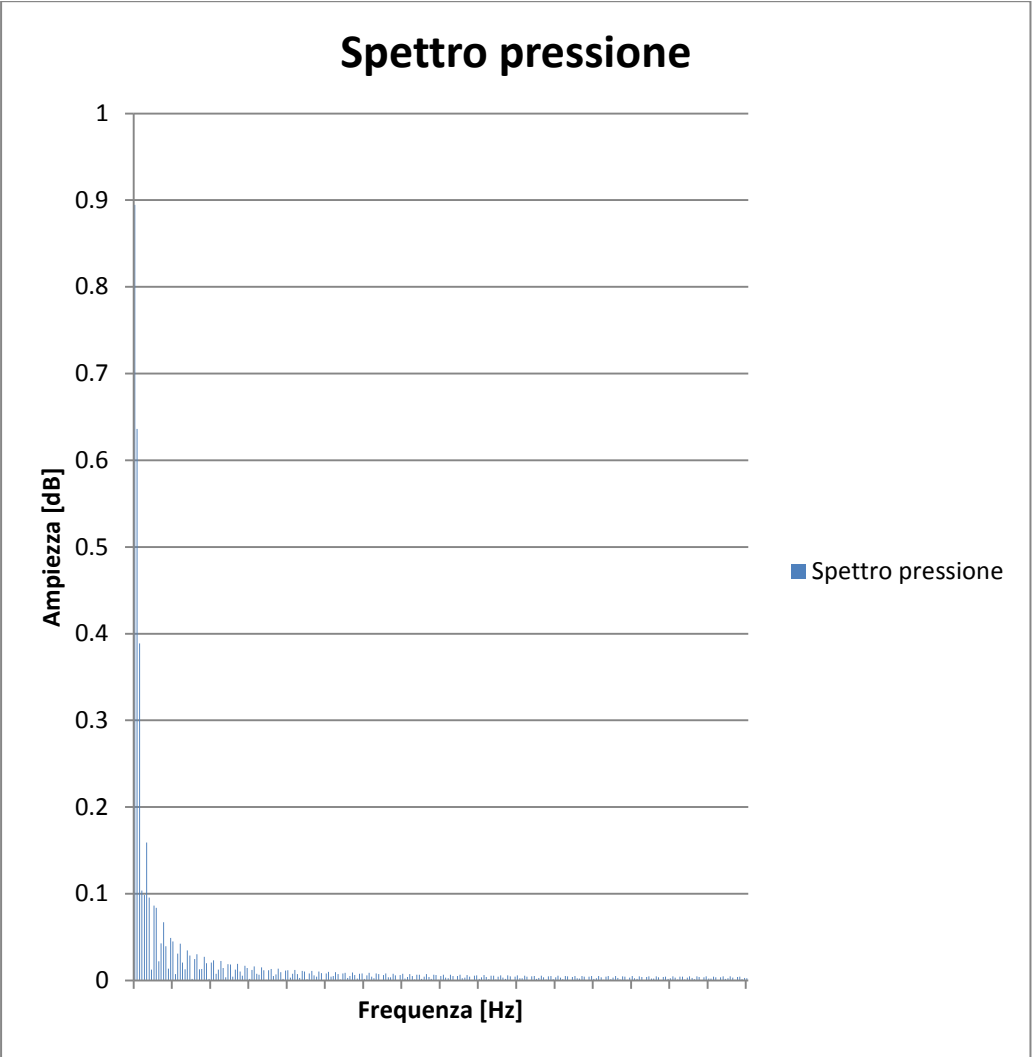
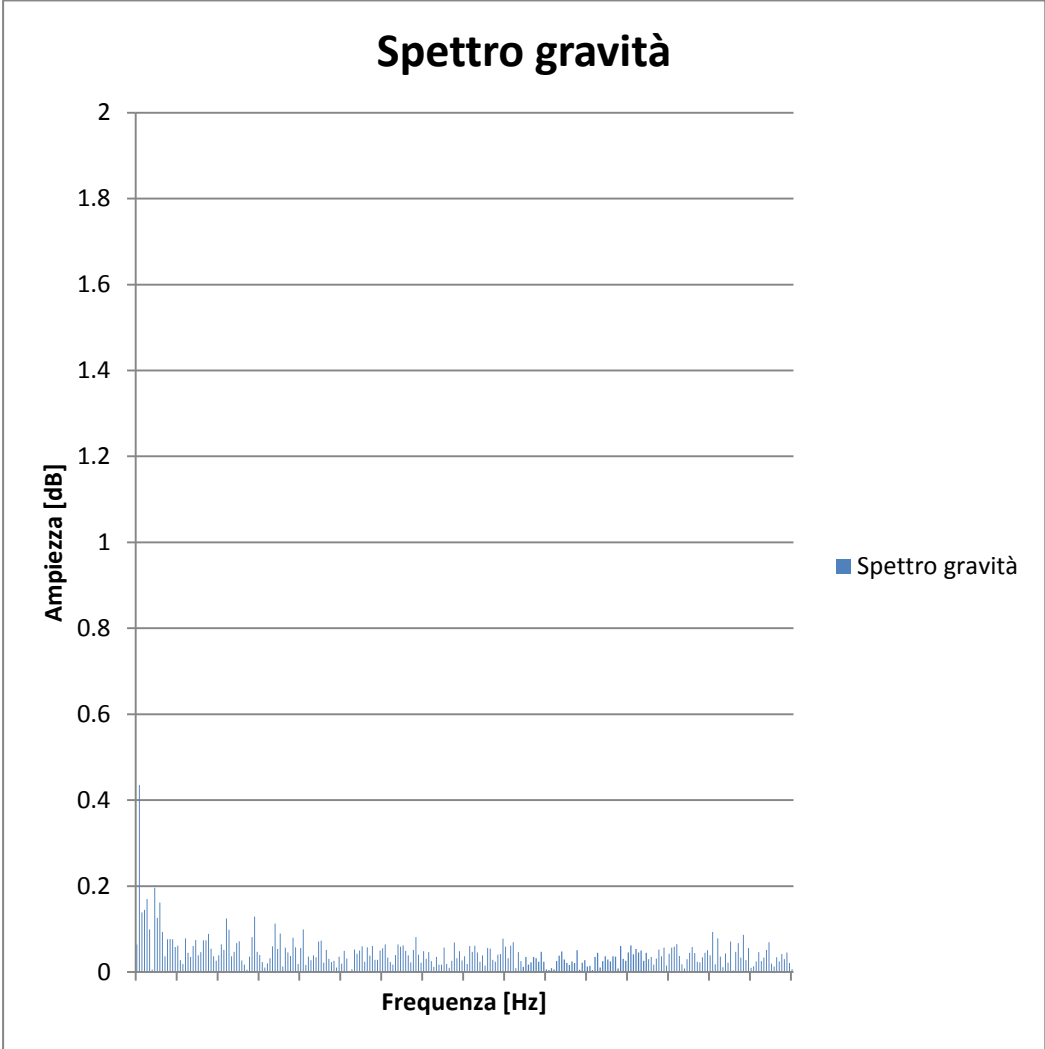


