

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale



**Politecnico  
di Torino**

Tesi di Laurea Magistrale

## Orion MPCV: progettazione e produzione dei sistemi TCS e CSS con saldatura orbitale.

Relatori

Dr. Stefano PRIMATESTA

Ing. Stefano ROSSI

Candidato

Alessandro BRIZZI

A. A. 2024/2025



# Sommario

<b>Elenco delle Figure</b>	v
<b>1 Introduzione</b>	1
<b>2 Sistemi TCS e CSS su un modulo spaziale</b>	3
2.1 Introduzione . . . . .	3
2.2 Thermal Control System: TCS . . . . .	4
2.2.1 Definizione dei requisiti di sistema . . . . .	5
2.3 Consumables Support System: CSS . . . . .	5
2.3.1 Sottosistema di distribuzione dall'azoto (NDS) . . . . .	6
2.3.2 Sottosistema di distribuzione dell'acqua potabile (WDS) . . . . .	7
2.3.3 Sottosistema di distribuzione dell'ossigeno (ODS) e sistema di condizionamento . . . . .	7
2.3.4 Definizione dei requisiti del sistema . . . . .	8
<b>3 Progettazione del sistema TCS</b>	11
3.1 Sottosistema EATCS . . . . .	11
3.1.1 Valutazione del tasso di leakage di fluido refrigerante . . . . .	11
3.1.2 Accumulatori del fluido refrigerante e dimensionamento linee ATCS . . . . .	14
3.1.3 Controllo termico passivo delle linee TCS e CSS . . . . .	16
3.2 Analisi di trade-off . . . . .	17
3.2.1 Scelta del fluido refrigerante . . . . .	17
3.2.2 Scelta della tipologia di radiatore . . . . .	22
3.2.3 Scelta del design dei condotti fluidi . . . . .	28
3.2.4 Scelta dell'architettura dei Cold Plates per il raffreddamento avionico . . . . .	33
3.2.5 Scelta dell'architettura dell'assieme radiatori . . . . .	35
<b>4 Progettazione del sistema CSS</b>	40
4.1 CSS: Linee ad alta pressione . . . . .	40

4.1.1	Sottosistema distribuzione azoto: NDS 1 . . . . .	42
4.1.2	Sottosistema distribuzione ossigeno: ODS 1A . . . . .	42
4.1.3	Sottosistema distribuzione ossigeno: ODS 1B e 1D . . . . .	43
4.2	CSS: Linee a bassa pressione . . . . .	44
4.2.1	Sottosistema distribuzione azoto: NDS 2 e 12 . . . . .	47
4.2.2	Sottosistema distribuzione azoto: NDS 10 . . . . .	48
4.2.3	Sottosistema distribuzione azoto: NDS 11 e 11B . . . . .	50
4.2.4	Sottosistema distribuzione ossigeno: ODS 2 e 8 . . . . .	51
4.3	CSS: Linee WDS . . . . .	51
4.3.1	Sottosistema distribuzione acqua: WDS 1A . . . . .	52
4.3.2	Sottosistema distribuzione acqua: WDS 1B . . . . .	52
4.3.3	Sottosistema distribuzione acqua: WDS 2 . . . . .	52
4.4	Serbatoi . . . . .	53
4.4.1	Sottosistema distribuzione acqua . . . . .	53
4.4.2	Sottosistema distribuzione consumabili gassosi . . . . .	57
4.5	Componenti elettroniche . . . . .	59
4.5.1	Sensori di pressione . . . . .	60
4.5.2	Valvole di cut-off . . . . .	62
4.6	Componenti non elettroniche . . . . .	64
4.6.1	Regolatori di pressione . . . . .	64
4.6.2	Filtri idrofobici . . . . .	65
4.6.3	Nitrogen relief valves . . . . .	66
<b>5</b>	<b>Definizione dei processi produttivi</b> . . . . .	<b>68</b>
5.1	Specifica dei processi produttivi . . . . .	68
5.2	Stesura dei cicli di produzione . . . . .	69
5.2.1	Revisione dei cicli di produzione . . . . .	70
<b>6</b>	<b>Digitalizzazione dei cicli di produzione con DELMIA Apriso</b> . . . . .	<b>73</b>
6.1	Introduzione ai sistemi <i>MES</i> . . . . .	73
6.2	Il caso <b>Thales Alenia Space: DELMIA Apriso MES</b> . . . . .	75
6.3	Digitalizzazione dei cicli di saldatura orbitale . . . . .	76
6.3.1	Struttura del <i>Routing</i> . . . . .	76
<b>7</b>	<b>Orbital Welding</b> . . . . .	<b>84</b>
7.1	Introduzione . . . . .	84
7.2	Attrezzatura richiesta . . . . .	85
7.2.1	Generatore di saldatura . . . . .	86
7.2.2	Bombole di gas inerte e linee di distribuzione . . . . .	87
7.2.3	Testa di saldatura . . . . .	89
7.3	Specifica del processo di saldatura orbitale . . . . .	90

7.3.1	Corrente di saldatura . . . . .	90
7.3.2	Energia di saldatura e apporto di calore . . . . .	91
7.3.3	Il ruolo della corrente pulsata . . . . .	92
7.3.4	Criteri visivi di accettabilità del giunto . . . . .	93
7.3.5	Controlli non distruttivi sul giunto . . . . .	93
7.3.6	Tipologie di elettrodi utilizzabili . . . . .	94
<b>8</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>96</b>
	<b>Fonti</b>	<b>100</b>

# Elenco delle Figure

3.1	Controllo termico passivo piping . . . . .	17
3.2	Risultati analisi termica: calore dissipato in funzione dell'area effettiva del radiatore. . . . .	20
3.3	MDPS nelle due configurazioni: "Plate/Stiffeners" a sinistra, "Honeycomb" a destra. Questa immagine è stata volutamente oscurata in alcune delle sue parti in accordo con Thales Alenia Space, per limitare la fuoriuscita di dati sensibili dalla realtà aziendale. . . . .	24
3.4	Diametro critico al variare della velocità; le curve tratteggiate sono riferite a impatti con un angolo di 45°. Questa immagine è stata volutamente oscurata in alcune delle sue parti in accordo con Thales Alenia Space, per limitare la fuoriuscita di dati sensibili dalla realtà aziendale. . . . .	26
3.5	Andamento temperatura superficiale del radiatore, lungo la direzione trasversale. . . . .	28
3.6	Suddivisione in resistenze termiche per la dissipazione del calore attraverso il radiatore (Analysis Network). . . . .	29
3.7	Andamento della densità e della viscosità dinamica con la temperatura. . . . .	30
3.8	Andamento di $hA$ e del numero di Reynolds con la temperatura. . . . .	31
3.9	Confronto fra le conduttanze termiche nella Analysis Network in funzione della temperatura. . . . .	32
3.10	Ripartizione percentuale delle resistenze termiche nella Analysis Network in funzione della temperatura. . . . .	32
3.11	Architettura full-parallel. . . . .	34
3.12	Architettura full-serial. . . . .	34
3.13	Caduta di pressione in funzione del flusso di massa. Questa immagine è stata volutamente oscurata in alcune delle sue parti in accordo con Thales Alenia Space, per limitare la fuoriuscita di dati sensibili dalla realtà aziendale. . . . .	37

3.14	Prestazioni del radiator cluster, in termini di NH <sub>3</sub> boiling rate, considerando funzionamento nominale e worst hot case; a sinistra configurazione full-parallel e a destra full-serial. Questa immagine è stata volutamente oscurata in alcune delle sue parti in accordo con Thales Alenia Space, per limitare la fuoriuscita di dati sensibili dalla realtà aziendale. . . . .	38
3.15	Prestazioni del radiator cluster, in termini di temperatura all'inlet e all'outlet del cluster di radiatori, considerando funzionamento con un circuito guasto e worst hot case; a sinistra configurazione full-parallel e a destra full-serial. Questa immagine è stata volutamente oscurata in alcune delle sue parti in accordo con Thales Alenia Space, per limitare la fuoriuscita di dati sensibili dalla realtà aziendale. . . . .	38
3.16	Prestazioni del radiator cluster, variazione della temperatura delle TCU e PDU, considerando funzionamento con un circuito guasto e worst hot case; a sinistra configurazione full-parallel e a destra full-serial. Questa immagine è stata volutamente oscurata in alcune delle sue parti in accordo con Thales Alenia Space, per limitare la fuoriuscita di dati sensibili dalla realtà aziendale. . . . .	39
4.1	Sezione piping ad alta pressione. Questa immagine è stata volutamente oscurata in alcune delle sue parti in accordo con Thales Alenia Space, per limitare la fuoriuscita di dati sensibili dalla realtà aziendale. . . . .	41
4.2	Rappresentazione CAD linea NDS 1. . . . .	43
4.3	Rappresentazione CAD linea ODS 1A. . . . .	44
4.4	Rappresentazione CAD linee ODS 1B (sinistra) e 1D (destra). . . . .	45
4.5	Sezione piping a bassa pressione ( $D = 17.46$ mm). Questa immagine è stata volutamente oscurata in alcune delle sue parti in accordo con Thales Alenia Space, per limitare la fuoriuscita di dati sensibili dalla realtà aziendale. . . . .	47
4.6	Rappresentazione CAD della linea NDS 10. . . . .	49
4.7	Rappresentazione CAD delle linee NDS 11 e NDS 11B. . . . .	50
4.8	Rappresentazione CAD delle linee ODS 2 e 8. . . . .	51
4.9	Rappresentazione CAD del circuito WDS (inner loop). . . . .	53
4.10	Interfaccia metallica WT in configurazione compressa. . . . .	58
4.11	Fotografia raffigurante un serbatoio GDS fissato con gli appositi supporti durante una fase di test strutturale. . . . .	60
4.12	Rappresentazione CAD valvole di cut-off a singola interfaccia (NO)	62
4.13	Rappresentazione CAD valvole di cut-off a doppia interfaccia (NC).	63
4.14	Pressure regulator CSS. . . . .	65
4.15	Filtro idrofobico CSS. . . . .	66

5.1	Esempio di step di saldatura MOS. Questa immagine è stata volutamente oscurata in alcune delle sue parti in accordo con Thales Alenia Space, per limitare la fuoriuscita di dati sensibili dalla realtà aziendale. . . . .	71
6.1	Suddivisione dell'Operation in <i>WIs</i> : a sinistra l'editor grafico a <i>flow chart</i> , a destra la vista sequenziale. . . . .	78
6.2	Esempio di contenuto di una <i>Work Instruction</i> . Questa immagine è stata volutamente oscurata in alcune delle sue parti in accordo con Thales Alenia Space, per limitare la fuoriuscita di dati sensibili dalla realtà aziendale. . . . .	79
6.3	Routing NDS 2.1. . . . .	83
7.1	Una serie di generatori di diverse categorie. . . . .	87

# Capitolo 1

## Introduzione

Il testo che segue è stato prodotto in seguito alla mia permanenza presso la sede Torinese di Thales Alenia Space, azienda leader del settore aerospaziale italiano. Durante il mio tirocinio curriculare, ho avuto l'opportunità di lavorare a stretto contatto con il reparto di ingegneria della produzione, in particolare sulla stesura dei cicli di produzione associati ai processi di assemblaggio mediante saldatura orbitale. Le attività svolte mi hanno permesso di comprendere e approfondire le procedure e le difficoltà, affrontate da una realtà industriale ben affermata come Thales Alenia Space, nella progettazione e nella successiva produzione dei sistemi a supporto di un modulo spaziale abitabile. Questa tesi mira a fornire al lettore un approfondimento sul programma aziendale al quale ho avuto il piacere di partecipare, ovvero il programma di sviluppo e produzione del modulo di supporto della navicella Orion MPCV, veicolo spaziale con equipaggio designato per l'utilizzo durante le missioni Artemis della NASA: il modulo di supporto in questione, denominato ESM-MPCV "European Support Module – Multi Purpose Crew Vehicle", ospita tutti i sistemi necessari alla propulsione orbitale e al controllo termico della navicella, oltre al supporto vitale dell'equipaggio ospitato nel crew module. Questo modulo, progettato e prodotto interamente in Unione Europea per conto dell'ESA, rappresenta uno sforzo comune che ha coinvolto numerose aziende del settore, contribuendo a coltivare la competenza nel settore spaziale dell'industria Europea. Nel corso dei capitoli a seguire, verranno presentati due sistemi di cruciale importanza per il corretto funzionamento della navicella Orion e dei suoi sistemi avionici, e per la sopravvivenza dell'equipaggio durante la missione: il sistema di controllo termico (TCS) e il sottosistema di stoccaggio consumabili (CSS). La disamina di questi due sistemi comprenderà:

- La descrizione del funzionamento e la definizione dei requisiti funzionali dei sistemi in questione;

- La suddivisione dei sistemi in eventuali sottosistemi e il ruolo svolto da ciascuno di essi nella navicella Orion;
- La fase di progettazione dei sistemi, con un approfondimento sulle analisi di trade-off svolte per scegliere le soluzioni progettuali più opportune.

Successivamente, in accordo con quanto da me svolto in prima persona durante il mio tirocinio, verranno approfondite le procedure seguite per la stesura dei cicli di produzione, spesso indicati con l'inglese "Manufacturing Operation Sheet", il ruolo svolto da questi documenti nella produzione industriale e l'importanza della continua revisione degli stessi per il miglioramento dell'efficienza degli apparati produttivi aziendali e per la riduzione dei costi associati alla produzione. Verrà poi affrontato il tema della digitalizzazione dei cicli di produzione, come frutto dell'integrazione di tutti gli aspetti della gestione degli apparati produttivi, in termini non solo operativi ma anche economici, attraverso l'introduzione di un sistema informatico MES ("Manufacturing Execution System"); in particolare, verrà approfondito il funzionamento del sistema MES prodotto dalla Dassault Systèmes, DELMIA Apriso, che Thales Alenia Space sta implementando per la gestione dei suoi apparati produttivi. Nel corso del capitolo dedicato a DELMIA Apriso, verranno affrontati i vantaggi che possono essere apportati implementando un sistema informatico MES, e le difficoltà che possono essere riscontrate durante tale implementazione da un'azienda caratterizzata da una produzione discreta, come Thales Alenia Space. Infine, verrà approfondito un processo produttivo centrale nella produzione dei sistemi TCS e CSS, trattati nella tesi: la saldatura orbitale. In questo ultimo capitolo sono trattate le applicazioni di questo processo di assemblaggio, le attrezzature richieste e tutti gli elementi da considerare per definire una specifica di produzione per questo processo.

## Capitolo 2

# Sistemi TCS e CSS su un modulo spaziale

### 2.1 Introduzione

Per garantire la presenza delle corrette condizioni di funzionamento di un modulo spaziale, è essenziale che esso sia dotato di un sistema in grado di neutralizzare l'accumulo di calore generato dal funzionamento delle componenti elettroniche, il cosiddetto "Thermal Control System" (TCS): in assenza di aria, il TCS non potrà sfruttare metodi di dissipazione del calore quali la convezione o la conduzione attraverso l'atmosfera; il calore viene quindi trasmesso ad un medium fluido attraverso degli scambiatori di calore, trasferito poi dal fluido ad una serie di radiatori in grado, infine, di dissipare il calore in eccesso all'esterno del modulo mediante irraggiamento. Il TCS comprende quindi tutto il sistema di distribuzione e ricircolo del fluido refrigerante, i serbatoi contenenti lo stesso e i radiatori per la dissipazione del calore. Il modulo spaziale deve inoltre garantire che siano presenti le condizioni di abitabilità per la crew, e ciò include sicuramente l'apporto di aria respirabile e acqua potabile alla cabina: questo compito è assegnato al "Consumables Storage Subsystem" (CSS), in grado di distribuire dove necessario all'interno del modulo il giusto apporto di Azoto, Ossigeno e acqua potabile, costituito dai relativi sistemi di distribuzione e serbatoi. Nel caso del Multi-Purpose Crew Vehicle (MPCV), i sistemi TCS e CSS sono contenuti all'interno dell'European Service Module (ESM), connesso al Crew Module (CM) e posizionato sotto di esso.

## **2.2 Thermal Control System: TCS**

Il sistema di controllo termico (TCS) del modulo ESM-MPCV ha lo scopo di trasportare tutti i carichi termici dai sistemi avionici verso i radiatori posizionati sulla superficie esterna del modulo e controllare la temperatura e gli scambi termici interni ed esterni al modulo di servizio limitando i flussi e i gradienti termici; questo include un controllo termico dedicato alle linee propulsive e alle linee CSS, compresi i serbatoi.

Il sistema TCS di ESM-MPCV è composto da due diversi sottosistemi:

- Il sottosistema di controllo termico passivo (PTCS);
- Il sottosistema esterno di controllo termico attivo (EATCS).

Il PTCS ha la principale funzione di isolare il modulo o specifici componenti dall'ambiente circostante attraverso l'implementazione di apposite strutture chiamate Multi Layer Insulators o Multi Layer Blankets (MLI o MLB): i MLI sono delle strutture costituite da una serie di sottili fogli di materiale plastico a bassa emissività, solitamente Mylar o Kapton, utilizzati principalmente in ambito spaziale per ridurre il calore scambiato per irraggiamento con l'ambiente esterno. Il principio di funzionamento dietro a questa tecnologia è basato sul bilanciamento tra il calore assorbito e quello trasmesso per mezzo dell'irraggiamento e per questo motivo gli strati esterni dei MLI sono solitamente costituiti da un materiale riflettente, per ridurre sia l'assorbimento, sia l'emissione di radiazione termica. Alcuni dei MLI, specialmente quelli posizionati sulle superfici esterne del modulo, includono alcuni strati in Kevlar per preservare l'integrità della struttura e delle componenti interne del modulo in caso di impatti con piccoli detriti spaziali e meteoroidi.

Il PTCS implementa i MLI per suddividere il modulo in volumi disaccoppiati termicamente gli uni con gli altri, ciascuno dotato di appositi caloriferi per regolare indipendentemente la temperatura interna: per mantenere un'alta efficienza termica e ottimizzare il calore scambiato dai caloriferi, all'interno dei volumi vengono sfruttati sia la conduzione termica che l'irraggiamento. I componenti posizionati sulle superfici esterne al modulo o racchiusi in uno strato indipendente di MLI sono dotati di caloriferi dedicati, per garantire un controllo termico locale.

Il EATCS è costituito da linee idrauliche che trasferiscono il calore dagli scambiatori termici installati sui sistemi avionici nel CM ai radiatori, posizionati sulla superficie esterna del modulo. Le linee idrauliche del EATCS sono concepite per essere disaccoppiate termicamente dal modulo, sia dal punto di vista conduttivo che da quello radiativo, in modo da mantenere un'efficienza termica elevata e non creare "hot spots" in punti specifici della struttura.

### **2.2.1 Definizione dei requisiti di sistema**

Il progetto del TCS deve far diretto riferimento ai requisiti funzionali, ambientali e di manutenibilità definiti nella fase di design preliminare. In questo paragrafo sono riportati i principali requisiti funzionali associati al sottosistema in questione.

- In condizioni nominali, il sistema TCS deve prevenire lo stazionamento o il ghiacciamento di ogni linea di distribuzione fluida;
- Il sistema TCS del modulo ESM-MPCV deve essere progettato per sostenere una singola missione;
- Una volta integrato al ESM, il TCS deve essere in uno stato di prontezza al lancio per 5 giorni consecutivi;
- Il sistema TCS del modulo ESM-MPCV deve ricevere i dati relativi ai valori di riferimento delle temperature delle valvole di mescolamento attraverso un'interfaccia ottica;
- Il sistema TCS del modulo ESM-MPCV deve poter controllare la posizione delle valvole di mescolamento allo scopo di mantenere la temperatura di output corretta;
- Il sistema TCS del modulo ESM-MPCV deve poter controllare le pompe per la distribuzione del fluido refrigerante per garantire che ciascuna linea riceva il flusso di massa corretto;
- Ciascuno dei caloriferi del PTCS deve essere attivato da una singola unità di controllo termico;
- Il sistema TCS del modulo ESM-MPCV deve fornire in output i seguenti dati relativi a ciascuna delle linee ATCS: pressione, temperatura, posizione delle valvole di mescolamento, portata smaltita dalle pompe.

## **2.3 Consumables Support System: CSS**

Il sistema CSS di ESM-MPCV è composto da tre diversi sottosistemi di distribuzione:

- Il sottosistema di distribuzione dell'ossigeno (ODS);
- Il sottosistema di distribuzione dell'azoto (NDS);
- Il sottosistema di distribuzione dell'acqua potabile (WDS).

Ognuno dei sottosistemi elencati ha due diverse configurazioni, tra loro differenti principalmente per il numero di serbatoi e/o la loro dimensione, una relativa alle missioni lunari (Artemis) e l'altra relativa alle più brevi missioni di shuttling con l'ISS: Nella configurazione per le missioni Artemis il CSS è costituito da un serbatoio di azoto, tre serbatoi di ossigeno e quattro serbatoi di acqua potabile, mentre per le missioni ISS la configurazione prevede la presenza di due serbatoi di azoto, due serbatoi per l'ossigeno e due serbatoi per l'acqua potabile. Si noti come i serbatoi dei sistemi di distribuzione dei gas sono sempre quattro, cambia solo il ruolo che ha uno di essi nelle due configurazioni: per passare dalla configurazione lunare a quella ISS, occorre modificare il layout delle linee del gas, in modo che uno dei serbatoi per l'ossigeno possa entrare a far parte del circuito per l'azoto; la transizione da una configurazione all'altra è consentita dalla presenza di collegamenti non saldati tra le varie linee e i serbatoi, elemento che permette anche la sostituzione di una singola linea in presenza di un guasto limitato ad essa. Quanto appena descritto implica che i serbatoi di ossigeno e azoto siano interscambiabili, quindi sottoposti agli stessi standard costruttivi e di pulizia (100A).