Figura 22 Spettro pressione per PHP a 90W

**PHP a 100W**



**Figura 23 Spettro accelerazione di gravità per PHP a 100W**

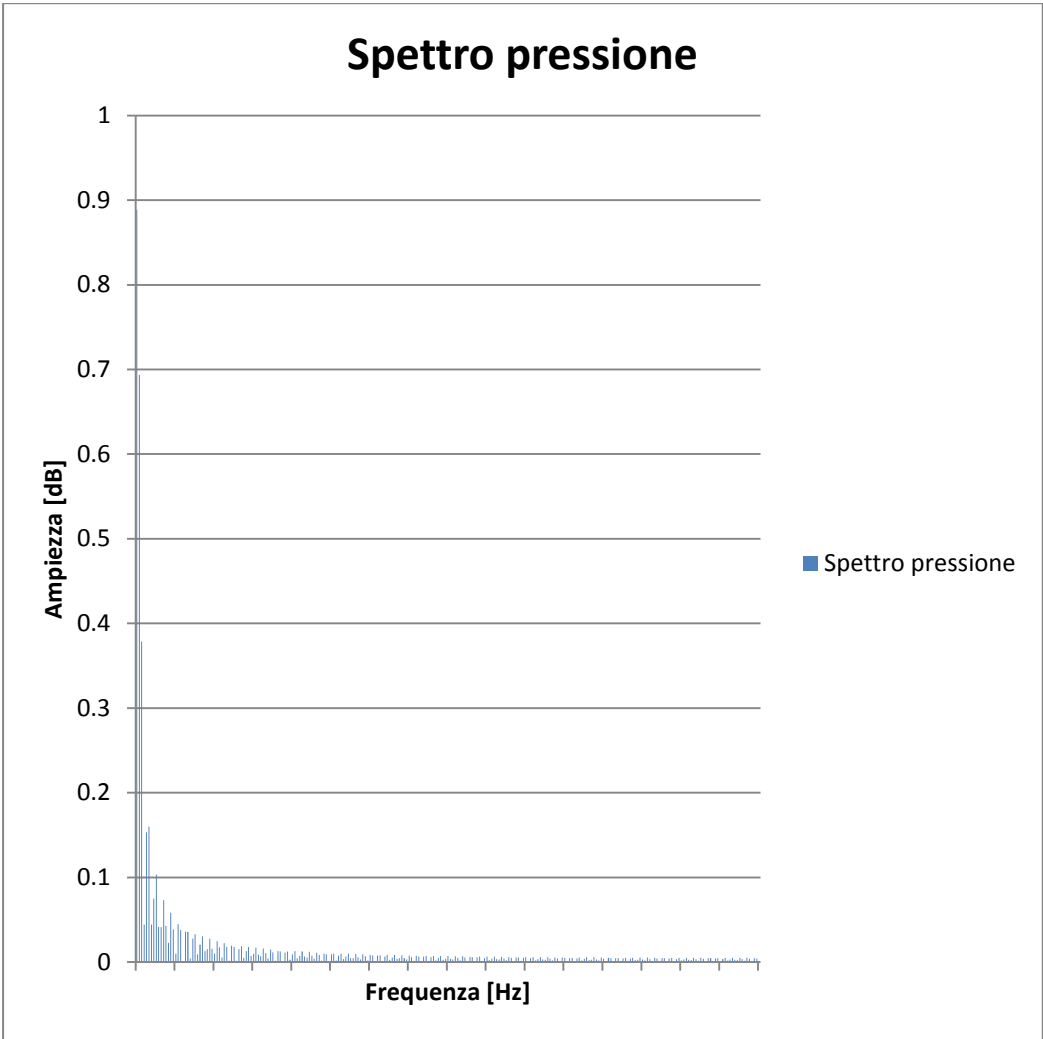


Figura 24 Spettro pressione per PHP a 100W

## Appendice G (PHP verticale Q up, 70%)

Primo giorno di volo parabolico con PHP verticale e potenza termica in salita

PHP verticale a 60W

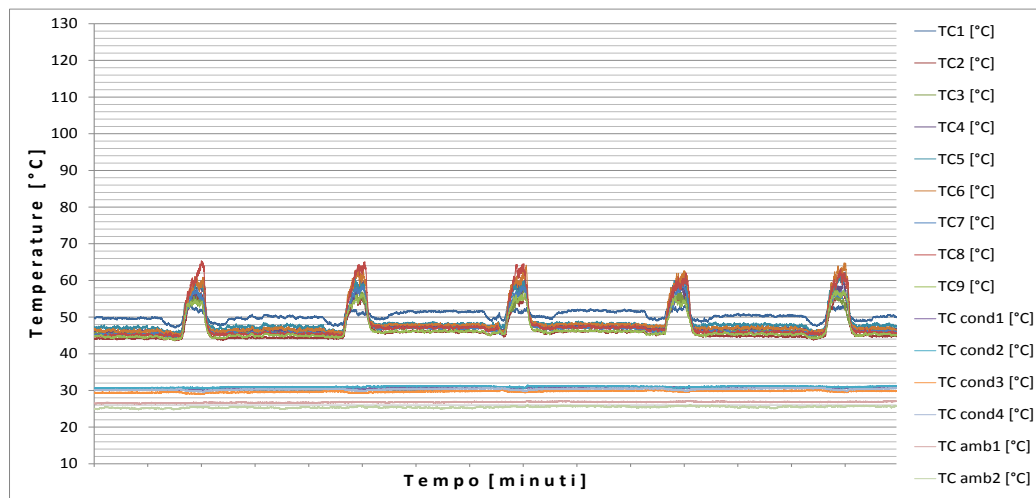


Figura 1 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 60W

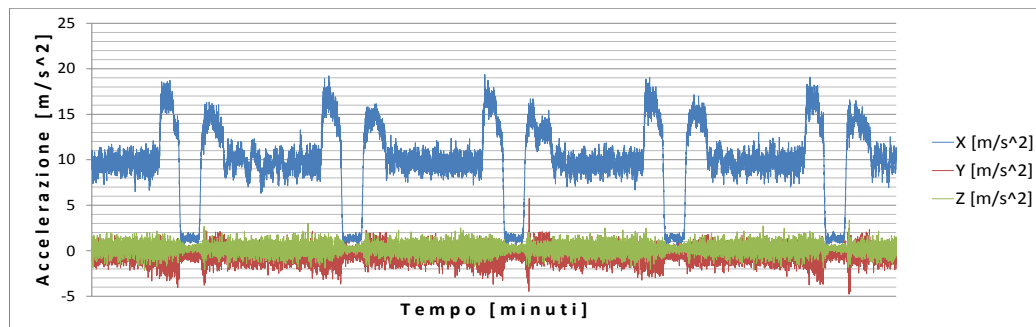


Figura 2 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

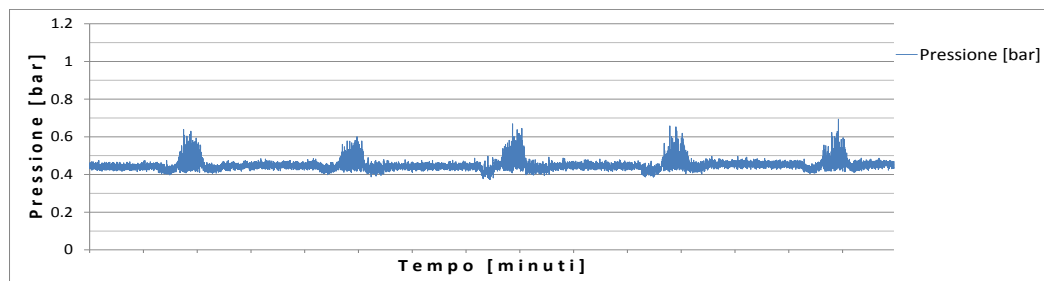
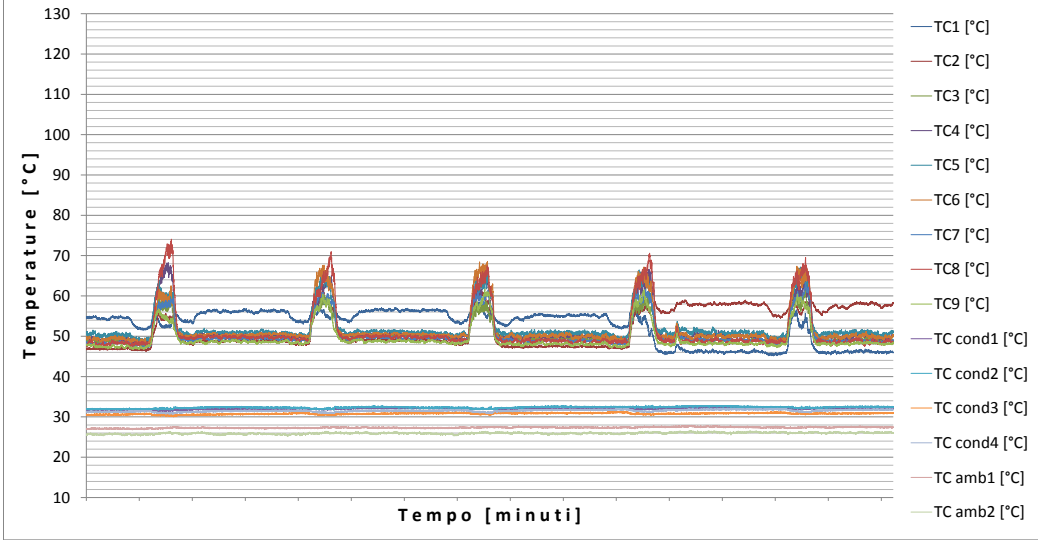
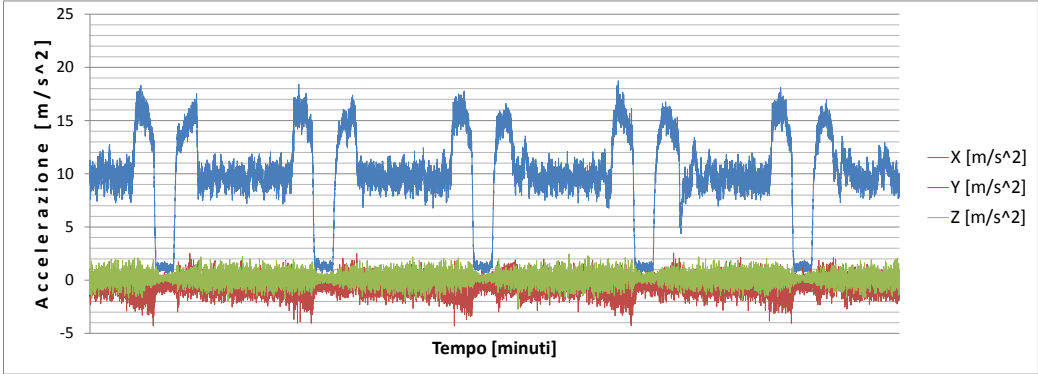


Figura 3 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 60W

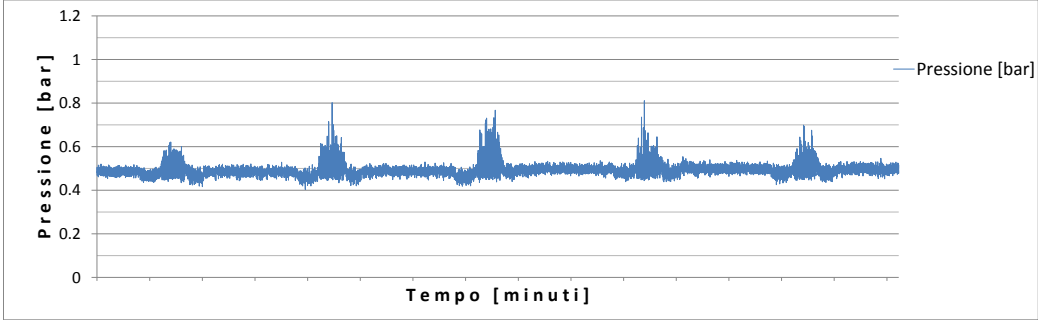
**PHP verticale a 70W**



**Figura 4 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 70W**



**Figura 5 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo**



**Figura 6 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 70W**



## PHP verticale a 90W

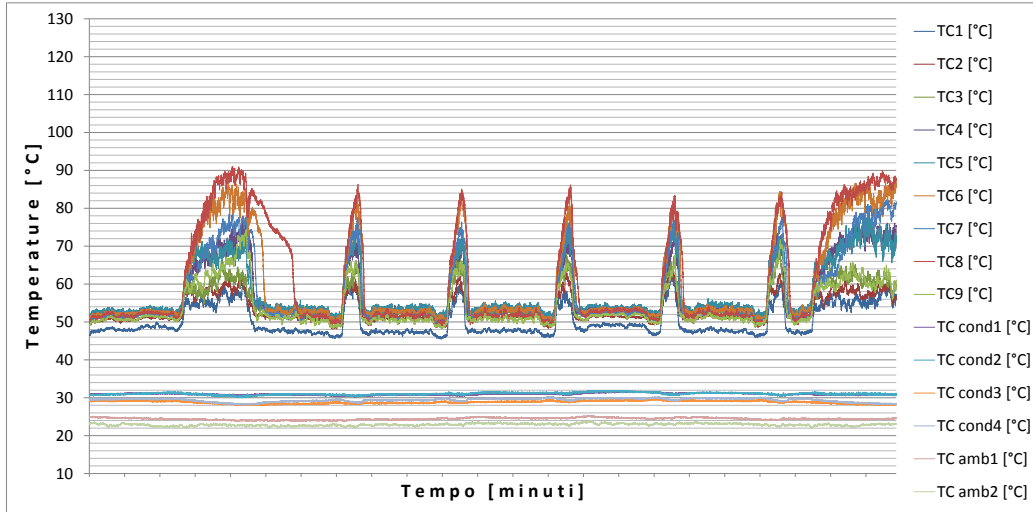


Figura 7 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 90W

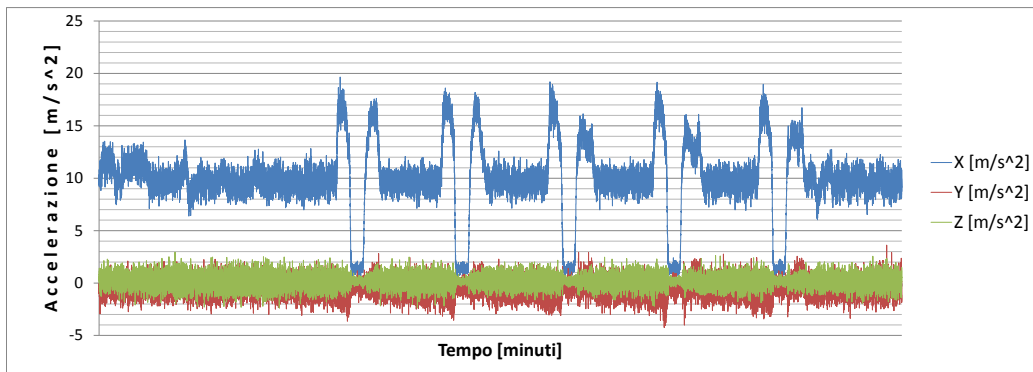


Figura 8 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

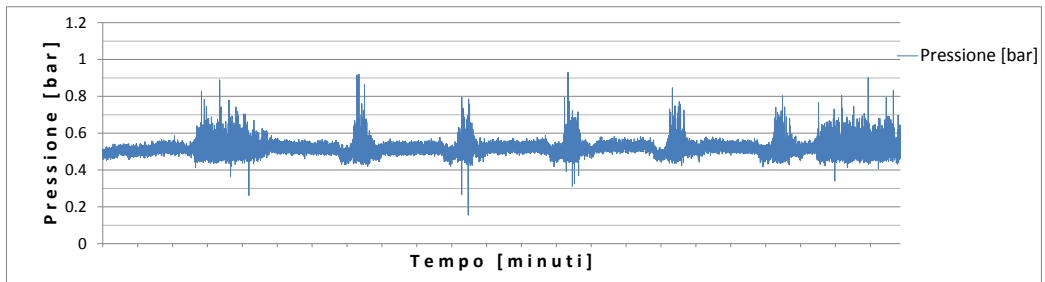


Figura 9 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 90W