Nel corso dei prossimi paragrafi e capitoli, l'approfondimento sarà principalmente incentrato sulla configurazione lunare del modulo ESM-MPCV, data la rilevanza che le missioni Artemis avranno negli anni a seguire in ambito aerospaziale; Inoltre, essendo attualmente la configurazione lunare l'unica ad essere stata prodotta, è anche quella che ha subito più variazioni rispetto al progetto originale, mentre il materiale consultabile riguardante la configurazione ISS è più limitato.

### **2.3.1 Sottosistema di distribuzione dall'azoto (NDS)**

Il sottosistema di distribuzione dell'azoto è costituito da due circuiti, caratterizzati da valori differenti di pressione operativa: il circuito "ad alta pressione" e quello "a bassa pressione"; il circuito ad alta pressione è suddiviso in due linee, una per la distribuzione di azoto ad alta pressione direttamente al modulo abitativo verso il "Ground Support Equipment" (GSE), l'altra è connessa al circuito a bassa pressione attraverso un regolatore di pressione. Il circuito a bassa pressione è, analogamente, suddiviso in due linee: una porta azoto al modulo abitativo per la produzione di aria respirabile, mentre l'altra, in entrambe le configurazioni, è connessa al sottosistema di distribuzione dell'acqua potabile: lo scopo di questa interconnessione tra le due linee idrauliche è funzionale al mantenimento della pressione di esercizio prevista per il corretto apporto di acqua attraverso il WDS; allo svuotamento del serbatoio d'acqua, viene fatto fluire azoto in pressione al suo interno, permettendo quindi il mantenimento della pressione corretta al suo interno. Per evitare che, a seguito di determinate manovre in orbita o di un'eventuale evaporazione dell'acqua all'interno del serbatoio a seguito di un guasto, l'acqua

tenda ad infiltrarsi nel NDS, l'interfaccia tra i due sistemi è costituita da filtri idrofobici monodirezionali, che non permettono l'instaurarsi di un flusso inverso.

### **2.3.2 Sottosistema di distribuzione dell'acqua potabile (WDS)**

Il WDS è il sottosistema responsabile alla distribuzione, all'interno del modulo, dell'acqua potabile a disposizione della crew. L'acqua potabile nelle missioni spaziali, oltre a soddisfare i requisiti di idratazione della crew, svolge un ruolo molto importante nella corretta reidratazione del cibo, nell'igiene dell'equipaggio e nella gestione delle emergenze mediche, ed è quindi cruciale che i requisiti di composizione siano rispettati e i livelli di contaminazione rientrino nei limiti definiti dai criteri di potabilità.

Per mantenere una distribuzione dei pesi ottimale durante l'intera durata della missione, lo svuotamento dei serbatoi d'acqua deve essere omogeneamente suddiviso su tutti i serbatoi; per garantire che ciò avvenga correttamente ognuno dei serbatoi è dotato di un sensore di svuotamento, che rileva la quantità di fluido ancora presente al proprio interno. Questo sistema svolge una doppia funzione come metodo di rilevazione dei guasti, eliminando la necessità di avere una sensoristica ridondante: se il sensore di uno dei serbatoi smettesse di funzionare, il livello corretto di fluido al suo interno sarebbe dato dal sensore sugli altri serbatoi, mentre se ad esempio dovesse esserci un guasto al WDS risultante in un disomogeneo svuotamento di un serbatoio, la presenza del sensore di svuotamento permetterebbe l'immediato rilevamento del suddetto guasto. In caso di guasto ad un serbatoio, la linea può essere isolata mediante l'attivazione di una valvola di cut-off posizionata sulla linea stessa, normalmente aperta.

In futuro è previsto lo sviluppo di una nuova configurazione del layout interno del modulo MPCV, dotato di un kit di sublimazione dell'acqua; questo kit sarà composto da un numero variabile di serbatoi aggiuntivi, di solito tre, connessi al sistema mediante l'installazione di un circuito di piping modificato rispetto alle due configurazioni oggi sviluppate e un sublimatore posizionato attorno al CM: l'acqua aggiuntiva andrà ad alimentare il sublimatore, che svolgerà una funzione di controllo termico aggiuntiva rispetto a quella regolata dal TCS.

### **2.3.3 Sottosistema di distribuzione dell'ossigeno (ODS) e sistema di condizionamento**

Analogamente al NDS, il sottosistema di distribuzione dell'ossigeno è costituito da una linea ad alta pressione e una a bassa pressione, comunicanti attraverso un regolatore di pressione: la linea ad alta pressione è direttamente connessa ai serbatoi, mentre la distribuzione dell'ossigeno, da miscelare all'azoto per produrre un'atmosfera respirabile all'interno del CM, è assegnata alla linea a bassa pressione.

L'ossigeno è un gas altamente infiammabile, ed è quindi necessario immettere gas inerte (solitamente azoto puro o aria respirabile) anche all'interno del modulo ESM, in modo da limitare il rischio di incendio o esplosione in caso di guasto ai serbatoi di ossigeno o delle linee del ODS: questa funzione è assegnata al sistema di condizionamento dell'aria, che deve essere dotato di una serie di ugelli nel ESM per garantire il ricircolo dell'aria al suo interno. Il sistema di condizionamento ha anche la funzione di regolare, sia nel CM che nel ESM, i livelli di umidità dell'aria e la temperatura interna.

### **2.3.4 Definizione dei requisiti del sistema**

Il progetto del CSS, analogamente al caso del TCS, deve far diretto riferimento ai requisiti funzionali, ambientali e di manutenibilità definiti nella fase di design preliminare. In questo paragrafo sono riportati i principali requisiti funzionali associati al sottosistema in questione.

Il sistema di distribuzione dei gas consumabili (NDS e ODS) deve rispettare i seguenti requisiti funzionali:

- Le linee NDS e ODS a bassa pressione devono operare rispettivamente a 3.16/4.67 bar (min/max) e 5.64/7.01 bar per garantire il corretto mescolamento dei gas e il funzionamento ottimale del sistema di condizionamento dell'aria;
- Le linee NDS e ODS a bassa pressione devono erogare una portata d'aria pari ad almeno 24.88 kg/h nel CM, con una pressione massima di interfaccia pari a 11.37 bar;
- Le linee NDS e ODS a bassa pressione devono operare rispettivamente a 3.16/4.67 bar (min/max) e 5.64/7.01 bar per garantire il corretto mescolamento dei gas e il funzionamento ottimale del sistema di condizionamento dell'aria;
- Le linee NDS e ODS ad alta pressione devono operare ad una massima pressione operativa pari a 391 bar;
- La minima e la massima densità dell'azoto consentite durante il caricamento dei serbatoi sono rispettivamente 400.13 kg/m<sup>3</sup> e 430.78 kg/m<sup>3</sup>;
- La minima e la massima densità dell'ossigeno consentite durante il caricamento dei serbatoi sono rispettivamente 520 kg/m<sup>3</sup> e 578 kg/m<sup>3</sup>;
- Prima del completo svuotamento, durante la durata della missione il NDS e il ODS devono trasportare rispettivamente 39.87/50.87 kg (lunar/ISS) e 129.3/59.1 kg all'interno del CM;

- La qualità del gas in uscita da NDS e ODS deve essere conforme, rispettivamente, a quanto si osserva per linee con uno standard di pulizia delle superfici interne ISO 200A e 100A;
- In presenza di un singolo guasto al ODS, almeno metà del volume totale di ossigeno deve rimanere disponibile alla distribuzione nel CM;
- È richiesta la ridondanza delle linee NDS e ODS dirette dal ESM al CM, e ogni linea di distribuzione deve poter essere isolata attraverso la chiusura di apposite valvole di cut-off;
- Il CSS deve essere in grado di regolare la fuoriuscita di fluidi gassosi durante le fasi di decollo;
- Il tempo di completo azionamento delle valvole di cut-off non deve superare un tempo pari a 687 ms;
- Il sistema di monitoraggio automatico dei guasti deve essere in grado di fornire dati sul corretto funzionamento del CSS in maniera continua durante tutta la missione;
- Le linee di distribuzione dell'ossigeno devono essere progettate applicando una filosofia "damage tolerance" e devono essere in grado di continuare ad operare nei requisiti di funzionamento anche a seguito di un singolo guasto ai sottosistemi di distribuzione dei gas (1-failure tolerance);
- NDS deve essere progettato in modo tale da poter distribuire azoto in maniera continuativa per 4779 secondi, considerando la portata minima di design, in qualunque momento della missione;
- ODS deve essere progettato in modo tale da poter distribuire ossigeno in maniera continuativa per 1530 secondi, considerando la portata minima di design, in qualunque momento della missione;
- Nelle fasi di lift-off la massa totale del sistema CSS non deve superare 435 kg in caso di missione lunare e 467.5 kg in caso di missione ISS;
- Il sistema di monitoraggio responsabile del rilevamento di eventuali guasti deve essere indipendente e permettere un'acquisizione dei dati in maniera continuativa durante l'intera missione, ed i percorsi di acquisizione dei dati devono essere sempre almeno due;
- Le linee NDS a bassa pressione devono permettere lo spurgo di azoto a valle dei regolatori di pressione, per abbassare la pressione sotto il limite di design (MDP) in caso di guasto ai regolatori di pressione;

- A monte dell'interfaccia tra NDS e i serbatoi dell'acqua devono essere opportunamente installati filtri idrofobici che non permettano la propagazione di acqua all'interno delle linee NDS in caso di guasto.

Il sottosistema di distribuzione dell'acqua potabile deve rispettare i seguenti requisiti funzionali:

- Il WDS deve essere in grado di erogare al CM, durante la durata della missione, 324.1 kg di acqua potabile per le missioni lunari (quattro serbatoi) e 100.4 kg per le missioni ISS (due serbatoi);
- In condizioni di guasto al WDS, esso deve comunque essere in grado di trasportare al CM almeno 3.725 kg di acqua al giorno (per membro dell'equipaggio), per soddisfare i requisiti di idratazione e igiene della crew, per tutta la durata della missione; a questi si aggiungono ulteriori 3 kg per membro dell'equipaggio, 4 kg per il ground sampling e circa 1 kg di margine;
- Le linee WDS devono operare ad una pressione di funzionamento pari a 3.16/4.67 bar (min/max), smaltendo una portata minima pari a 40.97 kg/h ad una pressione massima di interfaccia pari a 8.25 bar;
- La quantità di elementi inquinanti all'interno della riserva d'acqua, in termini di gas dissolti, contaminazione biologica e chimica deve rimanere entro i limiti di potabilità imposti per tutta la durata della missione;
- Le linee di distribuzione dell'acqua devono essere ridondanti e deve essere possibile isolare le singole linee in caso di guasto;
- L'acqua contenuta nel sistema deve rimanere allo stato liquido per tutta la durata della missione, indipendentemente dalle condizioni ambientali esterne;
- Le linee di distribuzione devono essere progettate applicando una filosofia "damage tolerance" e devono essere in grado di continuare ad operare nei requisiti di funzionamento anche a seguito di un singolo guasto ai sottosistemi di distribuzione dell'acqua (1-failure tolerance);

# Capitolo 3

## Progettazione del sistema TCS

### 3.1 Sottosistema EATCS

#### 3.1.1 Valutazione del tasso di leakage di fluido refrigerante

Il sottosistema EATCS è costituito da due circuiti gemelli, il loop A e il loop B e, come descritto precedentemente, è responsabile del trasporto e della dissipazione del calore generato dai sistemi avionici situati nel CM. Per garantire lo smaltimento del flusso termico appropriato è di primaria importanza determinare quanto del refrigerante contenuto all'interno del circuito viene perso durante la durata della missione e tenere in considerazione tale dato nel dimensionamento degli accumulatori: da questo punto di vista, gli elementi più critici all'interno di una linea idraulica sono le discontinuità, rappresentate da sensori, cold plate e dai giunti filettati, dalle saldature e dalle guarnizioni. Nel nostro caso i giunti filettati sono realizzati attraverso l'implementazione di giunti Dynatube, caratterizzati da un tasso di leakage pari a  $1 \times 10^{-5}$  scc/s di He valutato ad una pressione di 11.55 bar.

Per poter garantire che sia rispettato il requisito di leakage, che prevede un tasso massimo pari a  $2.06 \times 10^{-3}$  scc/s di He, occorre considerare infine tener conto del fatto che il fluido refrigerante utilizzato per scambiare calore all'interno delle linee ATCS non è elio, bensì HFE-7200, un fluido che si presenta allo stato liquido a temperatura ambiente ed è spesso utilizzato come mezzo per gli scambi di calore data la sua bassa temperatura di ebollizione. In fase di progettazione e dimensionamento bisogna dunque adattare la formulazione del requisito sul leakage in modo che tenga conto del diverso fluido refrigerante considerato. Un ulteriore elemento importante nella valutazione del tasso di leakage delle linee è la pressione alla quale viene mantenuto il fluido refrigerante: maggiore è la pressione,

maggiore sarà la tendenza del fluido a fuoriuscire dalle linee; per questo motivo, nella valutazione di tale requisito viene considerata la condizione di funzionamento più critica, ovvero quella alla massima pressione di design, pari a 15.12 bar nel caso dell'ATCS, e bisognerà dunque andare a stimare empiricamente il tasso di leakage associato ai giunti Dynatube a tale pressione.

Il primo passo è quindi andare a calcolare il tasso di leakage dei Dynatube ad una pressione differente da quella di test. A questo scopo, può essere utilizzata la seguente equazione:

$$X_2 = X_1 \sqrt{\frac{P_2}{P_1 - P_{\text{amb}}}} \quad (3.1)$$

Dove con  $X$  sono indicati i tassi di leakage,  $P_2$  e  $P_1$  sono rispettivamente le pressioni dopo e prima della conversione e  $P_{\text{amb}}$  è la pressione ambiente all'esterno del piping; considerando una pressione ambiente al momento del test pari a 1 bar, si ottiene un tasso di leakage:

$$X_2 = 1.68 \times 10^{-5} \text{ scc/s di He} \quad (3.2)$$

alla pressione massima di design delle linee EATCS per ciascun giunto Dynatube. Entrambi i circuiti del sottosistema EATCS presentano 53 giunti Dynatube, per un tasso di leakage totale pari a:

$$6.054 \times 10^{-4} \text{ scc/s} \quad (3.3)$$

Per quanto riguarda le altre discontinuità nel circuito, i tassi di perdita di elio valutati alla pressione massima di design e a temperatura ambiente sono i seguenti:

- Saldature:  $1.35 \times 10^{-6}$  scc/s per saldatura, per un totale di  $1.35 \times 10^{-5}$  scc/s (14 saldature per circuito);
- Guarnizioni O-ring:  $6.05 \times 10^{-6}$  scc/s per guarnizione, per un totale di  $5.5 \times 10^{-5}$  scc/s (14 O-ring per circuito);
- Radiatori:  $1.35 \times 10^{-4}$  scc/s per ciascun radiatore, per un totale di  $1.1 \times 10^{-3}$  scc/s (11 radiatori);
- Sensori di pressione:  $3.35 \times 10^{-5}$  scc/s per ciascun sensore, per un totale di  $6.71 \times 10^{-5}$  scc/s (2 sensori di pressione per circuito);
- Sensore di temperatura:  $6.71 \times 10^{-5}$  scc/s.

Tenendo in considerazione tutti i tassi di perdita riportati, il tasso totale del singolo circuito risulta pari a  $1.95 \times 10^{-3}$  scc/s di He inferiore al limite imposto dal requisito funzionale.

Per poter calcolare il tasso di leakage associato al fluido refrigerante HFE-7200 in modo da dimensionare correttamente gli accumulatori EATCS occorre sfruttare il dato riferito all'elio, ricavato con il procedimento indicato, per calcolare un parametro utile anche alla valutazione del tasso di leakage relativo al reale fluido refrigerante. Possiamo considerare il tasso di perdita come un certo volume di fluido perso in un determinato lasso di tempo, e dunque calcolarlo come prodotto della velocità di fuoriuscita del fluido e dell'area effettiva di uscita<sup>1</sup>:

$$X_{\text{HFE}} = V_{\text{HFE}} A_e \quad (3.4)$$

La velocità di uscita è calcolabile a partire dalla pressione operativa media del fluido refrigerante all'interno delle linee EATCS, pari a  $P_m = 6.6$  bar, considerando tale pressione agente sulle pareti del piping come equivalente alla pressione dinamica associata al flusso di refrigerante durante la fuoriuscita attraverso l'area effettiva:

$$V_{\text{HFE}} = \sqrt{\frac{2P_m}{\rho}} = 35.57 \text{ m/s} \quad (3.5)$$

L'area effettiva può essere calcolata a partire dal tasso di leakage totale riferito all'elio trovato precedentemente, riarrangiando i termini nella seguente formula per il calcolo della portata di massa:

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{1}{gR}} \sqrt{\frac{2K}{K-1} \left[ \left( \frac{P_2}{P} \right)_{\text{cr}}^{2/K} - \left( \frac{P_2}{P} \right)_{\text{cr}}^{(K+1)/K} \right]} \frac{A_e P}{\sqrt{T}} \quad (3.6)$$

Dove  $\dot{m}$  è la portata di massa,  $A_e$  è l'area effettiva di uscita,  $K$  è il coefficiente isentropico del fluido considerato,  $\left( \frac{P_2}{P} \right)_{\text{cr}}$  è il rapporto di pressione critico per il fluido considerato,  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $R$  è la costante dei gas perfetti e  $T$  è la temperatura.

Per valutare la portata di massa occorre convertire il tasso di leakage, espresso in unità di misura volumetrica, in kg/s; a questo scopo occorre conoscere la densità dell'elio ad una determinata pressione ( $P_{\text{MDP}} = 15$  bar) e temperatura ( $20^\circ\text{C}$ ), calcolabile utilizzando la legge dei gas perfetti adattata all'elio:

$$\rho_{\text{He}} = \frac{P_{\text{MDP}}}{R^* T} \quad (3.7)$$

Dove  $R^* = R M_{\text{mol,He}} = 33.256 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{mol}}$  è la costante dei gas perfetti adattata all'elio. Si ottiene una densità pari a:

---

<sup>1</sup>Come "area effettiva di uscita" si intende l'area equivalente alla somma di tutti i punti di fuoriuscita del gas per ciascun circuito del sistema EATCS.

$$\rho_{He} = 1.17 \times 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (3.8)$$

Possiamo quindi calcolare la portata di massa come segue:

$$\dot{m} = \rho_{He} X_{He} \times 10^{-6} = 0.331 \times 10^{-9} \text{ kg/s} \quad (3.9)$$

Trovata la portata, possiamo esplicitare la formula sopra rispetto all'area effettiva di leakage, trovando:

$$A_e = 3.16 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \quad (3.10)$$

Per ultimare la nostra valutazione del tasso di leakage di fluido refrigerante è sufficiente calcolare il prodotto tra la velocità di uscita del fluido, calcolata poco sopra, e l'area d'uscita effettiva:

$$X_{HFE} = 8.18 \times 10^{-12} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 8.18 \times 10^{-9} \text{ l/s} \quad (3.11)$$

Secondo i requisiti di progettazione del sistema TCS del modulo MPCV, “il sistema TCS del modulo ESM-MPCV, in tutte le sue componenti ad esclusione delle linee sostituibili, deve avere una vita operativa pari o superiore a 732.1 giorni a partire dall'accettazione del modulo”; ciò implica che nel dimensionamento degli accumulatori di fluido refrigerante bisognerà tenere conto del volume di fluido perso durante la durata di tempo indicata:

$$LV_{HFE} = X_{HFE} t_{\text{life}} = 0.517 \text{ l} \quad (3.12)$$

### 3.1.2 Accumulatori del fluido refrigerante e dimensionamento linee ATCS

Gli accumulatori di fluido refrigerante del sistema TCS del modulo MPCV sono del tipo “metallic bellow”<sup>2</sup> e sono progettati per svolgere, per tutta la durata della missione, le seguenti funzioni:

- Compensare le variazioni di volume del fluido refrigerante causate dai gradienti di temperatura;

---

<sup>2</sup>Vedi paragrafo 4.4.1 per un approfondimento su questa tipologia di accumulatore.

- Mantenere la corretta pressione di uscita, in modo che la pompa del refrigerante, posizionata a valle degli accumulatori, possa funzionare correttamente evitando effetti indesiderati come la cavitazione<sup>3</sup>;
- Permettere che il circuito ATCS associato operi sempre a pressioni inferiori alla pressione massima di design;
- Permettere lo stoccaggio di un volume di refrigerante sufficiente a compensare le perdite dovute al leakage.