## Appendice H (PHP verticale Q down, 70%)

Secondo giorno di volo parabolico, PHP verticale con potenza termica in discesa

PHP verticale a 80W

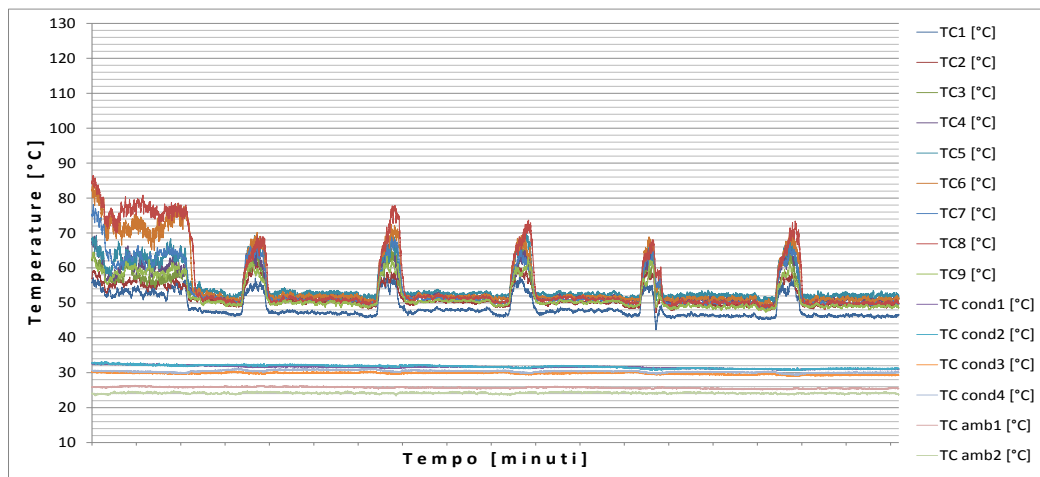


Figura 1 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 80W

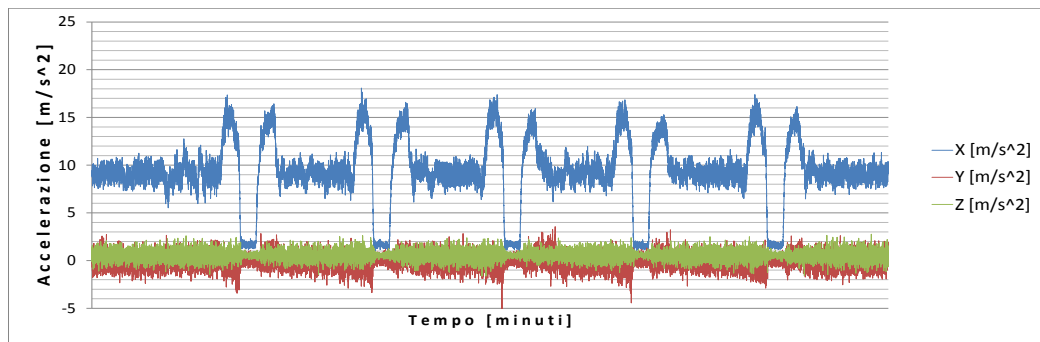


Figura 2 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

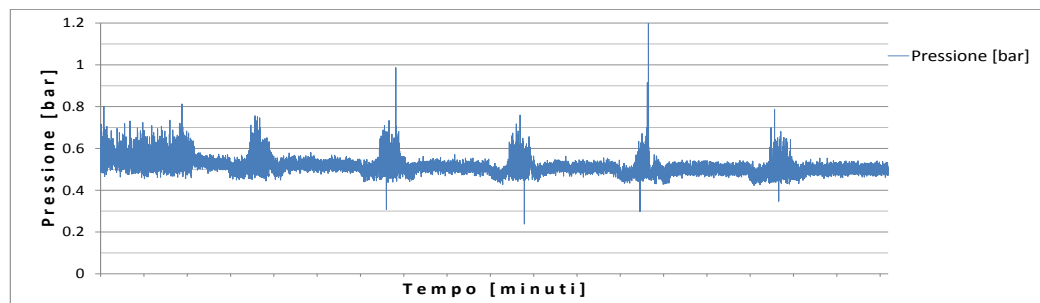


Figura 3 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 80W

## PHP verticale a 70W

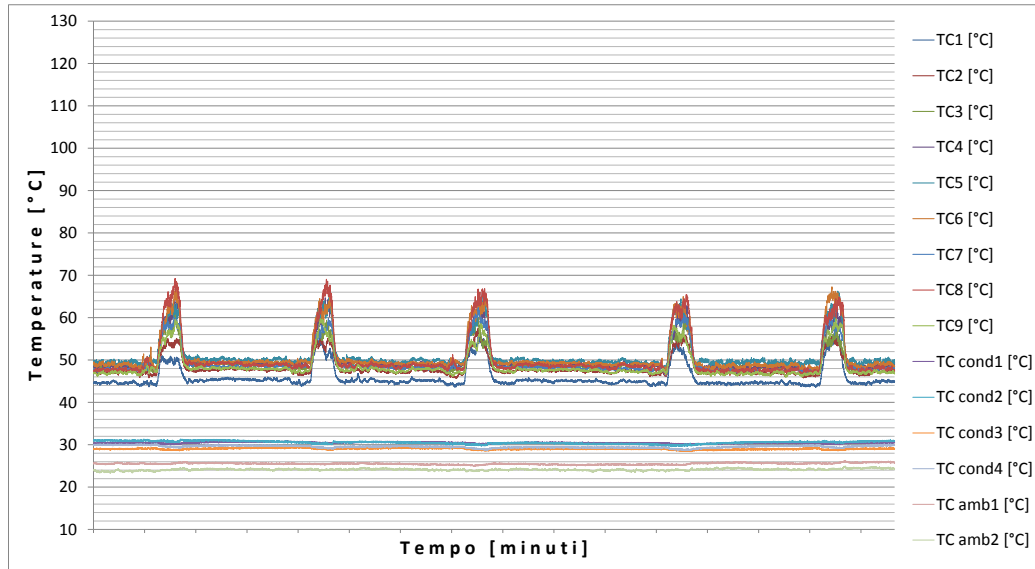


Figura 4 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 70W

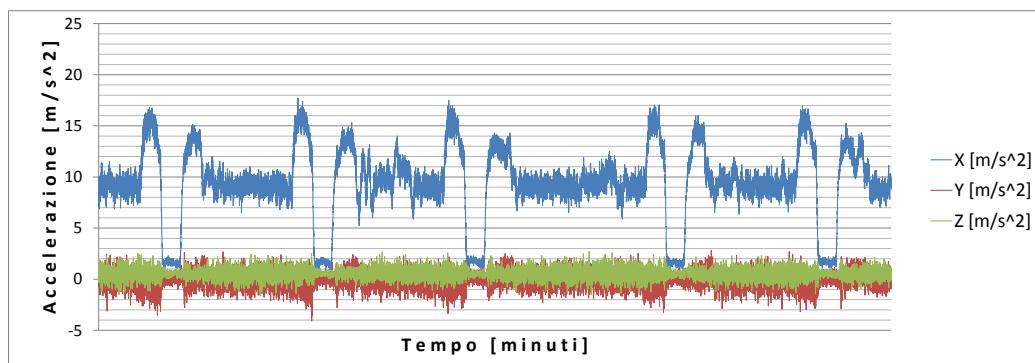


Figura 5 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

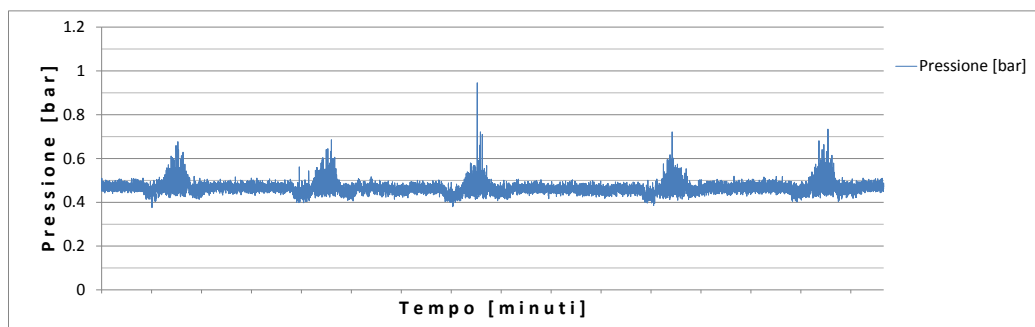


Figura 6 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 70W

## PHP verticale a 60W

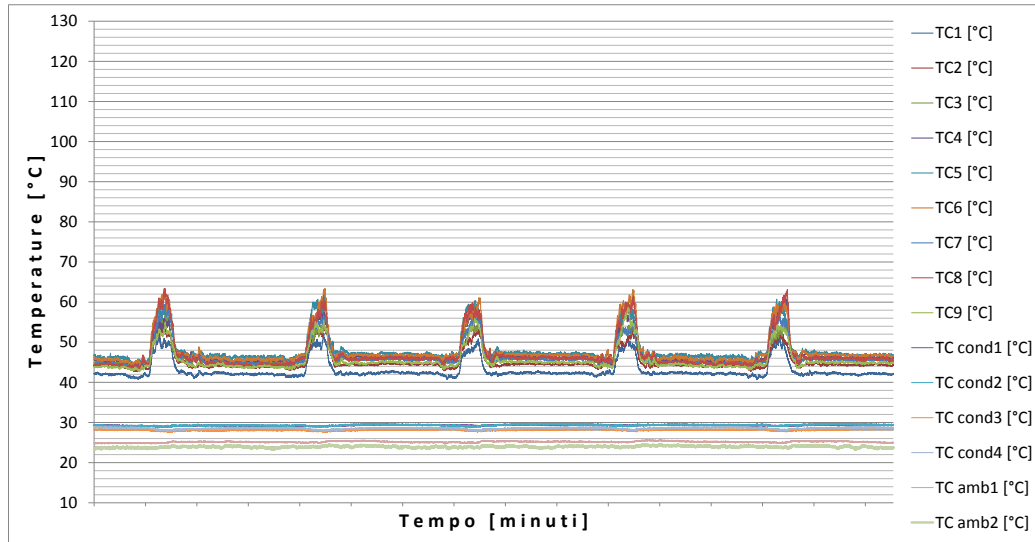


Figura 7 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 60W

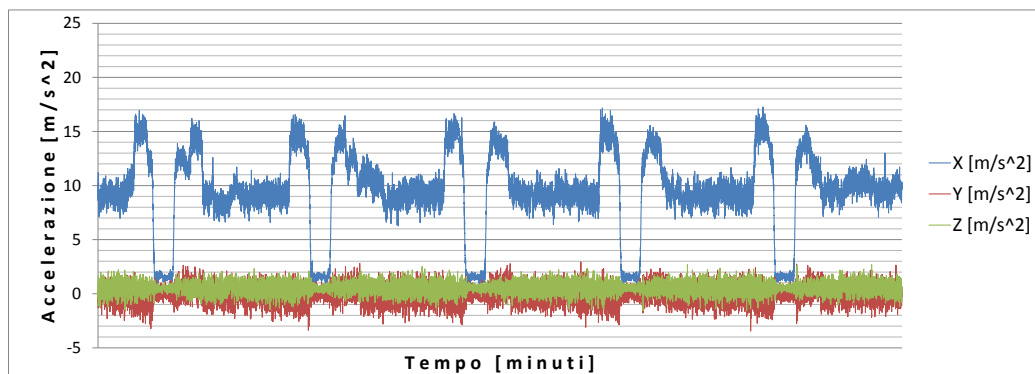


Figura 8 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

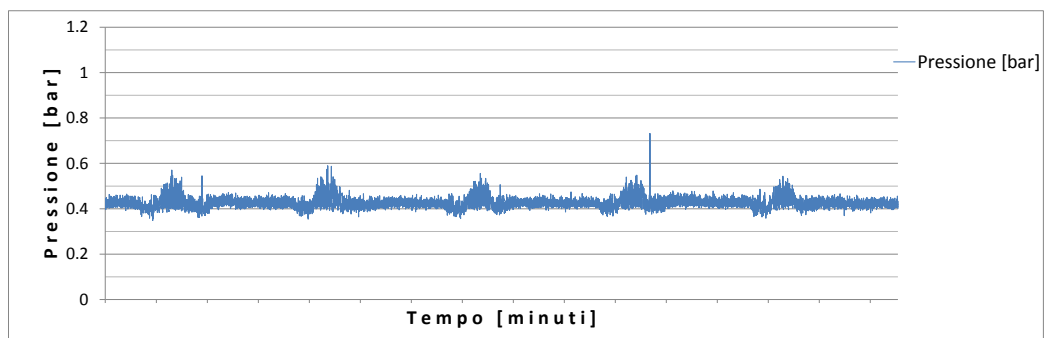


Figura 9 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 60W

### PHP verticale a 50W

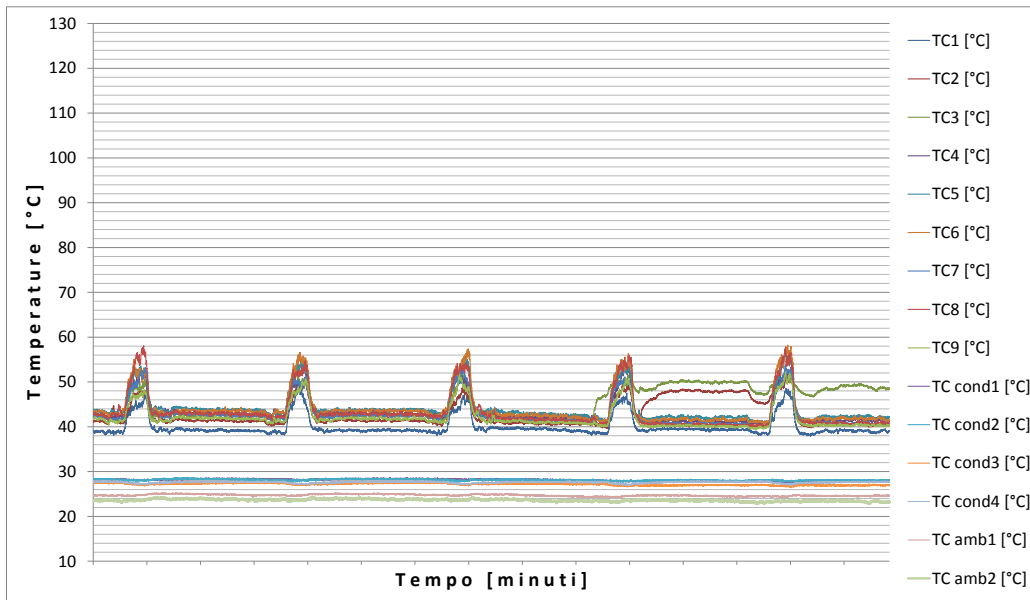


Figura 10 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 50W

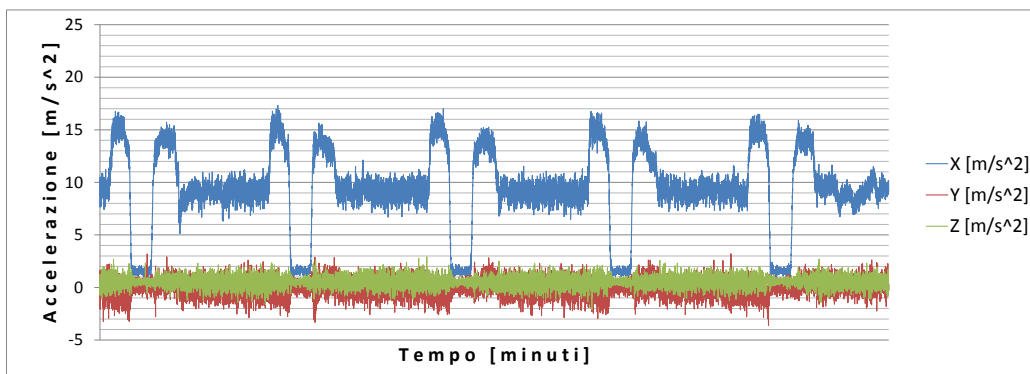