La pressione operativa in uscita dagli accumulatori deve essere il più possibile bassa, in modo da limitare il tasso di leakage, ma comunque sufficiente ad evitare che si instauri cavitazione all'ingresso della pompa; inoltre, un'alta pressione operativa porterebbe ad un conseguente incremento della pressione massima di design per mantenere il fattore di sicurezza appropriato, risultando in strutture più pesanti e resistenti che graverebbero sulla massa totale del modulo.

Per valutare la pressione massima operativa occorre considerare la condizione di funzionamento del sistema ATCS più critica dal punto di vista della pressione: questa condizione si presenta nel caso in cui, a causa di un guasto ad uno dei circuiti del sistema ATCS, la temperatura del fluido refrigerante sale fino al suo valore medio massimo, pari a  $T_{\text{HFE,max}} = 36^{\circ}\text{C}$ . Considerando la condizione di caricamento del fluido refrigerante, in corrispondenza della quale si stima all'interno dell'accumulatore una massa di HFE-7200 pari a  $m_{\text{HFE,charge}} = 3.79 \text{ kg}$  e una temperatura del fluido refrigerante, al termine dell'assemblaggio del sistema TCS, pari a  $T_{\text{HFE,charge}} = 20^{\circ}\text{C}$ , occorre valutare la variazione di densità e di volume associate alla variazione di temperatura. A questo scopo possiamo usare la seguente relazione empirica per valutare la variazione di densità di HFE-7200:

$$\rho(T) = -2.269T + 1538.3 \quad \text{kg/m}^3 \quad (3.13)$$

Dove la temperatura va inserita nella relazione in Kelvin. Otteniamo dunque le seguenti densità alle due temperature indicate:

$$\rho_{20^{\circ}\text{C}} = 918.14 \quad \text{kg/m}^3 \quad (3.14)$$

$$\rho_{36^{\circ}\text{C}} = 625.11 \quad \text{kg/m}^3 \quad (3.15)$$

---

<sup>3</sup>La cavitazione è un effetto solitamente indesiderato che, nel caso delle pompe idrauliche, va a generare delle bolle di vapore all'ingresso che a contatto con l'elica si infrangono, generando attrito e onde di pressione che possono danneggiare le pale dell'elica, riducendone la vita operativa. Questo effetto è frequente quando all'ingresso della pompa si ha una pressione troppo bassa, costringendo il componente a lavorare in un regime di richiamo di portata.

Note le densità, si può calcolare la variazione di volume di refrigerante causata dall'aumento di temperatura:

$$\Delta V = m_{\text{HFE,charge}} \left( \frac{1}{\rho_{36^\circ\text{C}}} - \frac{1}{\rho_{20^\circ\text{C}}} \right) = 0.19 \text{ l} \quad (3.16)$$

Considerando infine la variazione di volume di HFE-7200 equivalente alla variazione di volume di gas contenuto nella sezione gassosa dell'accumulatore, possiamo valutare il volume assunto, a seguito della variazione di temperatura, dal gas contenuto all'interno del gas dome e del fluido refrigerante contenuto nel metal bellow:

$$V_{\text{HFE,max}} = V_{\text{HFE,charge}} + \Delta V = 4.315 \text{ l} \quad (3.17)$$

$$V_{\text{gas,min}} = V_{\text{gas,charge}} - \Delta V = 8.42 \text{ l} \quad (3.18)$$

Dove  $V_{\text{HFE,charge}} = 4.125 \text{ l}$  e  $V_{\text{gas,charge}} = 8.61 \text{ l}$  sono rispettivamente il volume di refrigerante all'interno dell'accumulatore e il volume di gas nel gas dome in fase di caricamento del fluido. Applicando la legge dei gas perfetti possiamo valutare la pressione presente all'interno del gas dome nella condizione critica:

$$P_{\text{gas,HOT}} = P_{\text{gas,n}} \frac{T_{\text{HOT}} V_{\text{gas,charge}}}{T_{\text{charge}} V_{\text{gas,min}}} = 4.35 \text{ bar} \quad (3.19)$$

Dove  $P_{\text{gas,n}} = 4.125 \text{ bar}$  è la pressione nominale operativa del gas dome. Tenendo in considerazione che la variazione massima di pressione a cavallo della pompa del refrigerante in condizioni di funzionamento critiche (una failure in uno dei due circuiti ATCS) è stata stimata pari a  $\Delta P_{\text{max,pump}} = 3.92 \text{ bar}$  possiamo calcolare la massima pressione operativa delle linee ATCS:

$$\text{MOP} = P_{\text{gas,HOT}} + \Delta P_{\text{max}} = 8.27 \text{ bar} \quad (3.20)$$

### 3.1.3 Controllo termico passivo delle linee TCS e CSS

Elemento importante della progettazione del sistema di controllo termico è la definizione delle strategie da applicare per il controllo termico passivo delle linee di distribuzione del modulo ESM MPCV. Un controllo termico passivo è necessario per garantire che tutte le sezioni di piping operino alla temperatura corretta riducendo al minimo l'interazione termica, per effetto di trasferimenti termici radiativi o conduttivi, tra le diverse linee e il volume loro circostante.

Una prima soluzione proposta per rispettare tale requisito prevedeva l'avvolgimento di MLI attorno a ciascuna delle linee TCS e CSS; nonostante l'eccellente isolamento termico garantito da questo approccio, un'analisi di trade-off sugli effetti di tale implementazione ha dimostrato come l'incremento di massa del modulo sarebbe stato eccessivo, anche considerando i benefici apportati dal punto di vista

del controllo termico. L'installazione di MLI è risultata inoltre difficoltosa dal punto di vista produttivo, in quanto le protezioni termiche avrebbero dovuto essere installate successivamente alla posa e al fissaggio alla struttura dei piping.

È stato dunque scelto di implementare una strategia leggermente meno efficace dal punto di vista termico ma più conservativa per quanto riguarda l'incremento di massa e di più semplice installazione: le linee sono avvolte da resistenze metalliche piatte, che fungono da caloriferi, poi nuovamente avvolte da uno strato di nastro adesivo Kapton con uno spessore di 1mm, per avvolgere i collegamenti elettrici dei caloriferi e, infine, da uno strato esterno di nastro a lamina metallica in alluminio, per garantire una buona conducibilità termica.

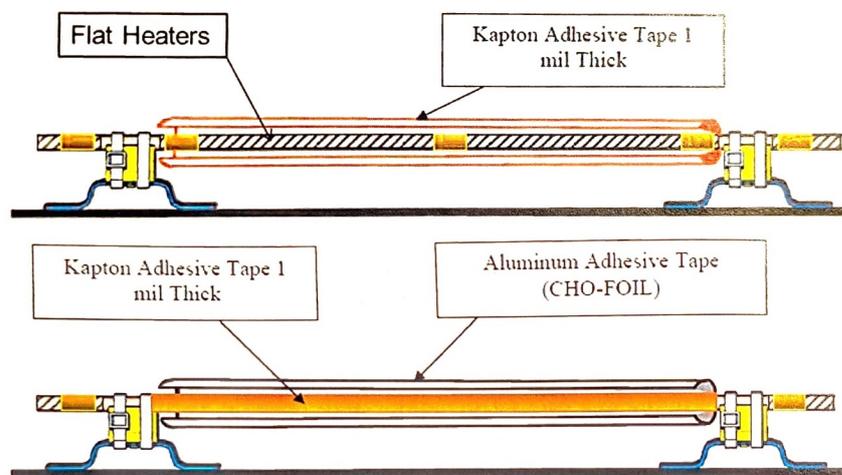


Figura 3.1: Controllo termico passivo piping

## 3.2 Analisi di trade-off

L'attuale progetto del sottosistema EATCS è il frutto di numerose analisi di trade-off effettuate durante la fase di design. Nei successivi paragrafi verranno affrontate nel dettaglio le fasi che hanno portato alla definizione di alcune delle scelte di design che sono successivamente state implementate nella configurazione attuale del sistema.

### 3.2.1 Scelta del fluido refrigerante

Per poter affrontare un'analisi di trade-off che culmini nella scelta del fluido refrigerante più adatto all'implementazione nel sottosistema EATCS del modulo

ESM-MPCV, occorre innanzitutto definire i vincoli dettati dai requisiti di funzionamento dello stesso, che andranno a determinare una lista di possibili candidati. In seguito, sono elencati i principali requisiti:

- Capacità di operare sull'intero range di temperatura: il fluido refrigerante non deve incorrere in ebollizione o congelamento durante tutte le fasi della missione, considerando sempre la condizione di funzionamento più critica; nel nostro caso, gli estremi di temperatura si presentano quando il modulo si trova in bassa orbita lunare durante un'eclissi lunare (193-328 K);
- Buone caratteristiche dal punto di vista del trasferimento termico, che comprendono un alto calore specifico, alta conducibilità termica, densità elevata e viscosità dinamica il più bassa possibile;
- Stabilità chimica e compatibilità chimica con i materiali costitutivi del sistema ATCS;
- Tossicità bassa o nulla;
- Non infiammabilità e incapacità di provocare esplosioni.

Il fluido non può inoltre essere una sostanza ozono lesiva o che provochi effetto serra se esposto all'atmosfera. Possibilmente, il fluido refrigerante ideale è, infine, di largo uso e quindi di facile reperimento.

Tra i requisiti elencati sono essenziali, per determinare una lista di possibili candidati, le caratteristiche termiche del fluido che possiamo per comodità raggruppare in un unico parametro, la *cooling effectiveness* o *efficacia di raffreddamento*:

$$CE \approx \frac{\rho c_p K}{\mu} \quad (3.21)$$

Dove  $\rho$  è la densità,  $c_p$  il calore specifico,  $K$  la conducibilità termica e  $\mu$  la viscosità dinamica. Più è elevata la *cooling effectiveness*, migliori sono le caratteristiche termiche del fluido considerato.

I fluidi refrigeranti presi in considerazione, considerando la *cooling effectiveness*, sono i seguenti:

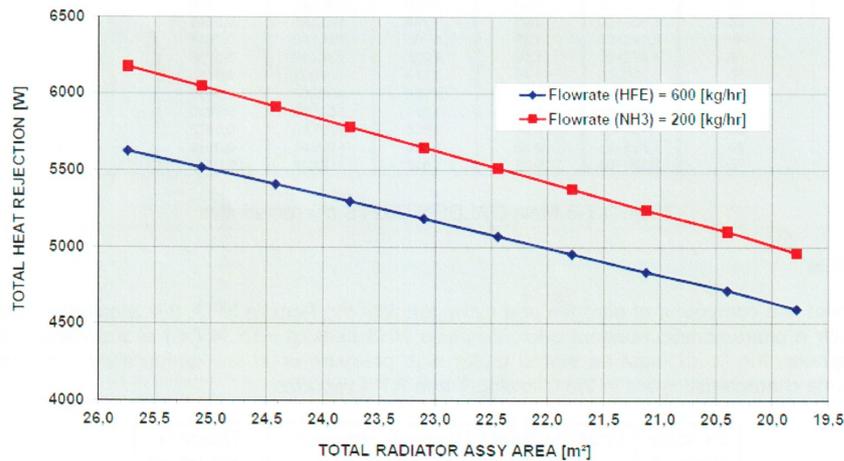
- Serie NOVEC™ HFE-7XXX;
- Fluorinert™ FC 84;
- Galden™ D 02/TS;
- Ammoniaca.

I fluidi della serie HFE-7XXX sono prodotti da 3M™ e fanno parte dei fluidi ingegnerizzati NOVEC™: questa serie è composta da refrigeranti incolori, insapori e caratterizzati da un odore poco intenso. La non tossicità e la sicurezza in termini clima-alteranti rendono la serie HFE-7XXX particolarmente adatta alla nostra applicazione. Nella seguente analisi di trade-off verranno presi in considerazione il HFE-7200 e il HFE-7600. Anche la serie Fluorinert™ è prodotta da 3M™ e presenta caratteristiche simili a quelle della serie NOVEC™. Questi fluidi refrigeranti hanno inoltre una buona compatibilità chimica con diversi materiali sensibili, ma sono caratterizzati da temperature di congelamento più elevate rispetto ai fluidi HFE-7XXX: l'unico della serie in grado di operare in tutto il range di temperatura durante l'intera missione è il Fluorinert™ FC 84. Galden™ D-02/TS è invece un fluido dielettrico per test di affidabilità elettronica, appartenente alla famiglia chimica dei poliesteri perfluorinati. Questo fluido è caratterizzato da un punto di ebollizione di 165°C e un punto di fusione di -97°C. È chimicamente e termicamente stabile, compatibile con metalli, ceramiche, plastiche ed elastomeri, e non è infiammabile né tossico. Non danneggia lo strato di ozono e ha un basso potenziale di riscaldamento globale. Grazie alle sue eccellenti proprietà dielettriche, è ideale per applicazioni come l'immersione di componenti elettronici e il raffreddamento diretto e indiretto. L'ammoniaca ( $NH_3$ ) è un fluido refrigerante tradizionalmente utilizzato nell'industria del freddo, noto con la sigla R-717. Grazie alle sue elevate capacità termiche, offre un'efficiente capacità di assorbire e trasferire calore. Tuttavia, l'ammoniaca è un gas tossico e infiammabile, e richiede dunque precauzioni speciali durante la manipolazione. Inoltre, la sua bassa temperatura di ebollizione (-33°C) a pressione atmosferica implica che per funzionare come mezzo di trasferimento termico deve essere mantenuta a pressioni molto elevate. La sua stabilità chimica la rende compatibile con vari materiali, ma è essenziale valutare attentamente la compatibilità con componenti sensibili. Nella seguente tabella sono indicate le caratteristiche termiche dei fluidi descritti e la loro *cooling effectiveness*, calcolata con la formula vista precedentemente:

Fluido	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c_p$ [J/kgK]	$K$ [W/mK]	$\mu$ [Pa · s]	$CE$ [J <sup>2</sup> /K · m <sup>4</sup> · s]
HFE-7200	1420	1220.0	0.0680	5.82e-4	2.024e8
HFE-7600	1540	1319.0	0.0710	1.69e-3	8.534e7
FC 84	1730	1100.0	0.0600	9.17e-4	1.245e8
D 02/TS	1782	957.79	0.0657	3.55e-3	3.159e7
NH <sub>3</sub>	600	4605.48	0.6100	2.30e-4	7.328e9

**Tabella 3.1:** Caratteristiche termiche e *Cooling Effectiveness* dei fluidi refrigeranti analizzati

Dai dati contenuti in tabella risulta chiaro come la *cooling effectiveness* di tutti i fluidi presi in considerazione sia di almeno un ordine di grandezza inferiore a quella dell'ammoniaca, che però non può essere la soluzione al nostro problema in quanto caratterizzata da un'elevata tossicità. L'alternativa che più si avvicina all'ammoniaca dal punto di vista dell'efficacia di raffreddamento è dunque il *NOVEC<sup>TM</sup> HFE-7200*. Vista la differenza di oltre un ordine di grandezza tra la *cooling effectiveness* dell'ammoniaca e quella del HFE-7200, è utile effettuare delle prove sperimentali per verificare, considerando un'applicazione pratica, quali sono le effettive differenze di performance. È stata quindi impostata un'analisi termica parametrica per testare le prestazioni dei due fluidi in un sistema controllato: il sistema scelto è il *Thermal Hydraulic Mathematical Model (THMM<sup>4</sup>)*, configurato per un calore proveniente dall'avionica del CM pari a 5,000 W. Nella Figura 3.2 qui sotto sono riportati i risultati dell'analisi termica effettuata, al variare della dimensione dell'assieme radiatore associato al TCS, considerando un flusso di massa pari a  $600 \text{ kg h}^{-1}$  nel caso in cui si utilizzi HFE-7200 come fluido refrigerante e pari a  $200 \text{ kg s}^{-1}$  nel caso invece si utilizzi ammoniaca.



**Figura 3.2:** Risultati analisi termica: calore dissipato in funzione dell'area effettiva del radiatore.

Risulta chiaro come l'ammoniaca sia decisamente superiore, in termini di prestazioni effettive, rispetto all'HFE-7200; se infatti consideriamo, come detto prima, un calore da dissipare pari a 5,000 W, il sistema TCS raggiunge le stesse prestazioni

<sup>4</sup>Il THMM è il modello matematico utilizzato per simulare gli scambi termici nella fase di dimensionamento durante la progettazione del sistema TCS del modulo ESM-MPCV.

con un'area effettiva del radiatore pari a rispettivamente 20 m<sup>2</sup> nel caso in cui si utilizzi ammoniacca, e 22 m<sup>2</sup> nel caso in cui si utilizzi HFE-7200.

Tenendo quindi a mente che la simulazione è stata effettuata considerando una portata di ammoniacca pari a un terzo rispetto a quella considerata per il HFE-7200, la decisione di progettare il sistema per funzionare con l'opzione meno efficiente richiede, oltre ad un incremento della massa del sistema determinato dalla maggiore area effettiva richiesta al radiatore, anche un ulteriore incremento di massa per l'adeguamento del sistema alla gestione di una maggior portata di fluido refrigerante. L'incremento di massa totale del sistema ATCS nella configurazione "HFE-7200" rispetto alla configurazione "NH<sub>3</sub>" è stato stimato a circa 45 kg<sup>5</sup>.

Se dal punto di vista termico l'ammoniaca sembra essere la scelta di gran lunga migliore, c'è un elemento non ancora considerato in questa analisi, che rende non conveniente l'utilizzo di questo fluido come mezzo di trasferimento termico: la pressione nominale operativa. L'ammoniaca, infatti, alle temperature raggiunte dal fluido refrigerante in determinate condizioni di funzionamento, richiede una pressione pari o superiore a 17 bar per rimanere allo stato liquido, molto superiore alla pressione massima di design vista nei paragrafi precedenti ( $MDP = 15.13$  bar).

Un adeguamento del sistema ATCS ad una pressione nominale di funzionamento così elevata porterebbe ad un inevitabile incremento della massa totale del sistema, rendendo meno rilevante l'incremento di prestazioni dal punto di vista termico. All'interfaccia CM-ESM sarebbe inoltre necessario rivedere l'intero sistema di *piping* per evitare che, per effetto delle cadute di pressione lungo il circuito, la sezione "calda" delle linee ATCS operi ad una pressione maggiore rispetto a quella "fredda", rischiando che si instauri un flusso inverso e che il calore non venga quindi smaltito, risultando in un danneggiamento dei sistemi avionici.

Infine, in determinate fasi della missione, considerando le incertezze nella misurazione della temperatura del fluido refrigerante, è possibile che esso raggiunga temperature vicino ai  $-80$  °C, inferiori quindi alla temperatura di congelamento dell'ammoniaca: per evitare un congelamento del fluido di trasferimento termico bisognerebbe dunque rivedere anche il design degli elementi riscaldanti implementati nell'insieme radiatore, incrementandone la potenza di funzionamento e quindi il calore generato.

Per le ragioni elencate, nonostante sia inferiore dal punto di vista dell'efficienza di raffreddamento, è stato ritenuto che il fluido refrigerante più adatto fosse il **HFE-7200**.

---

<sup>5</sup>Considerando di mantenere la  $MDP = 15.13$  bar.

### 3.2.2 Scelta della tipologia di radiatore

Il radiatore costituisce la parte del sistema TCS destinata alla dissipazione del calore prodotto dai sistemi avionici e trasportato dal fluido refrigerante. Inoltre, l'assieme radiatore fa parte del *Micrometeoroid and Debris Protection System* (MDPS) e costituisce quindi una protezione per il modulo contro piccoli detriti spaziali e meteoroidi che, durante la missione, potrebbero impattare con il velivolo e danneggiarlo; per questo motivo, come vedremo, il radiatore è separato dalla restante struttura del modulo e al di sotto di esso sono posizionati strati in Kevlar e MLI. La separazione del radiatore dal modulo permette ad esso di deformarsi in caso di impatto senza danneggiare la struttura sottostante, mentre gli strati in Kevlar permettono di raccogliere il detrito in caso di perforazione del radiatore e dissiparne la restante energia cinetica.

Durante la fase di progetto del sistema, sono state individuate due configurazioni differenti per l'assieme radiatore:

- **Plate / Stiffeners:** questa configurazione è la prima ad essere stata sviluppata durante la fase di progettazione preliminare ed è costituita, dal punto di vista strutturale, da una *skin* in lega Al-Cu con uno spessore di 2.06 mm rinforzata da elementi estrusi; la struttura esterna così realizzata è poi tenuta separata dal resto del modulo grazie all'implementazione di una serie di supporti metallici alti circa 100 mm.
- **Honeycomb:** a differenza della configurazione precedente, questa presenta un pannello *sandwich* in sostituzione alla *skin* metallica; il pannello è costituito da due *skin* in lega Al-Cu con uno spessore di 0.75 mm e da un *core* con struttura a nido d'ape in CR III 3/8-5056-.0007<sup>6</sup>. I supporti metallici sotto ai pannelli sono in questo caso alti circa 50 mm.

Sono poi state considerate due varianti delle configurazioni descritte, considerate "ottimizzate" dato che comportano una leggera diminuzione di peso per il radiatore:

- **Plate / Stiffeners optimized:** rispetto alla variante iniziale, questa presenta un minor numero di rinforzi estrusi (quattro invece che cinque);
- **Honeycomb optimized:** rispetto alla variante iniziale, le due *skin* hanno uno spessore di 0.7 mm.