Figura 11 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

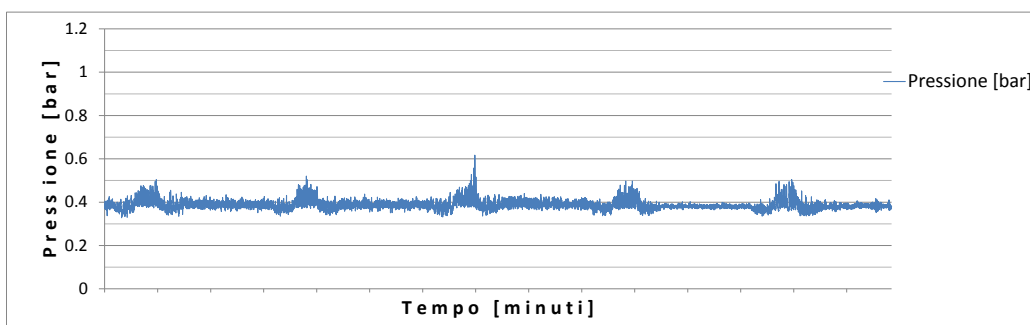


Figura 12 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 50W

## Appendice I (PHP verticale varie potenze, 70%)

PHP verticale con potenze in ordine sparso

PHP verticale a 70W

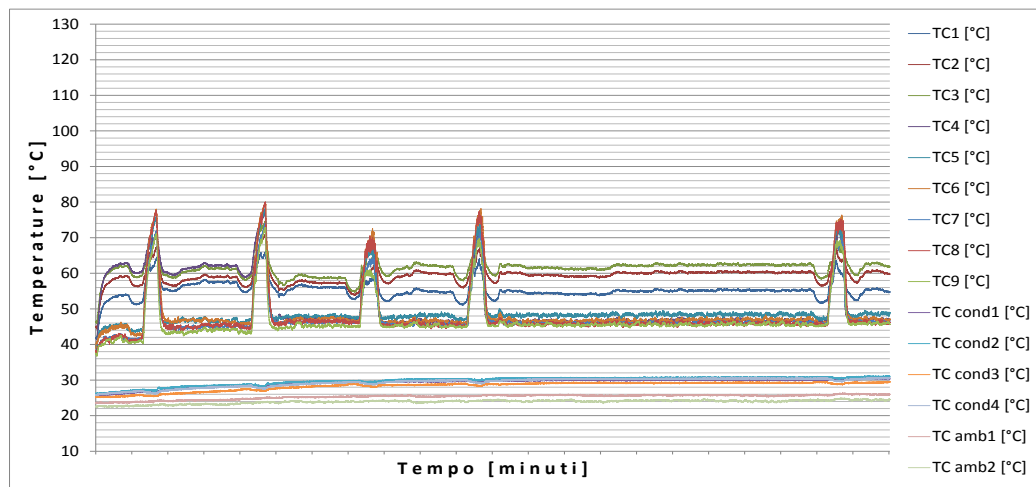


Figura 1 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 70W

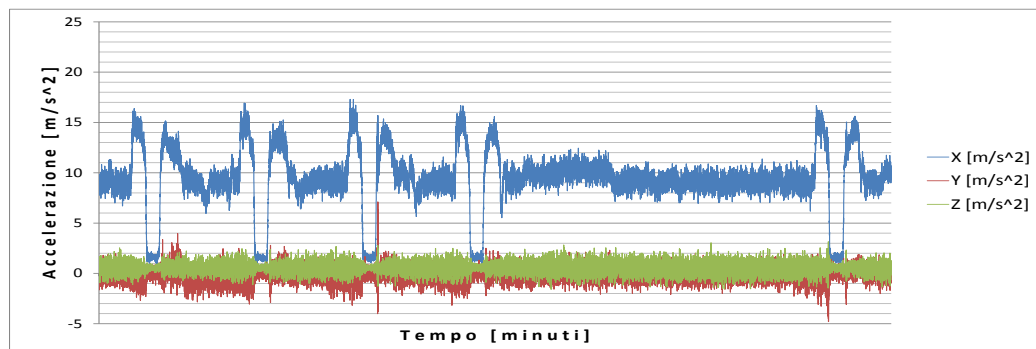


Figura 2 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

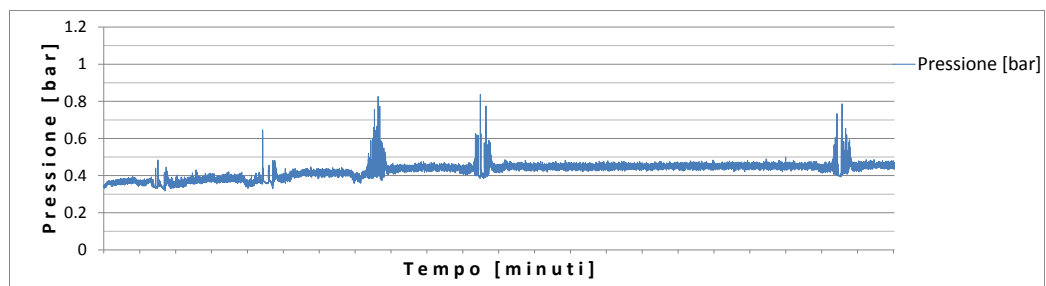


Figura 3 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 70W

## PHP verticale a 100W

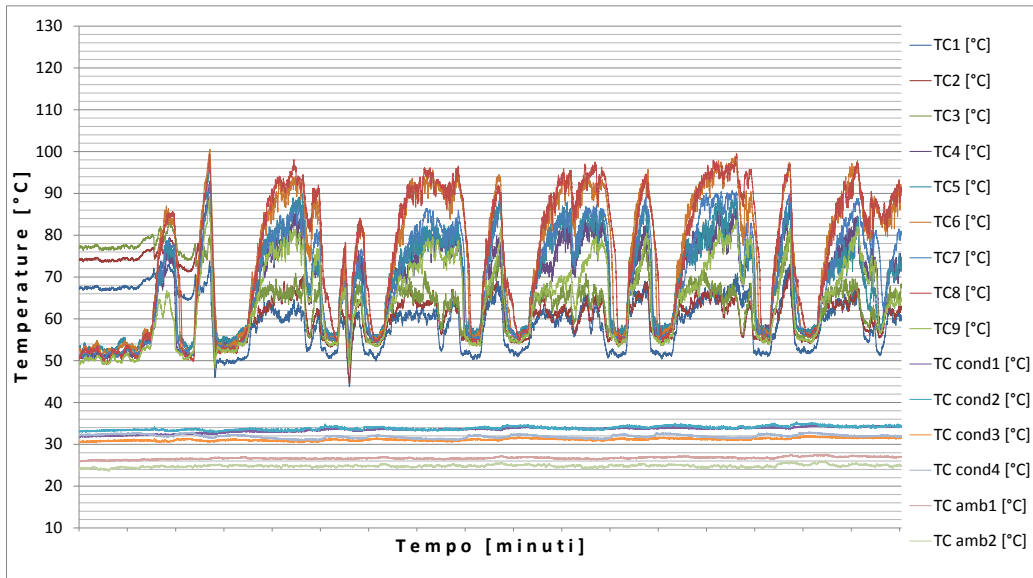


Figura 4 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 100W

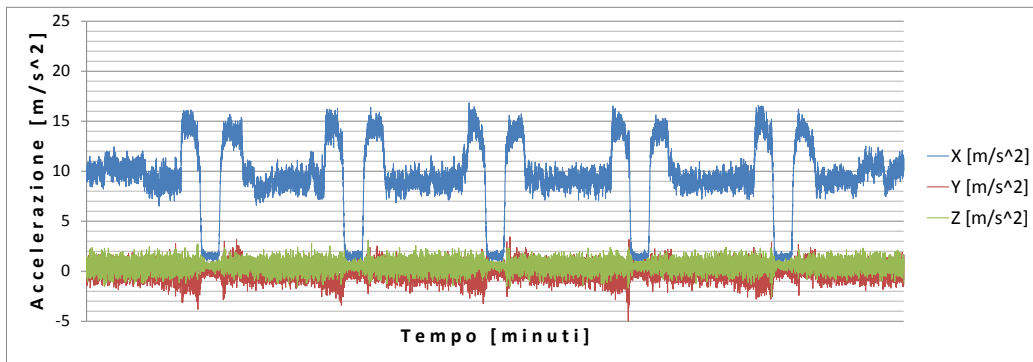


Figura 5 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

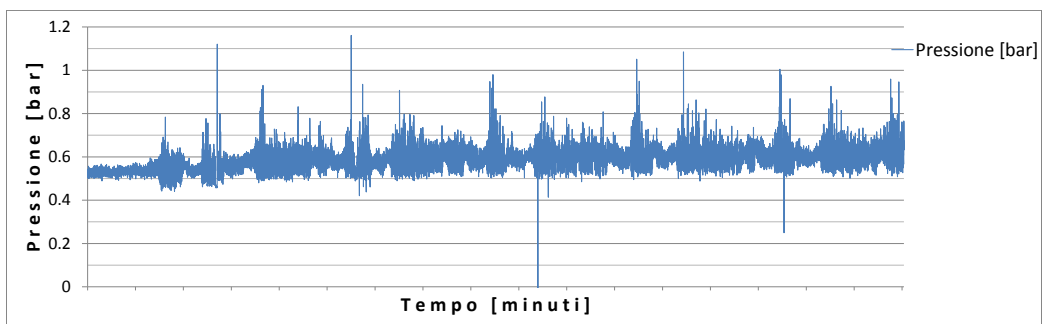


Figura 6 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 100W



## PHP verticale a 70W

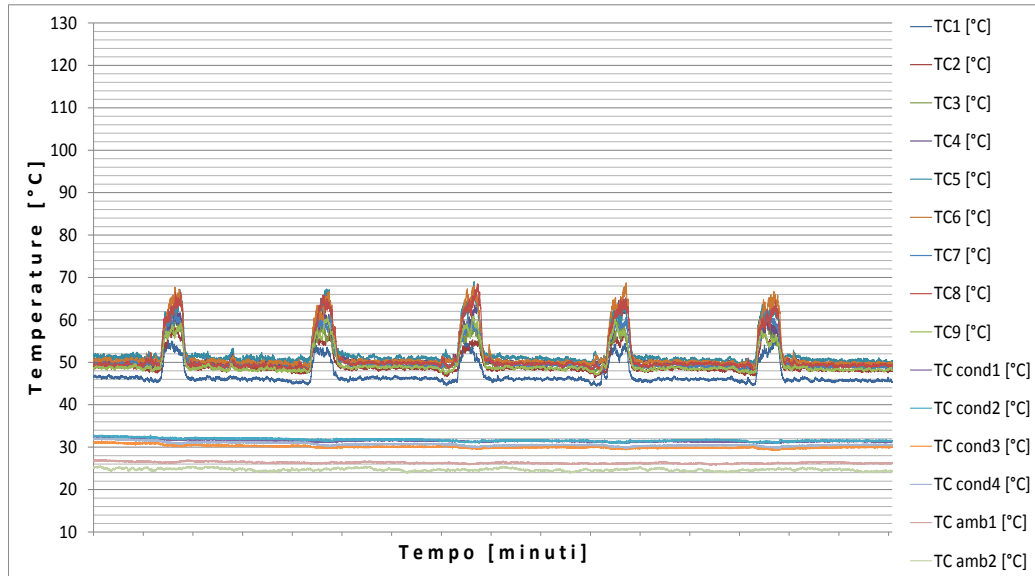


Figura 7 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 70W

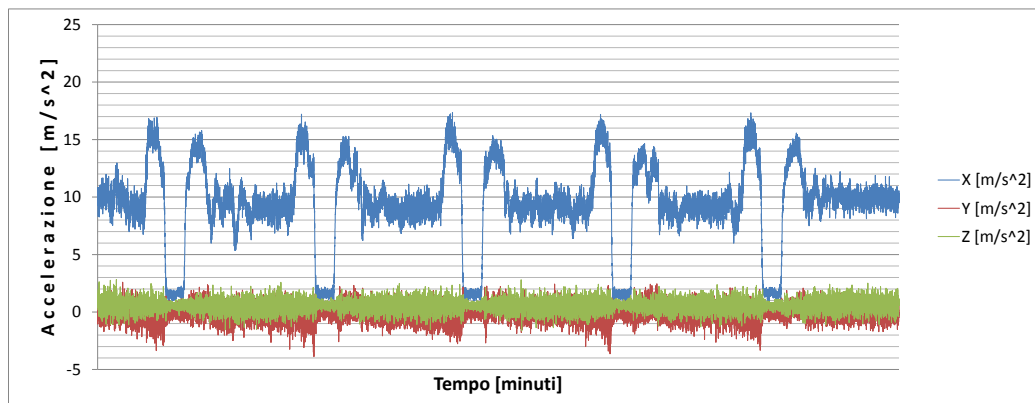


Figura 8 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

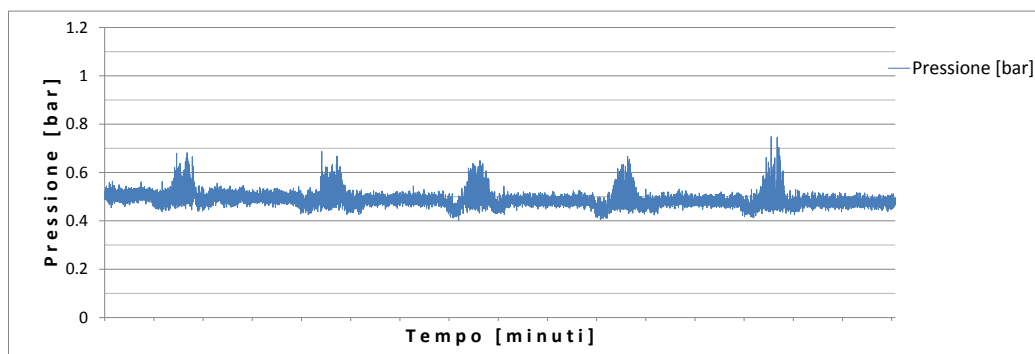


Figura 9 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 70W

## PHP verticale a 40W

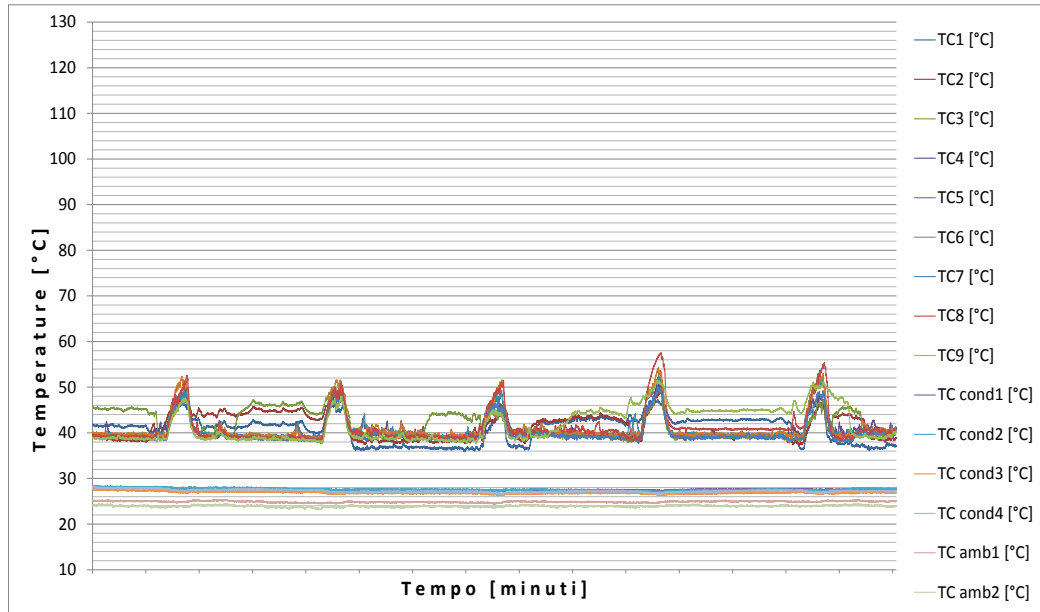