Le due varianti comportano, rispettivamente, una riduzione di peso pari a 1.4 kg e 1.7 kg rispetto alle varianti iniziali.

---

<sup>6</sup>Fa parte delle leghe Al serie 5000 ed è caratterizzato da trattamenti superficiali che lo rendono un materiale adatto alla produzione di celle a parete sottile, con una buona resistenza alla corrosione.

La seguente analisi di trade-off affronterà il fattore strutturale, gli effetti delle due configurazioni sul sistema MDPS e aspetti legati alle prestazioni termiche delle due varianti. Verranno considerate le due versioni ottimizzate delle due configurazioni, tralasciando la parte di dimensionamento basata sui requisiti di funzionamento del modulo MPCV e del sistema TCS. I radiatori che andremo a confrontare saranno quindi da considerarsi ottimizzati al meglio per poter rispettare tutti i vincoli di design del modulo.

Dal punto di vista strutturale, la miglior implementazione dei pannelli *sandwich* a nido d'ape consiste nell'utilizzare un sandwich rinforzato per le aree di interfaccia con i supporti metallici: l'utilizzo di skin con uno spessore di 1 mm in tali zone permette di avere un pannello più resistente agli sforzi pur preservando un peso ridotto. A differenza della configurazione *Plate/Stiffeners*, dove la piastra e i condotti del fluido refrigerante sono prodotti per estrusione in un'unica fase, nel caso dell'Honeycomb il pannello va assemblato nelle sue parti (skin e core) mediante l'utilizzo di apposite sostanze collanti; questo implica che i condotti del fluido refrigerante vadano prodotti per estrusione separatamente e poi vincolati alle skin del pannello *sandwich*: questo rende la fabbricazione del pannello *sandwich* sicuramente più dispendiosa in termini temporali. Inoltre, il peso delle sostanze collanti, usate sia per il *bonding* tra le skin e il core, sia per quello tra le skin e i condotti fluidi, incrementa la massa dell'assieme radiatore in modo non trascurabile.

Supponendo di usare un film di REDUX 312L<sup>7</sup>, adesivo con densità  $\rho = 0.15$  kg/m<sup>2</sup>, e un'area occupata dalle skin pari a  $3.3m^2 \times 2skin$ , si ottiene un peso pari a:

$$m_{collante} = 0.15 \times (3.3 \times 2) = 0.99 \text{ kg}$$

Bisogna inoltre considerare che, per mantenere le diverse sezioni di *sandwich* connesse tra loro senza discontinuità strutturali, l'interfaccia tra la sezione rinforzata e quella standard del pannello è caratterizzata da un bagno di schiuma; la stessa cosa è realizzata per l'interfaccia tra i condotti per il fluido refrigerante e il core a nido d'ape. A questo scopo, si considera l'utilizzo di FM-490<sup>8</sup>, caratterizzato da una densità  $\rho = 1200$  kg/m<sup>3</sup>: il prodotto viene posato, con uno spessore minimo pari a  $2.5mm$  prima dell'espansione, attorno ai condotti per il fluido refrigerante ( $V_1 = A_1 t = 40.1 \times 0.037 \times 0.0025 = 3.71 \times 10^{-3} m^3$ ) e all'interfaccia tra le sezioni rinforzate e quelle standard ( $V_2 = 3A_2 t = 3 \times 1.82 \times 0.0508 \times 0.0025 = 6.93 \times 10^{-4} m^3$ ), per un incremento totale di massa pari a

$$m_{foam} = \rho(V_1 + V_2) = 5.27 \text{ kg}$$

---

<sup>7</sup>Il Redux 312L è un adesivo film epossidico ad alta resistenza, progettato per il bonding tra metalli e per la realizzazione di strutture sandwich, come i pannelli alveolari (honeycomb).

<sup>8</sup>Il FM-490 è una schiuma fenolica utilizzata come nucleo nei pannelli sandwich. La sua bassa densità e buona rigidità lo rendono ideale per applicazioni che richiedono leggerezza e robustezza.

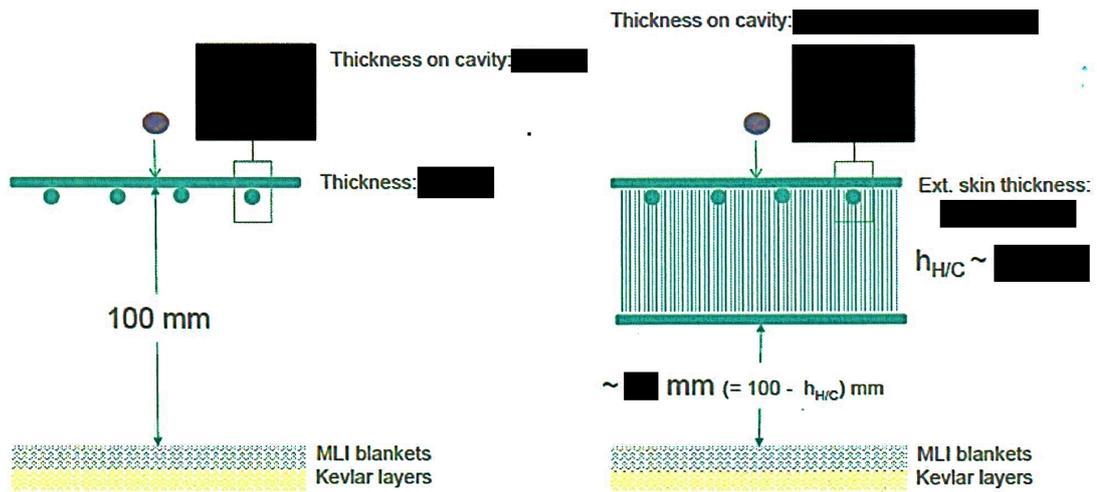
Considerando anche la massa dei supporti<sup>9</sup> necessari al fissaggio dei pannelli alla struttura del modulo (2kg) e un'incertezza sulla massa finale della schiuma stimata al 15%, si ottiene un incremento di massa, associato esclusivamente al collante per le skin e alla schiuma, pari a:

$$\Delta m = (0.99 + 5.27 + 2) \times 1.15 = 9.5 \text{ kg}$$

La configurazione *Plate/Stiffeners*, interamente estrusa, è caratterizzata da una massa totale stimata mediante l'utilizzo di FEM, pari a 50.7 kg, mentre la configurazione *Honeycomb* da una massa strutturale pari a 42.3 kg, a cui va aggiunta la massa appena calcolata, risultando quindi in una massa totale a vuoto pari a:

$$m_{\text{tot, H/C}} = 42.3 + 9.5 = 51.8 \text{ kg}$$

In conclusione, quindi, considerando le due configurazioni come equivalenti dal punto di vista della rigidezza strutturale, il radiatore costituito da pannelli *sandwich* risulta essere leggermente più pesante rispetto a quello estruso.



**Figura 3.3:** MDPS nelle due configurazioni: "Plate/Stiffeners" a sinistra, "Honeycomb" a destra. Questa immagine è stata volutamente oscurata in alcune delle sue parti in accordo con Thales Alenia Space, per limitare la fuoriuscita di dati sensibili dalla realtà aziendale.

Dal punto di vista dell'MDPS le due configurazioni sono simili, differendo geometricamente esclusivamente nella distanza tra il radiatore e lo strato di Kevlar

<sup>9</sup>Nella configurazione "Plate/Stiffeners", i supporti fanno parte della struttura completamente estrusa, e non vengono quindi contati nel mass budget.

e MLI (Figura 3.3). Il design dei condotti per il trasporto del fluido refrigerante è equivalente nelle due configurazioni, con l'unica differenza dettata dal fatto che nella configurazione "Plate/Stiffeners" questi sono estrusi come parte integrante del radiatore in un'unica lavorazione, mentre nel caso "Honeycomb" devono essere prodotti separatamente e successivamente vincolati alle *skin* del pannello.

In caso di impatto con meteoroidi o detriti orbitali, la prima linea di difesa del modulo è proprio la superficie esterna del radiatore; in questo frangente, lo spessore inferiore della *skin* del pannello *sandwich* (0.7 mm) rispetto a quello della piastra estrusa (2.06 mm), potrebbe comportare una minor efficacia nel potere d'arresto nei confronti di detriti. Quanto detto vale specialmente per gli impatti non troppo angolati rispetto alla superficie del radiatore. Se teniamo conto degli impatti obliqui, tuttavia, la presenza della struttura metallica a nido d'ape al di sotto della *skin* potrebbe fornire una protezione aggiuntiva dalla frammentazione dei detriti, favorendo la scelta della configurazione "Honeycomb".

Per stabilire quale delle due configurazioni è la più efficace complessivamente e la più adatta all'essere implementata come parte del MDPS, occorre però simulare gli impatti di diverse tipologie e dimensioni di detriti tenendo in considerazione anche la velocità di impatto degli stessi sul radiatore; a questo scopo, possiamo utilizzare le equazioni di "Schäfer - Ryan - Lambert"<sup>10</sup>: questo modello prevede il calcolo di un "diametro critico", definito come il diametro minimo di un detrito impattante, ad una determinata velocità, tale per cui il suo impatto provoca una perforazione dell'*inner wall* (costituito, nel caso di ESM-MPCV, dallo strato di Kevlar e MLI) senza alcuna frammentazione, e un conseguente danneggiamento delle componenti interne del modulo.

L'equazione che permette il calcolo del diametro critico è la seguente:

$$d_c(v) = \left[ \frac{\left( \frac{t_w^\alpha + t_b}{K_{3S}} \left( \frac{\sigma_{y,ksi}}{40} \right)^{1/2} + t_{ob} + K_{MLI} t_{eq,MLI} \right)}{0.6 \cdot \cos^\delta \theta \cdot \rho_p^{1/2} \cdot v^{2/3}} \right]^{18/19} \quad (3.22)$$

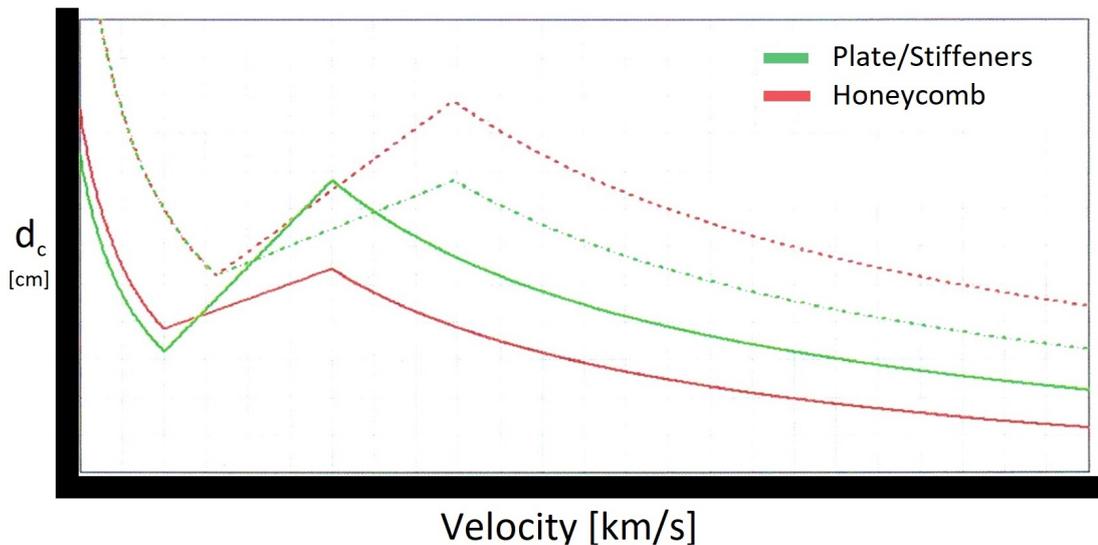
dove

$$t_{eq,MLI} = \frac{\rho_{AD,MLI}}{\rho_{ob}}$$

Implementando quindi questo modello matematico in MATLAB è possibile diagrammare l'andamento del diametro critico al variare della velocità di impatto del detrito sul radiatore, ottenendo una funzione utile quindi a stabilire quale delle configurazioni risulta più efficace in caso di impatto.

---

<sup>10</sup>[1]



**Figura 3.4:** Diametro critico al variare della velocità; le curve tratteggiate sono riferite a impatti con un angolo di  $45^\circ$ . Questa immagine è stata volutamente oscurata in alcune delle sue parti in accordo con Thales Alenia Space, per limitare la fuoriuscita di dati sensibili dalla realtà aziendale.

Ad un primo sguardo alla Figura 3.4 sembrerebbe che per gli impatti obliqui, come ipotizzato, la configurazione “Honeycomb” fornisca una maggior protezione dagli impatti con una velocità uguale o superiore a 4 km/s. Tuttavia, occorre sottolineare come l’accuratezza del modello usato non sia stata testata approfonditamente per gli impatti obliqui, rendendo quindi i risultati poco affidabili; inoltre, da un punto di vista puramente statistico, gli impatti con detriti orbitali sono più frequentemente quasi-ortogonali rispetto alla superficie del radiatore. Pertanto, la curva relativa agli impatti perpendicolari è sicuramente più rilevante statisticamente, oltre ad essere più accurata; osservando le curve continue, risulta chiaro come la configurazione “Plate/Stiffeners” sia decisamente più efficace ad arrestare detriti di medie dimensioni (0.35–0.75 mm), per velocità superiori a 4.25 km/s. Anche in questo caso, quindi, la configurazione interamente estrusa risulta essere la più opportuna.

Passiamo ora all’analisi sulle prestazioni termiche delle due configurazioni presentate. Come si può dedurre dal nome, il radiatore dissipa il calore attraverso l’irraggiamento, trasformandolo in radiazione elettromagnetica: da questo punto di vista ci interessa capire in che modo varia la quantità di calore irraggiato nei due casi, “Plate/Stiffeners” e “Honeycomb”. La differenza principale dal punto di vista termico, che può influenzare il calore irraggiato, è lo spessore della piastra metallica a contatto con l’ambiente esterno (della skin nel caso “Honeycomb”):

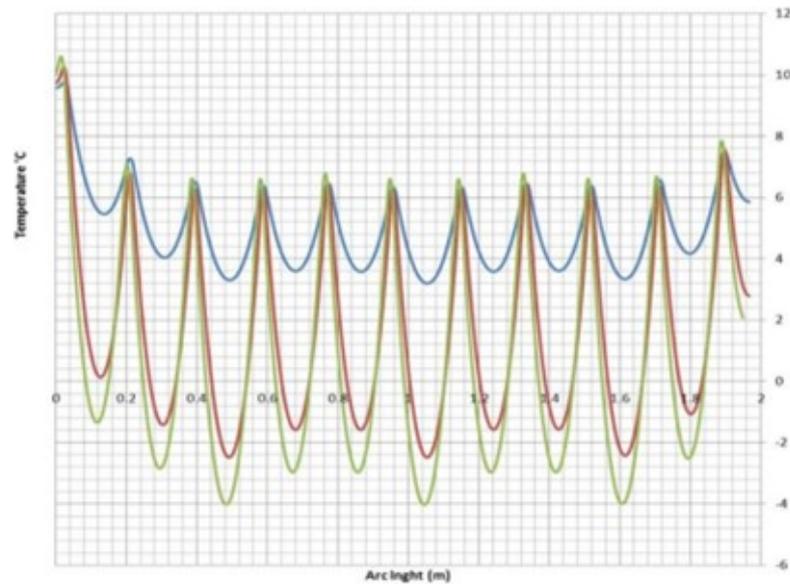
lo spessore ridotto della skin della configurazione a sandwich (0.7 mm) rispetto alla piastra estrusa (2.06 mm) potrebbe favorire l'incremento di temperatura della stessa, incrementando il calore irraggiato. Bisogna tuttavia tener conto che, a differenza del caso totalmente estruso, nel pannello sandwich il calore trasportato dal refrigerante all'interno del condotto a serpentina non può essere trasmesso per conduzione direttamente alla skin metallica, deve prima attraversare un medium intermedio costituito dalla colla utilizzata per fissare il condotto alla stessa skin. Essendo il film collante utilizzato costituito da una resina epossidica, non di certo un buon conduttore di calore, questa agisce come isolante e non permette l'instaurarsi di un abbondante flusso di calore. Per quantificare l'effetto negativo del film collante sulla trasmissione di calore si può simulare l'andamento della temperatura superficiale del radiatore nelle due configurazioni, lungo la direzione trasversale: peggiore sarà l'effetto dello strato resinoso, maggiore sarà la disomogeneità<sup>11</sup> tra le zone della superficie adiacenti ai condotti del fluido refrigerante e quelle non adiacenti. Per la seguente analisi, il layout della serpentina e la temperatura del refrigerante all'ingresso del radiatore sono le stesse per entrambe le configurazioni:

- Temperatura del fluido refrigerante a monte del radiatore: 20°C;
- Flusso di massa di fluido refrigerante attraverso la serpentina: 367 kg/h;
- Numero di avvolgimenti della serpentina nel radiatore: 15.

I risultati dell'analisi sono riportati nella 3.5. Risulta chiaro dal grafico che l'andamento della temperatura superficiale nella configurazione "Plate/Stiffeners" (curva blu) è molto più omogeneo rispetto alla configurazione "Honeycomb" (curva rossa per la versione "non ottimizzata" con skin spessa 0.75 mm e curva verde per la versione "ottimizzata" con skin spessa 0.7 mm), risultando dunque in un'efficienza radiativa più elevata: essendo questa crescente linearmente con l'area della superficie esterna del radiatore, per avere le stesse prestazioni in termine di calore dissipato nelle due configurazioni, occorrerebbe incrementare, nella configurazione "Honeycomb", l'area utile di una percentuale compresa tra 6-8%. Un incremento di area utile risulterebbe tuttavia in un aumento della massa del pannello, stimato intorno a 25 kg nella versione "ottimizzata". In conclusione, i risultati dell'analisi di trade-off hanno sottolineato come la configurazione totalmente estrusa sia la più opportuna dal punto di vista strutturale e termico, fornendo inoltre una maggior protezione da impatti diretti di meteoroidi e detriti orbitali a velocità superiori a 5.5 km/s. La configurazione "Honeycomb" comporta inoltre tempi di produzione

---

<sup>11</sup>Una superficie radiativa con una temperatura non omogenea ha un'efficienza radiativa bassa, dato che le zone più fredde emetteranno meno radiazioni e quindi contribuiranno meno alla dissipazione del calore.



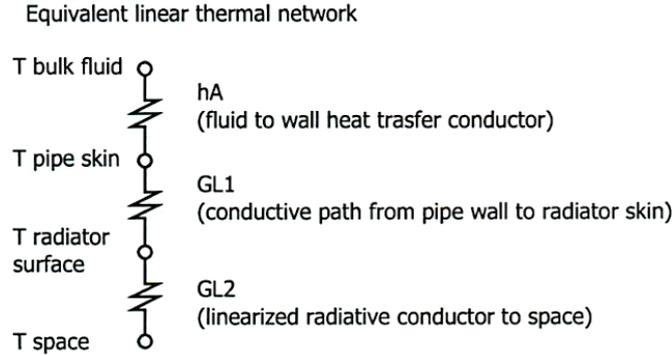
**Figura 3.5:** Andamento temperatura superficiale del radiatore, lungo la direzione trasversale.

più lunghi, in quanto richiede non solo una fase di estrusione per la produzione dei condotti per il fluido refrigerante, ma anche fasi per la produzione delle skin e del core e per la cura della resina usata per l’incollaggio e l’espansione della schiuma, risultando quindi in costi di produzione più elevati. Infine, l’incremento di peso dell’assieme radiatore dovuto alle inferiori prestazioni termiche del pannello sandwich, implicherebbe una rivalutazione del budget di massa associato al sistema TCS. Per i motivi elencati è stato quindi scelto di implementare la configurazione “Plate/Stiffeners”.

### 3.2.3 Scelta del design dei condotti fluidi

Per affrontare un’analisi di trade-off che porti alla scelta del design ottimale dei condotti fluidi per il sistema di raffreddamento del modulo ESM-MPCV, occorre definire con precisione i vincoli operativi e i requisiti termici e idraulici imposti dal profilo missione e dalla configurazione di funzionamento. In questa fase si è valutata l’adozione del design tradizionale basato su condotti cilindrici, confrontandolo con soluzioni alternative che prevedono l’impiego di condotti scanalati (grooved), finalizzati a migliorare il trasferimento termico mediante un maggior livello di turbolenza interna e, conseguentemente, un aumento del coefficiente di scambio termico.

In primo luogo, lo schema in Figura 3.6 della “Analysis Network” offre una



**Figura 3.6:** Suddivisione in resistenze termiche per la dissipazione del calore attraverso il radiatore (Analysis Network).

panoramica del percorso termico considerato, ipotizzando un tratto di tubo lungo 1 metro, con un flusso totale di 1031 kg/h, equivalente a circa 93.7 kg/h per ciascun canale. I parametri adottati, quali un diametro interno di 6.5 mm e un range operativo che varia da  $-110^{\circ}\text{C}$  a  $55^{\circ}\text{C}$ , sono stati scelti in funzione dei limiti imposti dalle condizioni ambientali e di funzionamento del sistema. Queste specifiche consentono di confrontare l'efficacia del trasferimento termico in relazione alla caduta di pressione indotta, evidenziando così il compromesso tra performance termiche e requisiti di potenza di pompaggio.

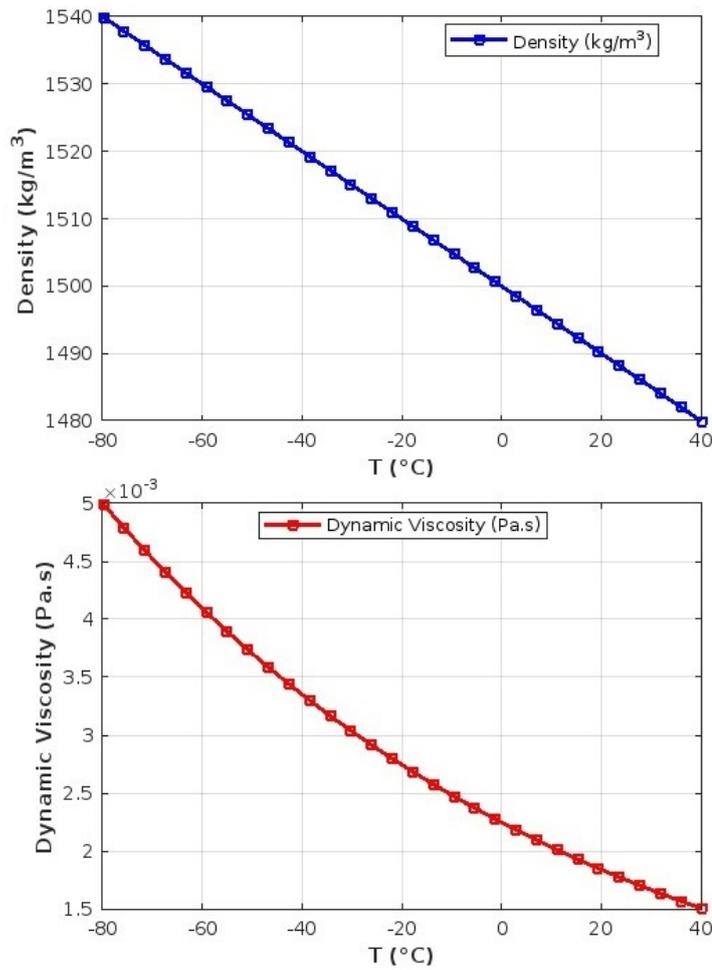
A questo proposito, le Figure 3.7 e 3.8 riportano l'andamento della densità, della viscosità dinamica, del coefficiente di scambio termico  $h$  e del numero di Reynolds al variare della temperatura del fluido. Da tali grafici emerge chiaramente come, in condizioni di temperatura più bassa, la densità del fluido tenda ad aumentare, mentre la viscosità dinamica si comporta in maniera meno lineare, influenzando direttamente il regime del flusso. In particolare, in regime laminare il valore di  $h$  si attesta attorno a 1.1 W/K, mentre in condizioni di flusso più turbolento, dovute all'aumento del numero di Reynolds a temperature più elevate,  $h$  può raggiungere valori fino a 24.75 W/K.

La valutazione è ulteriormente approfondita dal grafico in Figura 3.9, nella quale si confrontano, in funzione della temperatura, tre parametri fondamentali:  $hA$ , ovvero il prodotto tra il coefficiente di scambio termico e l'area di scambio;  $GL_1$ , conduttanza termica equivalente ricavata tramite un modello FEM dettagliato; e  $GL_2$ , il contributo radiativo linearizzato espresso dalla formula:

$$GL_2 = \sigma \varepsilon A T^3 \quad (3.23)$$

con  $\varepsilon = 0.9$  e area pari a  $0.121 \text{ m}^2$ .

Questo confronto evidenzia che, sebbene una configurazione con condotti scanalati possa teoricamente incrementare  $hA$ , il contributo radiativo rappresentato da  $GL_2$

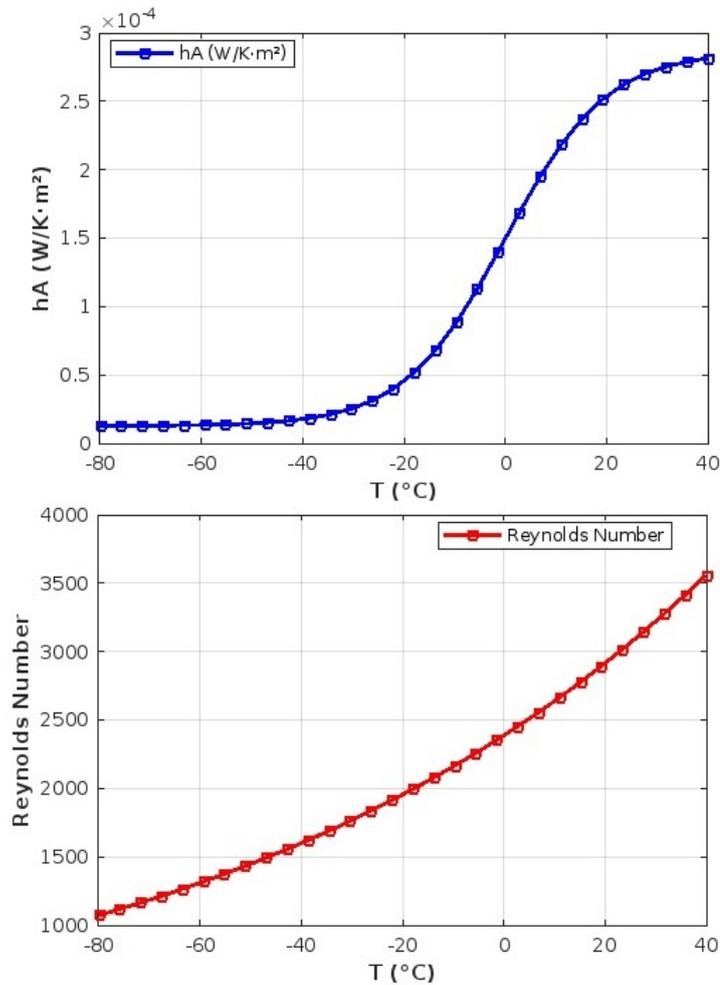


**Figura 3.7:** Andamento della densità e della viscosità dinamica con la temperatura.

rimane sostanzialmente invariato e, in molti casi, domina l'insieme delle resistenze termiche, soprattutto nelle condizioni operative più critiche. I dati presentati indicano chiaramente che la possibilità di ottenere un miglioramento sostanziale nel trasferimento del calore tramite una modifica geometrica è limitata dall'effetto predominante della resistenza radiativa.

Un ulteriore approfondimento si trova nella Figura 3.10, che illustra la ripartizione percentuale delle resistenze termiche. In questo grafico si evince come, a fronte di un potenziale aumento del coefficiente di scambio termico, la componente radiativa possa incidere per oltre l'70–80% della resistenza totale, indipendentemente dalle modifiche apportate alla geometria interna dei condotti.

Tale evidenza suggerisce che, pur migliorando localmente il trasferimento termico attraverso un incremento della tendenza a produrre turbolenze nel flusso mediante



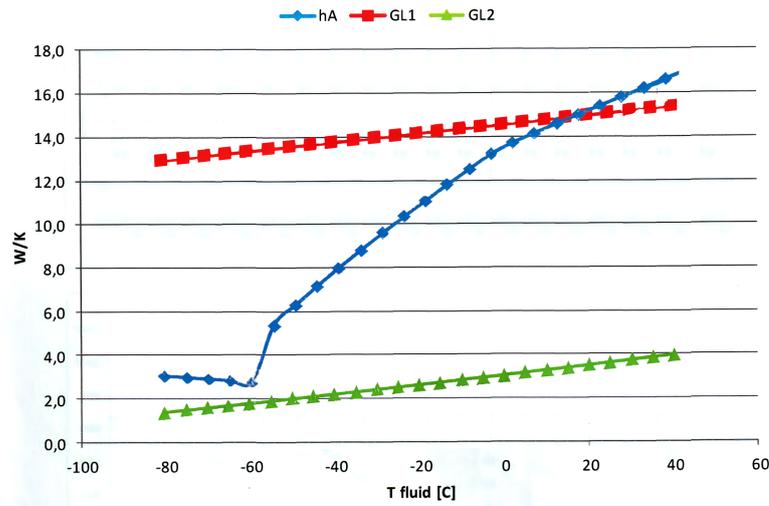
**Figura 3.8:** Andamento di  $hA$  e del numero di Reynolds con la temperatura.

scanalature, il beneficio complessivo risulta marginale, mentre l'incremento della caduta di pressione è rilevante. Dal punto di vista idraulico, la caduta di pressione nei condotti è fortemente correlata all'aumento del perimetro bagnato e al conseguente incremento del fattore di attrito. La relazione:

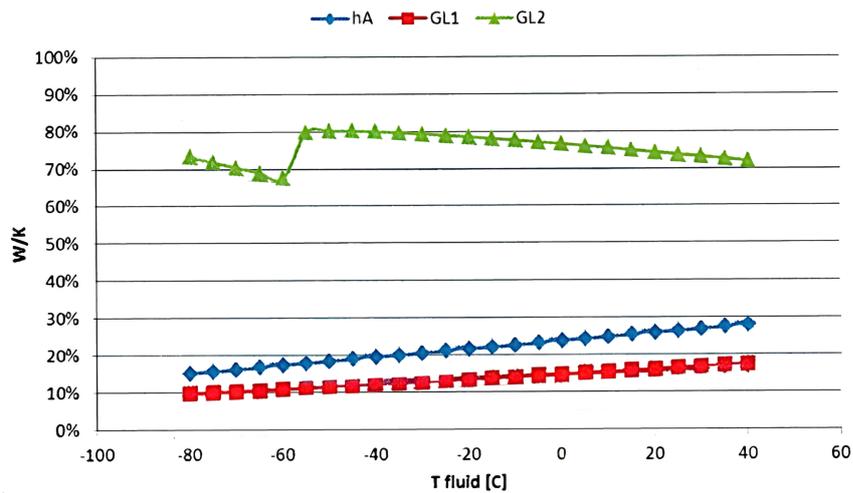
$$\Delta P \propto f \cdot P_b \quad (3.24)$$

evidenzia come l'introduzione di scanalature, pur mantenendo invariata l'area di flusso, comporti un incremento sia del perimetro bagnato  $P_b$  che del livello di turbolenza  $f$ , determinando così una penalizzazione significativa in termini di pressione persa e, di conseguenza, di potenza di pompaggio richiesta.

Considerando che il sistema opera in regime monofase e che l'obiettivo primario è mantenere i requisiti di efficienza energetica e di affidabilità, l'adozione di



**Figura 3.9:** Confronto fra le conduttanze termiche nella Analysis Network in funzione della temperatura.



**Figura 3.10:** Ripartizione percentuale delle resistenze termiche nella Analysis Network in funzione della temperatura.

condotti scanalati risulta poco vantaggiosa. Il potenziale miglioramento termico è ampiamente compensato – e addirittura superato – dall’aumento della resistenza idraulica e dalle complicazioni tecnologiche e produttive associate. Di conseguenza, si conferma la scelta del profilo cilindrico come soluzione basale, in grado di garantire prestazioni termiche accettabili senza compromettere l’efficienza idraulica e la semplicità costruttiva del sistema.

In sintesi, l'analisi complessiva, supportata dai dati sperimentali e dai modelli numerici, porta a concludere che le modifiche geometriche finalizzate ad aumentare il coefficiente di scambio termico non risultano giustificate a fronte delle penalizzazioni in termini di caduta di pressione e potenza di pompaggio. Pertanto, la scelta più opportuna per il sistema di raffreddamento del modulo ESM-MPCV rimane quella di adottare condotti cilindrici, che offrono un compromesso ottimale tra prestazioni termiche e requisiti idraulici, senza introdurre complicazioni produttive e un onere energetico non giustificato.

### 3.2.4 Scelta dell'architettura dei Cold Plates per il raffreddamento avionico

Un'analisi di trade-off è stata condotta al fine di valutare la correttezza e l'efficacia dell'architettura attualmente definita per il ramo di cold plates dell'Active Thermal Control System (ATCS) dell'European Service Module (ESM), incaricato del raffreddamento dei carichi avionici. La configurazione attualmente baselined prevede una disposizione full serial delle cold plates (vedi Figura 3.12), ed è stata confrontata con una soluzione alternativa caratterizzata da una distribuzione full parallel (vedi Figura 3.11).

Nel primo scenario, è stato considerato un cluster di quattro cold plates di dimensioni  $400 \times 400$  mm, ciascuna sottoposta a un carico termico costante di 217 W e con un flusso totale di 250 kg/h, equamente suddiviso tra le unità. In un secondo scenario, più affine alla precedente configurazione ATCS, il cluster è composto da nove cold plates, ognuna associata ai carichi termici dei box attivi dell'ESM, mantenendo invariato il flusso complessivo. Queste configurazioni consentono di analizzare in modo comparativo le prestazioni termoidrauliche e le implicazioni sulla progettazione complessiva.

L'analisi termoidraulica, sviluppata mediante COMSOL Multiphysics 4.4, ha permesso di accoppiare un modello agli elementi finiti per la diffusione del calore con un modello idraulico 1-D per la dinamica del fluido nei canali delle cold plates. Tale approccio integra anche le resistenze termiche di contatto tra il tubo in acciaio e la matrice in alluminio, nonché tra la superficie della cold plate e la baseplate dell'avionica. I risultati ottenuti evidenziano che, passando a una configurazione parallela, la riduzione della velocità del fluido all'interno dei canali determina un decremento del coefficiente di scambio termico, comportando un aumento significativo della temperatura delle baseplate. Inoltre, una riduzione del diametro dei canali, ipotizzata per aumentare la velocità del flusso, risulta inefficace in quanto diminuisce l'area di scambio e incrementa la caduta di pressione locale, aggravando ulteriormente il problema.

Parallelamente, la distribuzione spaziale dei box termicamente attivi sull'ESM impone una particolare attenzione alla complessità della rete di piping: una configurazione parallela, infatti, comporterebbe un notevole aumento della complessità del sistema, vanificando gli sforzi di riduzione della massa e semplificazione strutturale intrapresi.

Per queste ragioni, la configurazione full serial si conferma come la soluzione più equilibrata, in grado di garantire un trasferimento termico adeguato e una gestione ottimale del flusso di refrigerante, senza incorrere negli oneri energetici e strutturali associati alla soluzione parallela. Tale scelta permette di mantenere un design coerente con i requisiti del sistema ATCS, assicurando prestazioni affidabili e una maggiore semplicità di integrazione nella rete di piping complessiva.

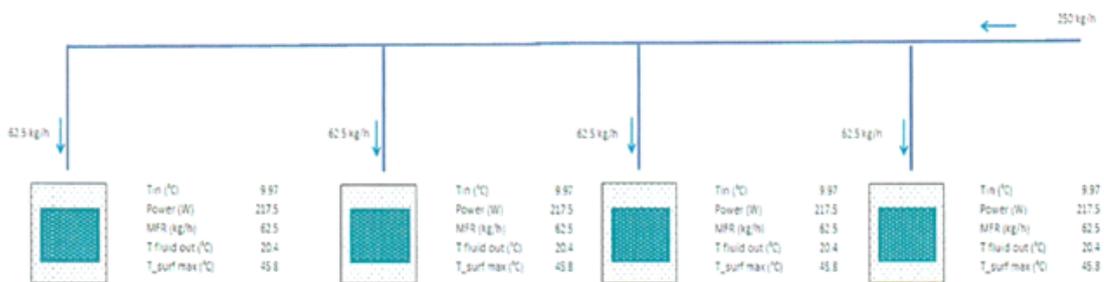


Figura 3.11: Architettura full-parallel.

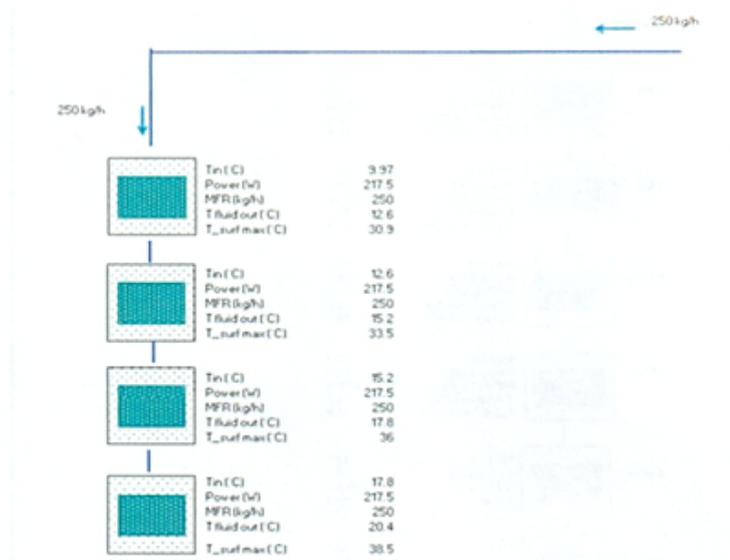


Figura 3.12: Architettura full-serial.

### 3.2.5 Scelta dell'architettura dell'assieme radiatori

Per affrontare un'analisi di trade-off finalizzata alla scelta della miglior architettura per i radiatori del sistema TCS del modulo ESM-MPCV, è necessario definire sin da subito i vincoli imposti dai requisiti di dissipazione del calore e di potenza elettrica, dal budget di massa e, infine, dalla complessità della rete di piping. L'obiettivo è individuare la configurazione che, bilanciando tali aspetti, garantisca prestazioni termiche ottimali senza superare i limiti imposti dal budget e senza compromettere l'efficienza operativa dell'intero sistema.

Il processo di valutazione è stato articolato in più fasi. In un primo momento è stato sviluppato un modello termoidraulico locale dei radiatori, programmato in COMSOL Multiphysics, per studiare in dettaglio le prestazioni termiche dei diversi raggruppamenti di radiatori. Successivamente, l'analisi è stata estesa a livello di sistema mediante il modello THMM, implementato in SINDA, che integra le perdite lungo la rete di piping e tiene conto della variazione delle proprietà del fluido con la temperatura. Quest'approccio consente di valutare, in maniera sistematica, l'impatto complessivo delle configurazioni scelte sul comportamento idraulico e termico dell'ATCS.

Sono state esaminate tre differenti configurazioni del gruppo radiatori:

- Configurazione A – Full Parallel a 1000 kg/h;
- Configurazione B – Ibrida;
- Configurazione C – Full Serial a 1000 kg/h.

Nella configurazione A, tutti i radiatori sono disposti in parallelo, con il fluido refrigerante in ingresso al cluster fissato a 20 °C e suddiviso equamente tra i rami. Tenendo in considerazione quanto detto, per garantire una distribuzione uniforme del flusso, ciascun ramo deve presentare la medesima resistenza idraulica. Tale condizione impone l'utilizzo di appositi flow restrictors oppure la connessione di radiatori opposti, in modo da compensare le variazioni di viscosità del refrigerante dovute a condizioni radiative non omogenee, tipiche delle fasi lunari. Sebbene questa strategia consenta di mantenere una temperatura uniforme lungo l'intero sistema, essa determina una rete di piping estremamente complessa, con conseguente incremento della massa e dei costi produttivi.

La configurazione B rappresenta, invece, una soluzione ibrida che prevede la suddivisione del gruppo radiatori in tre rami paralleli, ciascuno formato da due assiemi radiatori disposti in serie, per un flusso totale di 1000 kg/h. L'approccio ibrido permette di ottenere un buon compromesso tra la distribuzione uniforme del flusso e l'efficienza del trasferimento termico; tuttavia, non elimina le criticità dovute alla complessità del routing dei tubi, rendendo necessario l'impiego di

componenti aggiuntivi per garantire l'equilibrio idraulico e la corretta divisione del flusso.

La configurazione C, infine, presenta radiatori disposti in serie lungo un unico percorso. Sebbene tale architettura comporti un incremento della caduta di pressione lungo il percorso del fluido, risultando quindi in una maggiore potenza richiesta al FPP<sup>12</sup>, essa offre vantaggi rilevanti in termini di dissipazione del calore per irraggiamento. L'assenza di rami paralleli elimina la necessità di restrictors, semplificando notevolmente il routing dei tubi e consentendo una riduzione della massa complessiva del sistema.

Configurazione	Potenza termica dissipata [W]	$\Delta\%$ Potenza dissipata rispetto a old baseline
A	5849	-37%
B	8056	0%
C	8331	+4.6%

**Tabella 3.2:** Risultati analisi sulle configurazioni A, B e C.

Le simulazioni sono state eseguite considerando come condizioni operative una temperatura in ingresso del fluido pari a 20 °C e un "thermal sink" per ogni assieme radiatori fissato a -110 °C. Queste condizioni, studiate per rappresentare il caso limite di esercizio, hanno permesso di confrontare in maniera accurata le prestazioni termiche delle diverse architetture. I risultati ottenuti, sintetizzati nella Tabella 1, mostrano come la variazione percentuale di potenza dissipata per la Configurazione C risulta pari a +4.6% rispetto alla old baseline, un incremento che, seppur contenuto, evidenzia l'efficacia termica della soluzione full-serial, che consente contemporaneamente di semplificare la rete di tubazioni, contribuendo così a una significativa riduzione della massa del sistema.