Figura 10 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 40W

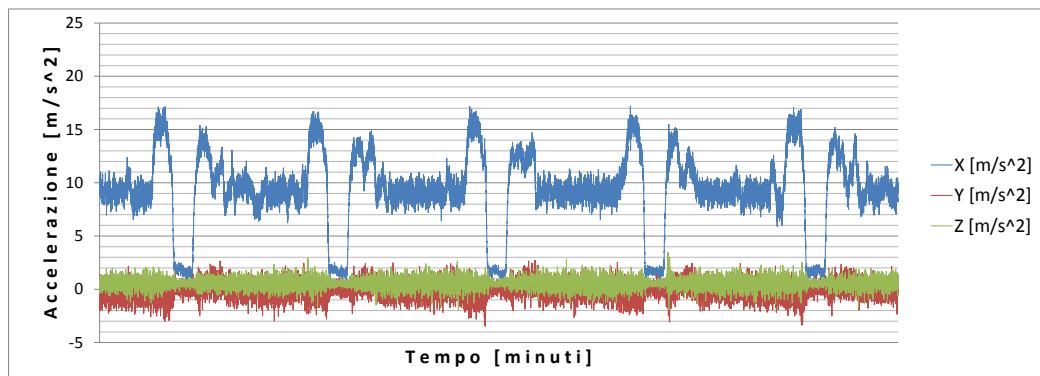


Figura 11 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

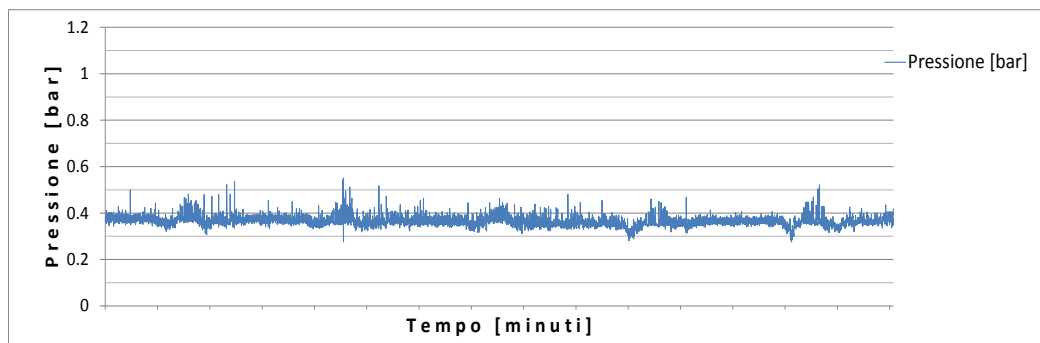


Figura 12 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 40W

**PHP verticale a 70W**

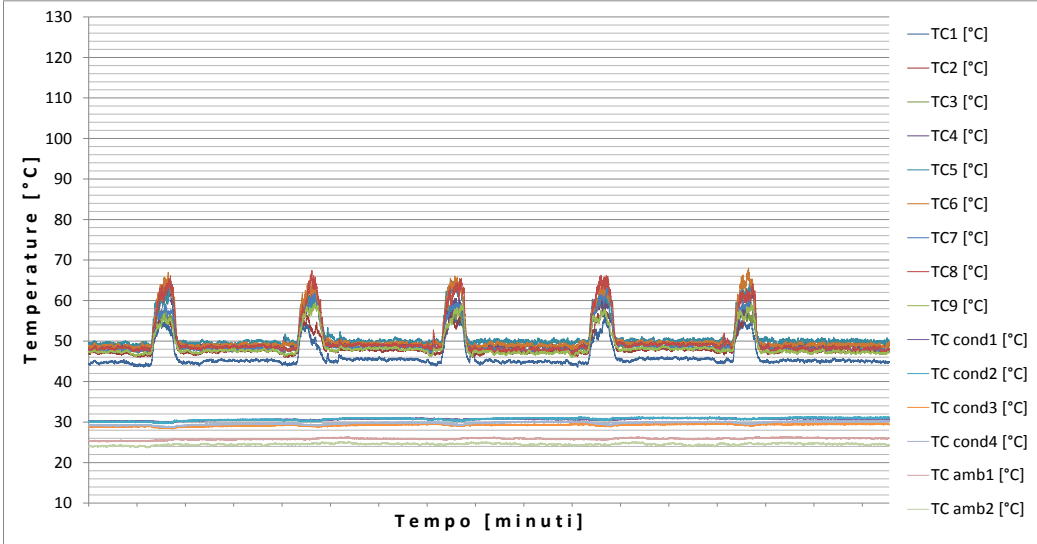


Figura 13 Temperature evaporatore, condensatore, ambiente nel tempo per PHP orizzontale a 70W

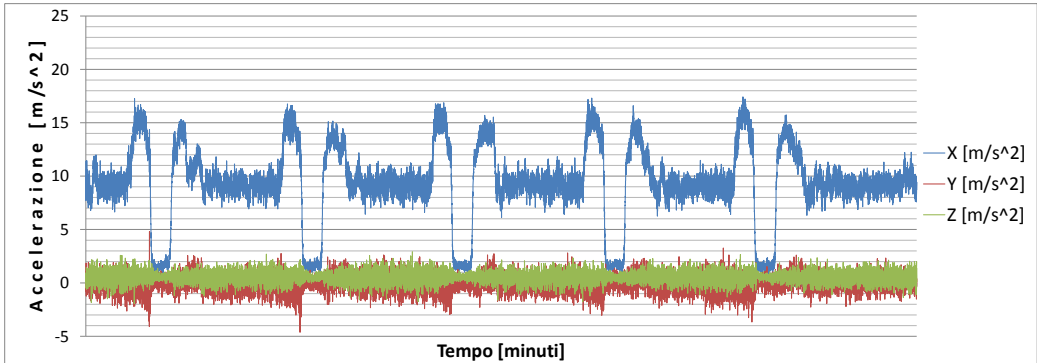


Figura 14 Accelerazione di gravità lungo i tre assi della PHP nel tempo

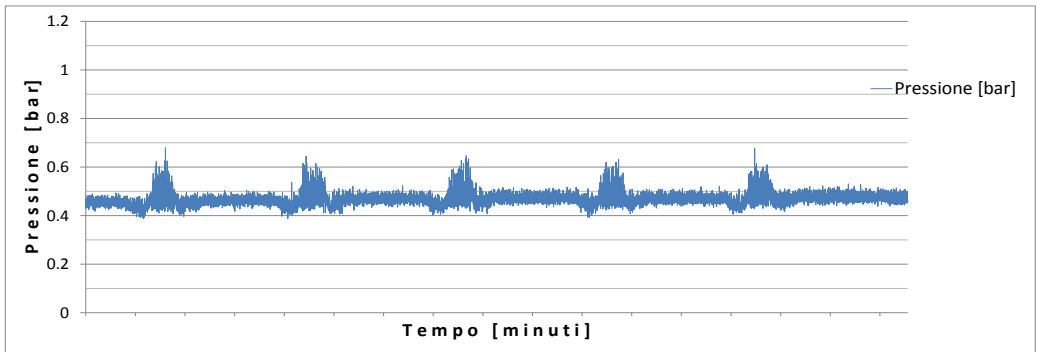


Figura 15 Pressione rilevata dal sensore nel tempo a 70W