Un aspetto cruciale dell'analisi riguarda la valutazione della caduta di pressione lungo l'intero ATCS; a tale scopo, il modello THMM integra le caratteristiche reali dei tubi come, ad esempio, lunghezza, rugosità interna e perdite locali dovute a interfacce e raccordi a T. In Figura 3.13 sono riportati i risultati delle simulazioni eseguite, che mostrano l'andamento delle cadute di pressione all'interno del sistema ATCS in funzione del flusso di massa di fluido refrigerante. Dal grafico riportato è possibile dedurre che le perdite di pressione crescono con un andamento quasi-quadratico all'aumentare del flusso di massa: questo è dovuto all'effetto dell'attrito viscoso a parete che, specialmente in presenza di giunzioni a T, è il fattore più preponderante in termini di effetti sulla pressione.

<sup>12</sup>"Fluid Pump Package", acronimo che si riferisce all'assieme pompa responsabile della circolazione del fluido refrigerante.



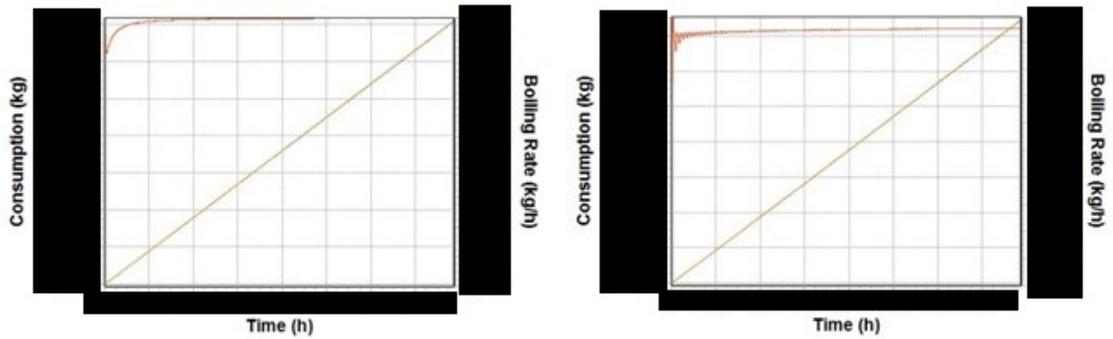
**Figura 3.13:** Caduta di pressione in funzione del flusso di massa. Questa immagine è stata volutamente oscurata in alcune delle sue parti in accordo con Thales Alenia Space, per limitare la fuoriuscita di dati sensibili dalla realtà aziendale.

Un ulteriore aspetto oggetto di approfondimento riguarda l'influenza dell'assetto (attitude) della navicella sulla performance del gruppo radiatori. L'analisi attitudinale ha valutato diverse possibili configurazioni per il routing del fluido attraverso il cluster di radiatori, considerando lo scenario di massimo carico termico caratterizzato da elevati flussi solari. I risultati, illustrati nelle Figure 3.14–3.16, hanno evidenziato che, sebbene la configurazione full serial mostri oscillazioni maggiori nelle temperature in ingresso e uscita dei singoli radiatori, il comportamento medio del sistema risulta meno sensibile alle variazioni dell'angolo d'incidenza dei flussi radiativi. Questo effetto smorzante, dovuto al percorso continuo del fluido, contribuisce a garantire un'efficienza termica stabile anche in presenza di condizioni ambientali variabili.

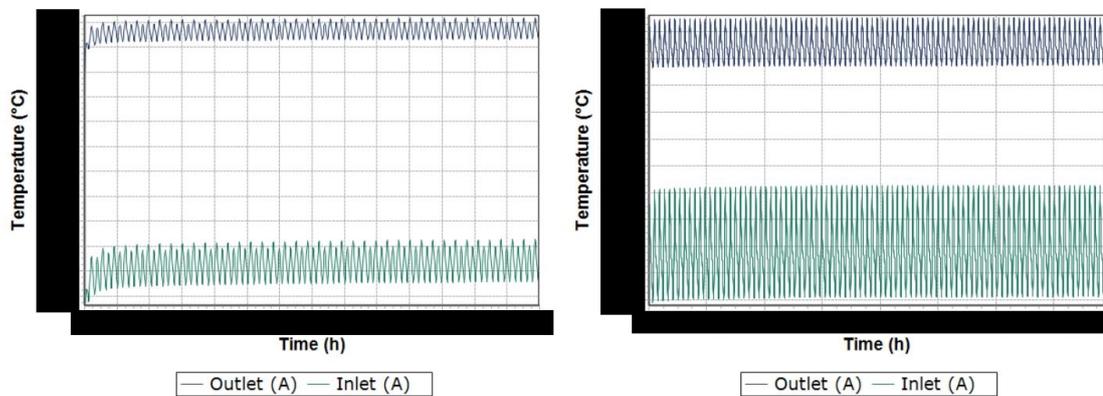
Dal punto di vista della massa del sistema ATCS, inoltre, l'implementazione di una configurazione full serial comporta rilevanti vantaggi in termini di riduzione della massa complessiva e semplificazione del routing dei tubi, riducendone la lunghezza totale, il numero di giunzioni necessarie ed eliminando la complessità produttiva derivante dalla divisione del flusso in più rami (escludendo l'impiego di flow restrictors). Questo approccio consente di ottenere una riduzione stimata della massa del sistema pari a circa 30 kg rispetto alla configurazione B ibrida, elemento determinante per il rispetto dei vincoli di massa imposti dal progetto del modulo ESM.

In conclusione, pur comportando un leggero incremento della caduta di pressione e una maggiore richiesta di potenza al FPP, i vantaggi in termini di maggiore dissipazione del calore per irraggiamento, semplificazione della rete di tubazioni

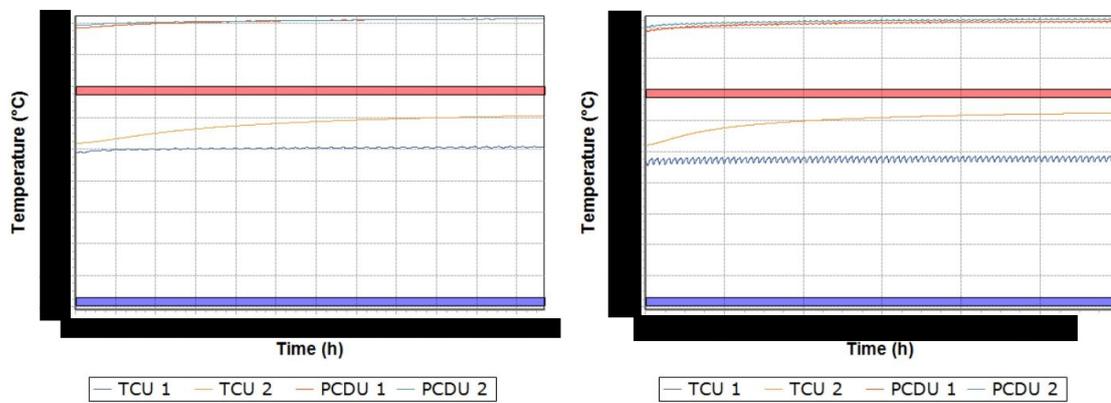
e riduzione della massa complessiva risultano determinanti. Inoltre, la soluzione full serial si dimostra meno sensibile alle variazioni dell'assetto della navicella, garantendo una stabilità termica maggiore in condizioni operative critiche. Pertanto, l'analisi di trade-off condotta evidenzia che la configurazione full serial per l'assieme radiatori rappresenta la soluzione ottimale.



**Figura 3.14:** Prestazioni del radiator cluster, in termini di  $\text{NH}_3$  boiling rate, considerando funzionamento nominale e worst hot case; a sinistra configurazione full-parallel e a destra full-serial. Questa immagine è stata volutamente oscurata in alcune delle sue parti in accordo con Thales Alenia Space, per limitare la fuoriuscita di dati sensibili dalla realtà aziendale.



**Figura 3.15:** Prestazioni del radiator cluster, in termini di temperatura all'inlet e all'outlet del cluster di radiatori, considerando funzionamento con un circuito guasto e worst hot case; a sinistra configurazione full-parallel e a destra full-serial. Questa immagine è stata volutamente oscurata in alcune delle sue parti in accordo con Thales Alenia Space, per limitare la fuoriuscita di dati sensibili dalla realtà aziendale.



**Figura 3.16:** Prestazioni del radiator cluster, variazione della temperatura delle TCU e PDU, considerando funzionamento con un circuito guasto e worst hot case; a sinistra configurazione full-parallel e a destra full-serial. Questa immagine è stata volutamente oscurata in alcune delle sue parti in accordo con Thales Alenia Space, per limitare la fuoriuscita di dati sensibili dalla realtà aziendale.

# Capitolo 4

## Progettazione del sistema CSS

### 4.1 CSS: Linee ad alta pressione

Le linee ad alta pressione sono destinate al caricamento dell'azoto e dell'ossigeno nei serbatoi, della distribuzione degli stessi gas nel primo tratto di NDS e ODS prima dei regolatori di pressione, e della linea che passa attraverso il CM per arrivare al GSE. Tenendo conto dei requisiti elencati nel paragrafo precedente si sceglie di utilizzare un diametro pari a  $13.09mm$  per la parte di piping ad alta pressione. Immaginando di utilizzare una lega Ti-Al-V di grado 5, con una tensione di snervamento pari a  $621MPa$  e considerando un fattore di sicurezza pari a 5.0, si può usare la seguente formula per calcolare lo spessore del piping, partendo dalla formula di tensione equivalente di Tresca:

$$\sigma_{eq,T} = |\sigma_{\theta} - \sigma_r| = \frac{2}{1 - \beta^2} p_i \quad (4.1)$$

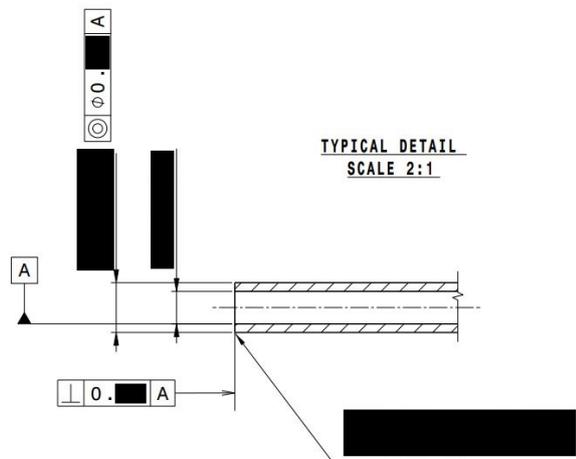
Dove  $\beta = \frac{D_i}{D_e}$  è il rapporto tra il diametro interno e quello esterno,  $\sigma_{\theta}$  e  $\sigma_r$  sono le tensioni circonferenziale e radiale dovute alla pressione interna al piping  $p_i$ ; si può quindi esplicitare il rapporto tra i diametri e ricavare lo spessore:

$$t = \frac{D_e}{2} (1 - \beta) \quad (4.2)$$

Ottenendo infine uno spessore pari a  $1.77mm$ ; lo spessore reale dei tubi è tuttavia pari a  $1.71mm$ : la differenza tra il valore calcolato e quello reale, seppur minima, è molto probabilmente causata da prestazioni meccaniche leggermente differenti per il materiale utilizzato, oppure dalla convenzione utilizzata per ricavare la tensione equivalente.

Il procedimento matematico appena svolto si adatta sia al NDS che al ODS, ma la presenza di ossigeno prevede l'utilizzo di un materiale molto resistente contro l'ossidazione; si è scelto quindi di utilizzare, in alternativa alla lega Ti-Al-V, l'acciaio inossidabile 15-5 PH, con una tensione di snervamento compresa tra  $725MPa$  e  $795MPa$ . Questo acciaio ha un ulteriore vantaggio rispetto alla lega Ti-Al-V descritta precedentemente, ovvero elevate prestazioni meccaniche anche in ambienti a basse temperature.

Considerando poi la natura decisamente non inerte dell'ossigeno gassoso, per la linea ad alta pressione del ODS si sceglie un fattore di sicurezza più elevato rispetto a quello utilizzato per NDS, pari a 8, ottenendo lo spessore di design:  $2.27mm$ .



**Figura 4.1:** Sezione piping ad alta pressione. Questa immagine è stata volutamente oscurata in alcune delle sue parti in accordo con Thales Alenia Space, per limitare la fuoriuscita di dati sensibili dalla realtà aziendale.

Affrontiamo a questo punto la definizione dell'architettura del sistema, introducendo la discussione con i requisiti funzionali da soddisfare; i requisiti:

- È richiesta la ridondanza delle linee NDS e ODS dirette dal ESM al CM, e ogni linea di distribuzione deve poter essere isolata attraverso la chiusura di apposite valvole di cut-off;
- Il tempo di completo azionamento delle valvole di cut-off non deve superare un tempo pari a  $687ms$ ;
- Il sistema di monitoraggio automatico dei guasti deve essere in grado di fornire dati sul corretto funzionamento del CSS in maniera continua durante tutta la missione;

ci permettono di cominciare a definire l'architettura delle linee ad alta pressione. Nei prossimi paragrafi si andrà ad analizzare la configurazione di MPCV sviluppata per le missioni lunari.

#### 4.1.1 Sottosistema distribuzione azoto: NDS 1

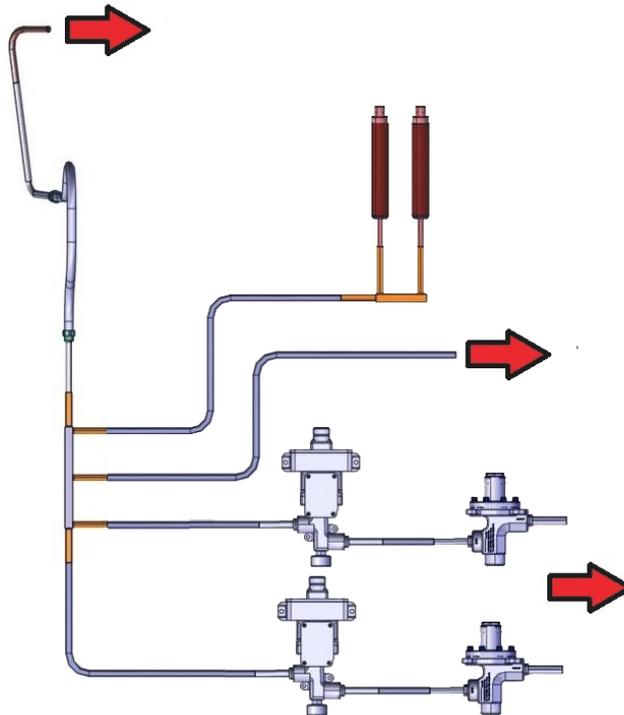
La prima linea che andremo ad analizzare è anche l'unica ad alta pressione facente parte del sistema NDS in configurazione "lunare". NDS 1 congiunge il serbatoio di azoto con le due linee a bassa pressione attraverso i corrispondenti regolatori di pressione. Il collegamento al serbatoio è effettuato mediante un tubo flessibile, dotato di un collegamento filettato (Dynatube) per permettere una rapida sostituzione della linea o del serbatoio in caso di guasto. Il gas uscente dal serbatoio incontra poi una prima ramificazione: l'azoto può dirigersi direttamente verso il GSE, oppure proseguire verso un'ulteriore ramificazione nelle due linee, gemelle per ridondanza, a bassa pressione. L'interfaccia tra la linea ad alta pressione e quella a bassa pressione è, come già detto precedentemente, costituita da un regolatore di pressione; inoltre, per rispettare il requisito di isolabilità delle singole linee, è necessario che ognuno dei due tratti che si congiungono alle linee a bassa pressione presentino una valvola di cut-off, da azionare in caso di guasto.

Data la presenza di un requisito che richiede la presenza di almeno due percorsi di acquisizione dati a scopo di monitoraggio, si sceglie di inserire in NDS 1 tre sensori di pressione: due al livello del serbatoio di azoto, e uno dopo la seconda ramificazione, prima della valvola di cut-off.

#### 4.1.2 Sottosistema distribuzione ossigeno: ODS 1A

La linea ODS 1A è la linea ad alta pressione del sottosistema di distribuzione dell'ossigeno con il maggior numero di ramificazioni: in condizioni nominali le valvole di cut-off sono chiuse, quindi il gas fluisce direttamente dal serbatoio di ossigeno al GSE, e verso il CM attraverso una delle due linee a bassa pressione; quando le valvole sono aperte, le linee ad alta pressione sono tra loro completamente comunicanti, e i tre serbatoi possono svuotarsi equamente facendo fluire il gas verso una o entrambe le linee a bassa pressione, a seconda dell'impostazione delle due valvole di cut-off nominalmente aperte prima dei regolatori di pressione. Per garantire l'isolabilità delle singole linee, come nel caso precedente, l'interfaccia tra le varie linee è costituita da una valvola di cut-off. Inoltre, l'unica via di collegamento tra il GSE e i serbatoi di ossigeno passa attraverso questa linea.

Per rispettare il medesimo requisito indicato nel paragrafo precedente, anche in questo caso la linea è dotata di due sensori di pressione connessi a livello del tank, in modo che il sistema di acquisizione per il monitoraggio del corretto funzionamento



**Figura 4.2:** Rappresentazione CAD linea NDS 1.

del sistema abbia un livello maggiore di affidabilità data dalla ridondanza dei sensori.

### 4.1.3 Sottosistema distribuzione ossigeno: ODS 1B e 1D

In questo paragrafo verranno descritte le ultime due linee ad alta pressione del sottosistema di distribuzione dell'ossigeno. Le linee ODS 1B e 1D sono funzionalmente quasi equivalenti: la prima collega il corrispondente tank a ODS 1A, mentre la seconda collega il corrispondente tank a ODS 1A e al CM attraverso una delle due linee a bassa pressione. Azionando le valvole di cut-off nominalmente chiuse è possibile far comunicare ODS 1B e 1D anche con l'altra linea a bassa pressione, attraverso ODS 1A. Ciascuna delle due linee in esame è dotata di un sensore di pressione

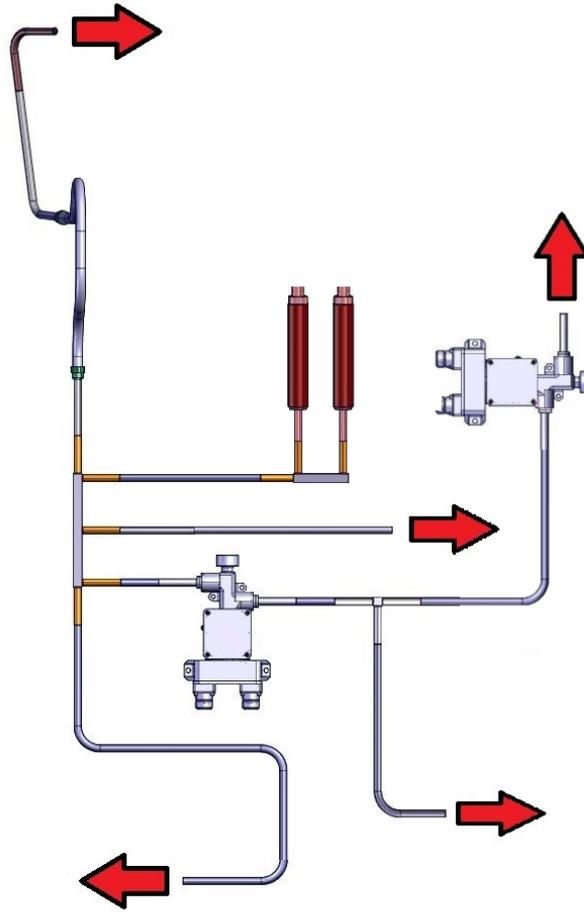
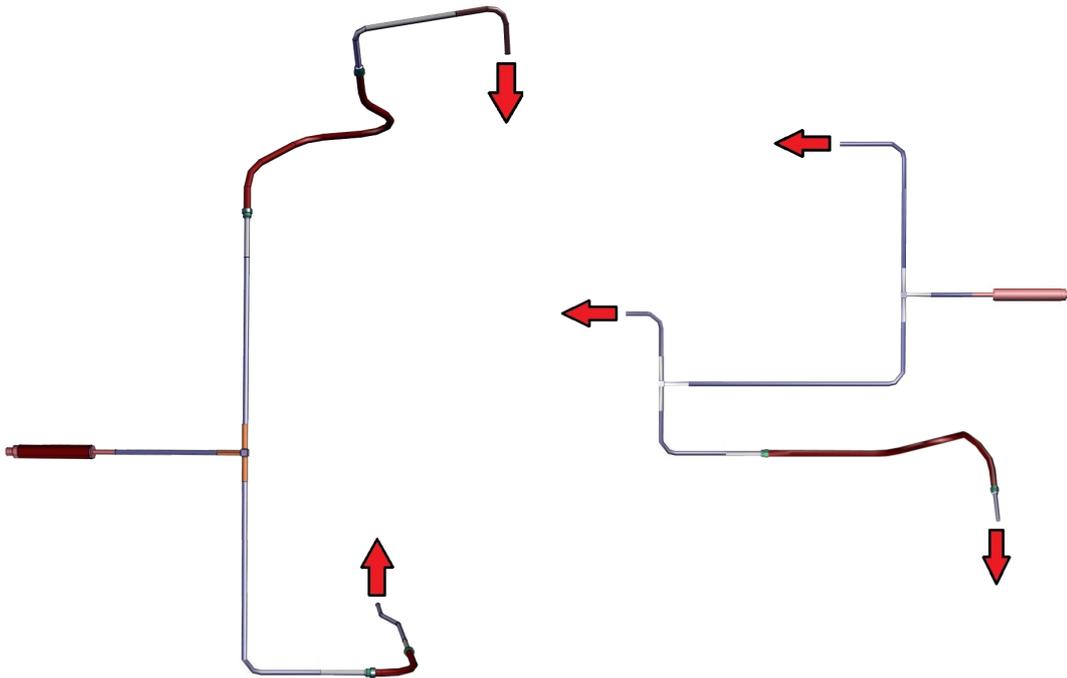


Figura 4.3: Rappresentazione CAD linea ODS 1A.

## 4.2 CSS: Linee a bassa pressione

Le linee a bassa pressione hanno la funzione di fornire al CM le giuste quantità di azoto e ossigeno per la produzione di aria respirabile, a seguito del loro mescolamento, e di acqua potabile, per soddisfare le esigenze della crew. Le linee GDS saranno quindi collegate a monte alle corrispondenti linee ad alta pressione, attraverso i regolatori di pressione visti nei paragrafi precedenti, e a valle al Crew Module attraverso il sistema di condizionamento dell'aria; in particolare, il sottosistema di distribuzione dell'azoto include due linee indipendenti responsabili della tenuta in pressione dei serbatoi di acqua potabile, per garantire il corretto funzionamento del WDS.

I requisiti per la progettazione delle linee di distribuzione dei gas a bassa pressione



**Figura 4.4:** Rappresentazione CAD linee ODS 1B (sinistra) e 1D (destra).

prevedono l'utilizzo di acciaio inossidabile 15-5PH per la fabbricazione dei piping e un diametro pari a 17.4 mm per le linee ODS e NDS 2 e 12, 13.1 mm per le restanti linee NDS, ma non forniscono nessun vincolo riguardo lo spessore delle pareti dei tubi; verranno quindi calcolati i fattori di sicurezza utilizzati nella progettazione di ognuna delle linee a bassa pressione a partire dallo spessore reale scelto dagli ingegneri progettisti nello sviluppo di questi sistemi: 0.9 mm per le linee ODS e NDS 2 e 12, 2.27 mm per le restanti linee NDS.

A questo scopo possiamo utilizzare un semplice codice MATLAB che implementa un algoritmo in grado di approcciarsi iterativamente alla valutazione del fattore di sicurezza utilizzato, sfruttando le formule espresse nel Paragrafo 4.1; qui di seguito è riportato il codice utilizzato.

```

1 clc
2 clear all
3
4 t_fe = 0.91e-3; % spessore tubo in acciaio inox 15-5PH
5 D = 17.46e-3; % diametro tubo
6 d=15.65e-3; % diametro interno tubo
7 D_m = (D+d)/2; % diametro medio
8 p = 13.7e5; % MDP

```

```

9 sigma_ti = 621e6; % tensione di snervamento Ti3Al-2.5V
10 sigma_fe = 795e6; % tensione di snervamento acciaio inox 15-5PH
11
12 % Fattori di sicurezza di tentativo
13 SF_fe = 1;
14
15 t = 0;
16
17 % Iterazione
18 while abs(t-t_fe) > 0.01
19     SF_fe = SF_fe + 0.001;
20     dide = (1 - 2*p*SF_fe/sigma_fe)^0.5;
21     t = D*(1 - dide)/2;
22 end
23
24 SF_fe
25
26 % Criterio di Zhu-Leis per il calcolo della pressione di burst
27
28 p_burst = ((2 + 3^0.5)/4/3^0.5)*4*t_fe/D_m*sigma_fe;
29
30 SF_zhuleis = p_burst/p

```

Il codice appena riportato calcola il fattore di sicurezza anche utilizzando un approccio alternativo: il criterio di Zhu-Leis permette di calcolare la pressione di burst di un tubo utilizzando una formula semiempirica<sup>1</sup>.

$$p_{burst} = \left( \frac{2 + \sqrt{3}}{4\sqrt{3}} \right)^{n+1} \frac{4t}{D_m} \sigma_{max} \quad (4.3)$$

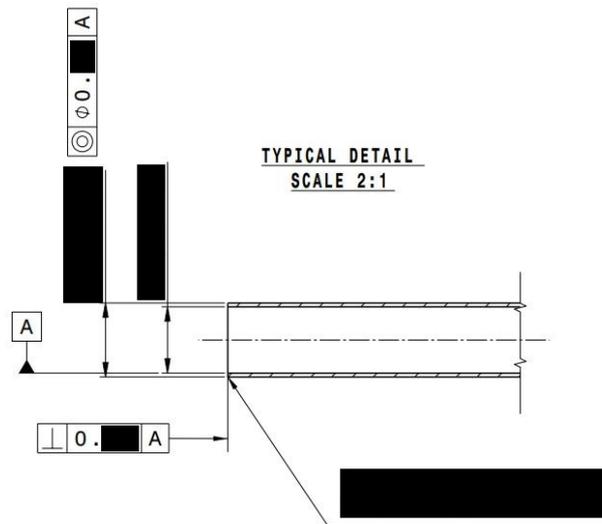
Dove  $n = 0$  per materiali con comportamento perfettamente elastico in campo elastico e perfettamente plastico in campo plastico,  $D_m$  è il diametro medio del tubo e  $\sigma_{max}$  è la tensione di snervamento del materiale; l'approccio proposto da Zhu è risultato più efficace, durante la sperimentazione, a prevedere la pressione di burst rispetto a criteri più spesso utilizzati, come ad esempio il criterio di Barrow. Per trovare il fattore di sicurezza partendo dalla pressione di burst basta dividere la stessa per la massima pressione di design:

$$SF_{zhu} = \frac{p_{burst}}{MDP} \quad (4.4)$$

Utilizzando il metodo iterativo basato sul criterio di Tresca, il fattore di sicurezza trovato per le linee con diametro esterno 17.46 mm è pari a 77.2, mentre con il criterio diretto di Zhu il fattore di sicurezza calcolato è pari a 93.9; risulta chiaro dai

<sup>1</sup>Vedi [2].

valori trovati che il criterio seguito dai progettisti per la scelta dei parametri delle linee a bassa pressione, sia in termini di materiale costitutivo che di spessore del tubo, non sia stata dettata da constatazioni di tipo strutturale, bensì di comodità costruttiva e, probabilmente, economiche. La seguente immagine rappresenta le linee a bassa pressione all'interno dello schema funzionale del CSS.



**Figura 4.5:** Sezione piping a bassa pressione ( $D = 17.46$  mm). Questa immagine è stata volutamente oscurata in alcune delle sue parti in accordo con Thales Alenia Space, per limitare la fuoriuscita di dati sensibili dalla realtà aziendale.

#### 4.2.1 Sottosistema distribuzione azoto: NDS 2 e 12

Le linee 2 e 12 del sottosistema di distribuzione dell'azoto sono indipendenti e gemelle dal punto di vista funzionale: entrambe trasportano il gas a bassa pressione, fornito in output dai regolatori di pressione visti al paragrafo 2.1.1, al CM e verso l'interfaccia tra NDS e WDS. Per rispettare il requisito che richiede la possibilità di spurgare il gas in caso di guasto ai regolatori di pressione, entrambe le linee in esame sono dotate di una "relief valve", azionabile sia automaticamente che manualmente. NDS 2 e 12 presentano poi una ridondanza nella sensoristica destinata al rilevamento della pressione, per rispettare il requisito che richiede la presenza di almeno due percorsi di raccolta dati in modo da rendere le linee "1-failure tolerant".

Queste due linee presentano una variazione del diametro del piping in corrispondenza della deviazione verso NDS 10 e NDS 11 e, più a valle, l'interfaccia tra NDS e WDS: la parte del NDS a valle di questo punto torna ad avere gli stessi parametri

costruttivi delle linee ad alta pressione analizzate nei paragrafi precedenti (diametro esterno, spessore del piping e materiale costitutivo), pur mantenendo la MDP e le caratteristiche di funzionamento delle linee a bassa pressione. Determinare la ratio dietro a questa scelta di design è molto arduo, in quanto la variazione di diametro e spessore del piping implica un incremento eccessivo del fattore di sicurezza<sup>2</sup>, oltre a comportare un incremento non trascurabile del peso; possiamo quantificare questo incremento di peso effettuando un semplice rapporto tra le due sezioni, dato che il materiale costitutivo e, quindi, la densità, sono le medesime nei due casi.

$$A_{HP} = \frac{\pi D_{HP}^2}{4}, \quad A_{LP} = \frac{\pi D_{LP}^2}{4} \quad (4.5)$$

$$\frac{A_{HP}}{A_{LP}} = 1.635 \quad (4.6)$$

La variazione dei parametri costruttivi comporta quindi un incremento del 63.5% del peso del piping per unità di lunghezza; la spiegazione dietro a questa scelta di design non può dunque essere ricercata nel fattore economico: per quanto la produzione di un tubo con maggior diametro esterno e minore spessore richieda tempi di produzione più elevati, oltre ad una maggior usura degli utensili e produzione di trucioli, un incremento di peso del modulo richiede un incremento esponenzialmente maggiore di carburante necessario al lancio. I requisiti di funzionamento degli elementi costitutivi del sottosistema di distribuzione dell'azoto a valle di questo punto non giustificano questa scelta nemmeno se si considera la leggera, se non trascurabile, variazione di pressione in corrispondenza della variazione di diametro del condotto.

Questa scelta rimane dunque, anche dopo una approfondita analisi di trade-off, dubbia e difficilmente giustificabile, rappresentando quindi una criticità nel progetto del modulo ESM-MPCV.

#### 4.2.2 Sottosistema distribuzione azoto: NDS 10

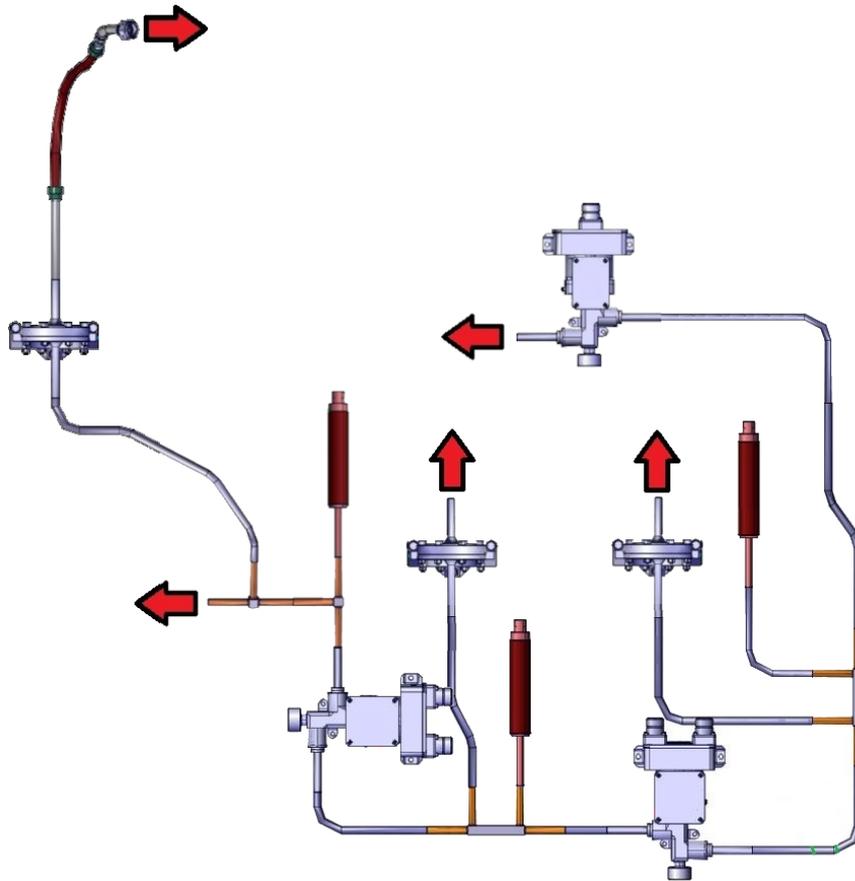
Questa linea ha la funzione di trasportare l'azoto alla corretta pressione verso la sezione gassosa interna ai serbatoi di acqua, in particolare i serbatoi 1,2 e 3, per il mantenimento dei parametri di design del sottosistema di distribuzione dell'acqua durante l'intera missione. Nel rispetto dei requisiti di progetto elencati precedentemente, le sezioni di piping che collegano NDS ai serbatoi sono isolabili singolarmente mediante l'azionamento di apposite valvole di cut-off, normalmente chiuse, e sono dotate di un sensore di pressione per il continuo monitoraggio delle

---

<sup>2</sup>Calcolando il safety factor con il metodo di Tresca visto precedentemente, meno conservativo, otteniamo un  $SF = 226.62$ .

condizioni di funzionamento della linea. Ogni interfaccia è inoltre dotata di un filtro idrofobico per evitare che in caso di guasti al serbatoio l'acqua contenente al suo interno si riversi nel sistema di distribuzione del gas: i filtri in questione hanno una natura fortemente direzionale e sono quindi caratterizzati da una fortissima caduta di pressione se percorsi da un qualsiasi fluido in direzione inversa rispetto a quella corretta. A valle dei filtri, il collegamento coi serbatoi è costituito da un tubo flessibile.

La linea in esame, insieme ad NDS 11, costituisce un circuito chiuso, completamente isolabile nei suoi tratti costitutivi; l'isolabilità complessiva del circuito è inoltre garantita dalla presenza di apposite valvole di cut-off normalmente aperte e posizionate a monte: una delle due valvole in questione fa parte di NDS 10, come mostrato in Figura 4.6, mentre l'altra fa parte di NDS 11.

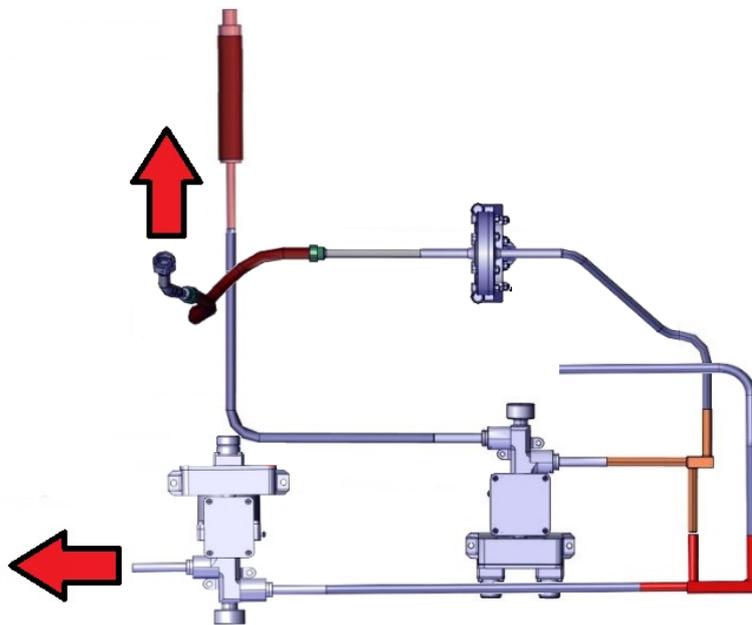


**Figura 4.6:** Rappresentazione CAD della linea NDS 10.

### 4.2.3 Sottosistema distribuzione azoto: NDS 11 e 11B

Queste due linee sono direttamente connesse tra loro e funzionalmente complementari, quindi verranno considerate come un'unica linea; storicamente le due linee erano raggruppate in NDS 11 ma, a seguito di variazioni nel tratto che porta al filtro idrofobico, si è deciso di dividerla in due parti per poter mantenere identica quella più a monte e modificare solo quella a valle: la versione aggiornata del tratto in questione, denominata NDS 11B, è stata progettata per essere compatibile con la versione obsoleta di NDS 11, in modo tale da poter aggiornare senza troppi problemi le linee prodotte seguendo il vecchio progetto. In particolare, la versione originale presentava un tubo flessibile dove ora è presente un tratto di tubo rigido.

A monte di NDS 11 è presente il collegamento con NDS 2, caratterizzato da una valvola di cut-off normalmente aperta, analogamente a quanto visto nel precedente paragrafo, a monte di NDS 10. Muovendoci a valle dalla valvola, si trovano un sensore di pressione e una ramificazione in due linee: proseguendo oltre un'ulteriore valvola di cut-off (normalmente chiusa), il sub-assy è collegato a NDS 10, mentre andando verso valle si incontra l'interfaccia con il serbatoio dell'acqua n°4, caratterizzata da un filtro idrofobico analogo a quelli visti nel paragrafo precedente. La valvola normalmente chiusa ha lo scopo di isolare, se necessario, il tratto di piping diretto al serbatoio n°3.



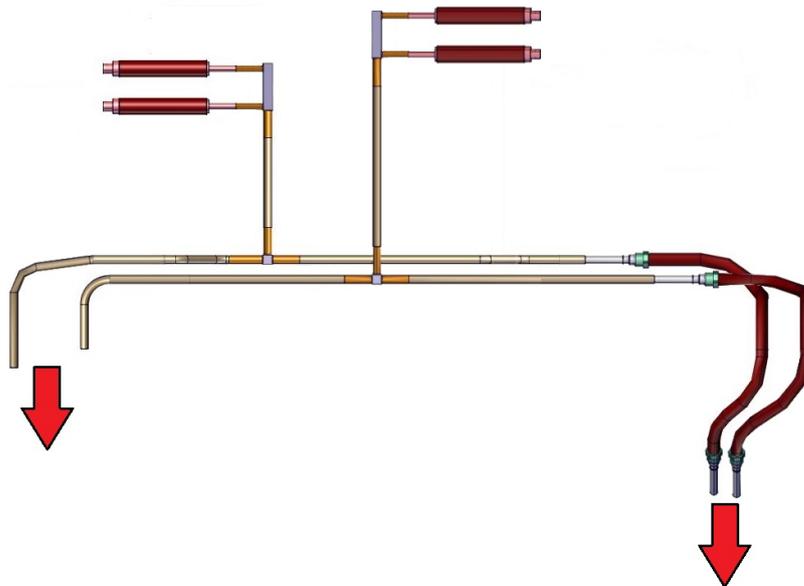
**Figura 4.7:** Rappresentazione CAD delle linee NDS 11 e NDS 11B.

#### 4.2.4 Sottosistema distribuzione ossigeno: ODS 2 e 8

La sezione a bassa pressione del sottosistema di distribuzione dell'ossigeno è suddivisa nelle seguenti linee:

- ODS 2
- ODS 8

Le due linee, equivalenti dal punto di vista funzionale, soddisfano il requisito progettuale che richiede la presenza di due percorsi indipendenti per fornire ossigeno al CM; ciò rende anche la porzione a bassa pressione del ODS "1-failure tolerant". Per la medesima ragione, entrambe le linee sono inoltre dotate di due sensori di pressione, in modo che siano ridondanti i percorsi di raccolta dati per la determinazione dei guasti. Le due linee terminano a valle con un tubo flessibile e l'interfaccia con il CM è costituita da un giunto filettato Dynatube.



**Figura 4.8:** Rappresentazione CAD delle linee ODS 2 e 8.

### 4.3 CSS: Linee WDS

Il sottosistema di distribuzione dell'acqua è suddiviso in tre parti: quattro serbatoi, le linee che raccolgono il fluido dai serbatoi e lo incanalano nel cosiddetto "inner loop" del WDS ed infine l'"inner loop". Dal punto di vista costruttivo, le linee WDS

sono delle linee a bassa pressione realizzate in acciaio inossidabile 15-5PH, con un diametro esterno pari a  $17.46mm$  e MDP fissata a  $8.25bar$ . Per motivi legati alla distribuzione della massa, i serbatoi dell'acqua sono posizionati a coppie agli estremi del modulo ESM-MPCV; tuttavia l'inner loop, ovvero il circuito responsabile del trasporto dell'acqua al CM, è posizionato interamente su uno dei pannelli che costituiscono il modulo: sono necessarie, dunque una serie di linee molto estese con la sola funzione di trasportare acqua dai serbatoi all'inner loop. Queste linee fungono solo come routing per il fluido e non verranno pertanto trattate nei prossimi paragrafi. Verranno invece trattate le linee dell'inner loop e verranno approfondite le scelte di design riguardanti i serbatoi.

#### **4.3.1 Sottosistema distribuzione acqua: WDS 1A**

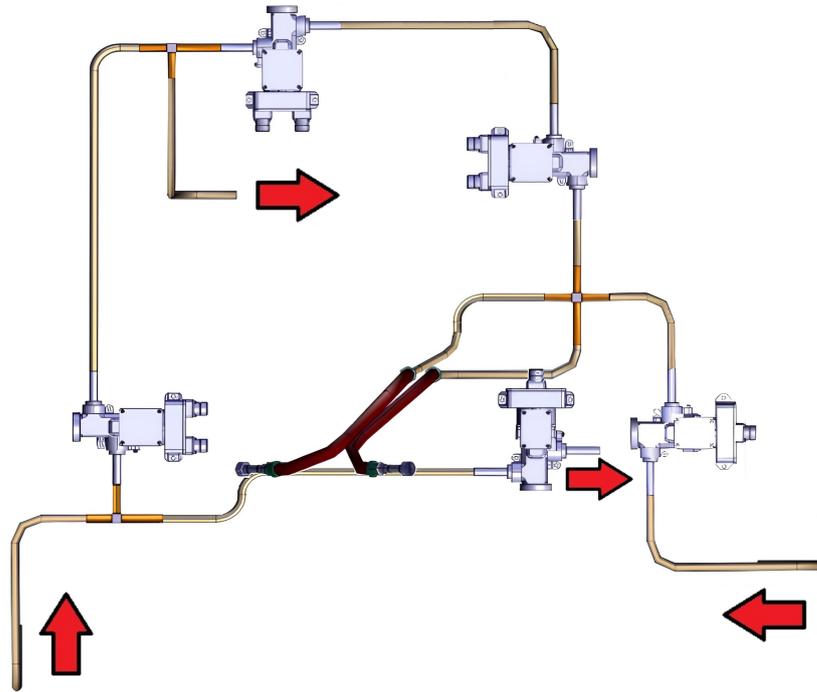
La linea WDS 1A ha la funzione di raccogliere l'acqua proveniente, attraverso le linee di trasporto, dal serbatoio n°4 e da WDS 1B ed incanalarla verso uno dei due collegamenti dell'inner loop con il CM. Per garantire l'isolabilità dell'inner loop, il tratto di piping diretto al CM è dotato di una valvola di cut-off normalmente aperta. Per garantire l'isolabilità del serbatoio n°4, condizione necessaria per avere un funzionamento 1-failure tolerant del sottosistema di distribuzione dell'acqua, il segmento compreso tra la valvola appena descritta e il serbatoio è dotato di un'ulteriore valvola, normalmente chiusa, sul ramo che connette WDS 1A con WDS 1B.

#### **4.3.2 Sottosistema distribuzione acqua: WDS 1B**

Questa linea del sottosistema di distribuzione dell'acqua è la più centrale tra quelle appartenenti all'inner loop: WDS 1B raccoglie a monte l'acqua proveniente dai serbatoi n°1, n°2 e n°3 attraverso le linee di trasporto, e la incanala verso il CM attraverso le linee WDS 1A e WDS 2. Per garantire il rispetto del requisito d'isolabilità di ognuno dei serbatoi, ogni tratto proveniente da uno di essi è delimitato da due valvole di cut-off normalmente chiuse.

#### **4.3.3 Sottosistema distribuzione acqua: WDS 2**

Questa breve linea di distribuzione raccoglie l'acqua proveniente da WDS 1B e la dirige verso il secondo dei due collegamenti verso il CM. WDS 2 chiude quindi l'inner loop, e insieme a WDS 1A costituisce la ridondanza delle linee di approvvigionamento del Crew Module, resa necessaria dal requisito che richiede il corretto funzionamento del sottosistema di distribuzione dell'acqua anche a seguito di un guasto alle linee o ad un serbatoio. Per questo motivo, come visto in WDS



**Figura 4.9:** Rappresentazione CAD del circuito WDS (inner loop).

1A, l'inner loop è isolabile anche da questo lato mediante l'azionamento di una valvola di cut-off normalmente aperta.

## 4.4 Serbatoi

### 4.4.1 Sottosistema distribuzione acqua

Il sistema WDS del modulo ESM-MPCV in configurazione lunare è caratterizzato da quattro serbatoi, posizionati a coppie in posizioni opposte rispetto ad uno dei piani di simmetria del modulo. Per garantire la corretta pressione operativa del sottosistema di distribuzione dell'acqua durante tutta la missione, è necessario implementare una struttura interna al serbatoio che permetta di compensare la perdita di pressione dovuta allo svuotamento dello stesso, adottando quindi un'architettura ad "accumulatore idraulico di pressione"; design di questo tipo presentano una suddivisione del serbatoio in due volumi: uno destinato al fluido da mantenere in pressione, nel nostro caso acqua potabile, e l'altro riempito da un gas, solitamente azoto, responsabile del mantenimento in pressione del fluido indipendentemente dal livello di fluido ancora presente nel primo volume. Le possibili configurazioni per un accumulatore di pressione sono le seguenti:

- Configurazione a vescica, o “bladder type”;
- Configurazione a pistone;
- Configurazione a diaframma;
- Configurazione a pancia metallica, o “metal bellow”.

In applicazioni aerospaziali, le configurazioni a pistone e a diaframma sono di rarissimo utilizzo: la prima ha il pregio di poter sfruttare rapporti di compressione molto elevati ma è caratterizzata da una massa elevata, mentre la seconda richiede una suddivisione interna dei volumi equa tra il fluido e il gas, riducendo di molto il volume di fluido accumulabile in rapporto al volume del serbatoio.

La configurazione più adatta al nostro caso è quindi da scegliere tra quella a vescica e quella a pancia metallica, mediante un’accurata analisi di trade-off; in seguito sono elencati i principali pregi e difetti delle due configurazioni che, in fase di progettazione, hanno portato alla scelta del design “metal bellow”.

Negli accumulatori di pressione “bladder type” la suddivisione tra il volume “fluidico” e quello “gassoso” è costituita da una membrana elastomerica: riempiendosi di gas la membrana si espande, andando ad incrementare la pressione all’interno del volume fluido. Per evitare che la membrana vada ad espandersi eccessivamente e quindi a “pizzicarsi” all’interno del condotto di uscita del fluido, questi accumulatori di pressione sono dotati di un cap metallico, posizionato solitamente sulla membrana elastomerica, che va a occludere il passaggio in caso di completo svuotamento del volume fluido. La natura elastica della membrana permette di realizzare accumulatori di pressione di questo tipo in molte forme e dimensioni, mantenendo pesi molto ridotti rispetto a qualsiasi altra configurazione. Il principale difetto di questa configurazione è legato proprio alle caratteristiche dei materiali elastomerici di cui è costituita la membrana, che la rendono incline a deteriorarsi nel tempo e permeabile sia ai vapori generati dal fluido, sia dal gas contenuto al suo interno. Questo implica la necessità di periodica manutenzione del serbatoio, che può includere la sostituzione della membrana. In caso di guasto, una configurazione di questo tipo vedrebbe una lenta evaporazione di vapor acqueo all’interno della membrana, in contemporanea ad un dissolvimento dell’azoto gassoso all’interno dell’acqua, piuttosto che una riduzione del flusso in uscita dal serbatoio o una variazione di pressione: per l’individuazione del guasto bisognerebbe quindi affidarsi a sensori di umidità, posizionati all’interno della membrana; questo metodo, per poter individuare umidità nel volume gassoso, richiede che il processo di evaporazione dell’acqua all’interno dell’azoto prosegua per lungo tempo, prolungando di molto il tempo necessario per l’individuazione della failure. È infine presente un’ulteriore criticità, legata alla valutazione del fluido rimanente all’interno del serbatoio a seguito di una failure: analisi sperimentali condotte dai ricercatori della NASA non hanno trovato un metodo efficace per stabilire con precisione

il livello di liquido contenuto all'interno di un serbatoio "bladder type" dopo un determinato periodo di svuotamento, se non l'utilizzo di un misuratore di flusso posto all'uscita dello stesso; questa soluzione è tuttavia imprecisa poiché non tiene conto dell'acqua evaporata e dissolta all'interno dell'azoto, che può essere non trascurabile al momento dell'individuazione del guasto tenendo conto dei prolungati tempi di individuazione.

Gli accumulatori di pressione "metal bellow" sono caratterizzati da un volume "fluidico" costituito da una membrana metallica in grado di espandersi e restringersi sfruttando una struttura a pieghe: la membrana è assemblata mediante la saldatura delle singole sezioni che la compongono. L'utilizzo di materiali metallici e della saldatura come metodo per l'assemblaggio produce un volume che non presenta i problemi visti nelle membrane elastomeriche: non richiede manutenzione e non è permeabile alle componenti gassose. Un ulteriore vantaggio delle membrane metalliche è il fatto che, durante il riempimento e lo svuotamento, la geometria assunta dall'interfaccia di separazione tra il gas e il fluido è predeterminata, rendendo molto semplice determinare la quantità di fluido contenuta dal serbatoio. Anche l'individuazione dei guasti è più veloce rispetto al caso trattato precedentemente: l'ingresso di gas all'interno della membrana metallica o, viceversa, la fuoriuscita di acqua da essa, producono una variazione della geometria della membrana; essendo gli spostamenti della membrana prevedibili e predeterminati a seconda della quantità di fluido contenuto nel serbatoio, una posizione anomala causata da un guasto è facilmente individuabile. La velocità di individuazione dei guasti rimane comunque lenta in termini assoluti, ma certamente molto più rapida rispetto alla configurazione "bladder type". Il principale difetto di questa configurazione è l'elevata massa dell'insieme: la struttura metallica ripiegata ha un peso molto più alto rispetto al medesimo volume costituito da una semplice parete dello stesso materiale.

Alla luce di un'approfondita analisi di trade-off la scelta di design è ricaduta sul design a pancia metallica: nonostante l'elevato peso, la possibilità di individuare velocemente i guasti della configurazione "metal bellow" è risultata una qualità indispensabile per garantire che un guasto ad un serbatoio non possa propagarsi agli altri.

Per soddisfare il requisito che richiede un funzionamento 1-failure tolerant del sistema di identificazione dei guasti, i serbatoi dell'acqua potabile sono stati equipaggiati con un sensore di quantità: il sensore, in unione ad un misuratore di flusso posizionato in uscita dal serbatoio, forniscono due percorsi indipendenti di raccolta dati con lo scopo di verificare il corretto funzionamento del serbatoio e della linea ad esso collegata; se la quantità di liquido contenuta nel serbatoio, fornita dal sensore di quantità, è coerente con il flusso in uscita misurato dal misuratore di flusso, allora non sono presenti guasti. Se i due dati non sono coerenti fra loro, può indicare la presenza di un guasto nel serbatoio: in questo caso le procedure

prevedono che la linea contenente il potenziale guasto venga isolata, azionando le apposite valvole di cut-off sia a monte del serbatoio, dal lato gas, sia a valle dal lato liquido. Per evitare l'instaurazione di un flusso inverso diretto verso il serbatoio guasto, si è deciso di dotare ogni linea in uscita dai serbatoi di una valvola di ritegno, o antiriflusso: questo limita di molto le perdite di fluido nel lasso di tempo che intercorre tra la failure e la sua individuazione. È stato infine scelto di inserire, come visto nei paragrafi 4.2.2 e 4.2.3, un filtro idrofobico a monte di ciascun serbatoio: per quanto le investigazioni abbiano dimostrato come in assenza dei filtri idrofobici siano comunque rispettati i requisiti di funzionamento e di individuazione dei guasti, l'aggiunta di questi elementi impedisce la propagazione di vapor acqueo nelle linee azoto anche nella remota possibilità in cui il sistema di individuazione dei guasti fallisca nel determinare la presenza di una perdita della membrana metallica.

Sono presenti alcuni requisiti non ancora considerati, che aggiungono ulteriori elementi utili al dimensionamento del serbatoio e degli elementi accessori in fase di progettazione. Uno dei requisiti più importanti richiede che, in nessuna circostanza durante la missione, l'acqua possa ghiacciare all'interno del WDS<sup>3</sup>: in particolare, il fluido deve essere mantenuto, per tutta la durata della missione, ad una temperatura compresa tra 17.6 °C e 38.5 °C. Quanto appena descritto ha portato, in fase di progettazione del sistema di controllo della temperatura (TCS), all'implementazione di una serie di riscaldatori da applicare ai serbatoi per regolarne la temperatura<sup>4</sup>.

In termini di dimensionamento, nel paragrafo 2.3.4 è indicato come per soddisfare i requisiti della crew e dei sistemi che utilizzano acqua proveniente dal WDS, i serbatoi devono poter contenere almeno 326.6 kg di acqua. Per compensare il fatto che, una volta raggiunto il limite di svuotamento dei serbatoi, parte del carico di acqua rimarrà all'interno del sottosistema di distribuzione dell'acqua, incapace di raggiungere il CM, è stato considerato ragionevole un incremento pari al 14.2% della quantità d'acqua rispetto al requisito. In totale, quindi, i serbatoi sono stati progettati per poter contenere 372.9 kg di acqua potabile, corrispondenti approssimativamente<sup>5</sup> a 372 litri di volume. Ciascun serbatoio dovrà avere quindi una capacità pari a 93.5 litri (0.0935m<sup>3</sup>). Sulla base dei requisiti appena descritti, i progettisti preposti presso Thales-Alenia Space hanno sviluppato un recipiente metallico con le seguenti caratteristiche:

---

<sup>3</sup>Questo requisito si applica, oltre ai serbatoi, anche alle linee di distribuzione dell'acqua in toto.

<sup>4</sup>I riscaldatori sono gestiti da appositi termistori, e fanno parte del sistema PTCS.

<sup>5</sup>Considerando una densità dell'acqua potabile pari a 1000 kg/m<sup>3</sup>, dato plausibile considerando una temperatura di 28 °C e una serie di minerali e altre specie chimiche disciolte al suo interno (densità acqua distillata a 30 °C pari a 995,65 kg/m<sup>3</sup>).

- Diametro medio dell'interfaccia metallica:  $550mm$ ;
- Altezza dell'interfaccia metallica, configurazione estesa:  $870mm$ ;
- Altezza dell'interfaccia metallica, configurazione compressa:  $101.5mm$ ;
- Numero di flange metalliche: 169;
- Materiale flange: AISI316L.

Il serbatoio risultante potrà quindi contenere, approssimativamente, 102.8 litri di acqua, vedendo dunque un incremento pari a circa il 10% del volume necessario da requisito. Supponendo di voler eseguire un'analisi di ottimizzazione dei parametri costruttivi dell'interfaccia metallica, considerando la capacità reale e seguendo un criterio di minimizzazione della massa e quindi della superficie esterna della stessa<sup>6</sup>, si otterrebbero le seguenti caratteristiche:

- Diametro cilindro:  $602mm$ ;
- Altezza del cilindro:  $512.8mm$ .

Considerando che il calcolo effettuato per giungere a questa soluzione non tiene realmente conto della struttura a pieghe dell'interfaccia reale e degli ingombri massimi ammissibili per il serbatoio all'interno del modulo ESM-MPCV, è razionale pensare che per giungere al design finale sia stata effettuata un'analisi di trade-off che ha tenuto conto sì della massa a vuoto del serbatoio ma anche dei fattori da me non considerati.

L'interfaccia metallica contenente l'acqua è poi chiusa da entrambi i lati attraverso apposite chiusure saldate alle flange esterne: la chiusura superiore rappresenta l'interfaccia con il lato gassoso del serbatoio, mentre quella inferiore presenta l'uscita verso le linee di distribuzione dell'acqua. L'assieme appena descritto è inserito all'interno di un involucro metallico cilindrico, caratterizzato da un'altezza di  $1340mm$  e un diametro pari a  $764mm$ . Il serbatoio finito, così progettato, presenta una massa a vuoto pari a  $45.8kg$  e un volume residuo di acqua al suo interno, al termine dello svuotamento, pari a 10.58 litri.

#### 4.4.2 Sottosistema distribuzione consumabili gassosi

I sottosistemi di distribuzione dei gas del modulo ESM-MPCV, ODS e NDS, in configurazione lunare sono caratterizzati da quattro serbatoi posizionati a coppie in

---

<sup>6</sup>Considerando, in prima approssimazione, il recipiente metallico come un cilindro con diametro pari al diametro medio del recipiente in configurazione reale (cioè costituito da pieghe).



**Figura 4.10:** Interfaccia metallica WT in configurazione compressa.

posizioni opposte rispetto ad uno dei piani di simmetria del modulo, analogamente a quanto visto per i serbatoi dell'acqua nel paragrafo precedente. A differenza dei WT, progettati come accumulatori di pressione per i motivi espressi nel paragrafo 4.4.1, i serbatoi implementati nel GDS sono normali "pressure vessels" contenenti gas in pressione: il serbatoio in questo caso è costituito da un recipiente interno in Inconel 718, intrecciato esternamente in fibra di carbonio T-1000. La fibra di carbonio utilizzata per realizzare il rivestimento esterno è pre-impregnata con una resina termoindurente prodotta da ARDE Inc.<sup>7</sup> Nonostante il peso specifico molto elevato, la superlega di nichel Inconel 718 è il materiale ideale per questa applicazione: questa lega, ampiamente conosciuta per le sue elevate prestazioni meccaniche sia a basse che ad alte temperature, è estremamente resistente a corrosione ed ossidazione; queste caratteristiche lo rendono un materiale molto adatto a contenere gas altamente ossidanti a pressioni molto elevate. Il rivestimento in materiale composito ha poi la funzione di aumentare ulteriormente la resistenza del recipiente ai carichi radiali e circonferenziali a cui è sottoposto.

Facendo riferimento ai requisiti di design, i serbatoi di ossigeno e azoto devono essere progettati in modo da rendere possibile il passaggio tra le diverse configurazioni del modulo ESM-MPCV variando semplicemente il routing delle linee di distribuzione del gas; ciò implica che i serbatoi siano interscambiabili e cioè che possano essere utilizzati sia per contenere ossigeno, sia per contenere azoto, alla medesima pressione massima di design<sup>8</sup>. L'interscambiabilità prevede che, anche nel caso in cui contenga azoto, il grado di pulizia delle superfici interne deve

---

<sup>7</sup>Resina ARDE 27-45 B.

<sup>8</sup> $MDP = 392bar$

essere compatibile con i requisiti di purezza dell'ossigeno: ISO 100A. I quattro serbatoi (tre contenenti ossigeno e uno contenente azoto, in configurazione lunare) devono in oltre permettere la distribuzione, attraverso le linee ODS e NDS, di rispettivamente  $129.3kg$  di ossigeno e  $39.87kg$  di azoto. Analogamente a quanto visto nel paragrafo precedente, la capacità massima dei serbatoi è stata aumentata di circa il 10% rispetto a quanto richiesto per il rispetto dei requisiti: ciascun serbatoio può contenere rispettivamente  $47.43kg$  di ossigeno e  $44.14kg$  di azoto, in un volume di appena 168 litri.

Ciascun serbatoio è inoltre dotato di due termistori per il monitoraggio della temperatura del gas contenuto al suo interno, due supporti per il montaggio alle estremità superiore ed inferiore e un tubo di uscita del gas piegato in modo da interfacciarsi correttamente con le linee GDS. I due supporti di montaggio presentano un cuscinetto, la cui presenza permette al serbatoio di disaccoppiarsi dalle forze di assemblaggio mantenendo il corretto allineamento assiale; la rotazione del serbatoio per effetto dei cuscinetti è inibita dalla presenza di appositi dispositivi anti-rotazione implementati nei supporti. Il meccanismo di fissaggio è infine dotato di rondelle elastomeriche, con lo scopo di assorbire le vibrazioni provocate dal meccanismo anti-rotazione e permettere lievi scostamenti delle estremità del serbatoio rispetto alla configurazione di progetto, sempre nei limiti di tolleranza, senza andare a scaricare le forze conseguenti sul serbatoio. L'insieme così progettato ha un peso a vuoto pari a  $43.7kg$ .

## 4.5 Componenti elettroniche

Il sistema di stoccaggio dei consumabili e il sistema di controllo termico, come visto nei paragrafi precedenti, devono soddisfare i requisiti di continuo monitoraggio del corretto funzionamento delle singole parti, sia per fornire alla crew dati in tempo reale riguardo lo stato di salute del sistema e delle singole linee, sia per identificare celermente eventuali guasti che si possono verificare nel modulo di servizio. Il funzionamento dei sensori, delle valvole e degli altri elementi elettronici in grado di monitorare o controllare i parametri funzionali dei due sistemi in questione è regolato da un apposito impianto elettrico, responsabile della distribuzione di potenza elettrica al CM e al modulo ESM. L'infrastruttura elettrica è progettata in modo che il segnale determinante l'avvio delle operazioni di distribuzione delle risorse al modulo abitabile sia originato a partire dal CM, in maniera automatica sulla base dei dati di funzionamento in tempo reale oppure in manualmente direttamente dalla crew. Qui di seguito sono elencati gli elementi elettronici dotati di un'interfaccia elettrica comunicante con il CM. Il sottosistema di distribuzione dell'azoto comprende sette valvole di cut-off, tre delle quali sono dotate di doppia interfaccia di attuazione e monitoraggio status; sono inoltre compresi otto sensori



**Figura 4.11:** Fotografia raffigurante un serbatoio GDS fissato con gli appositi supporti durante una fase di test strutturale.

di pressione, suddivisi tra le linee ad alta e bassa pressione e sei termistori: questi componenti svolgono una pura funzione di raccolta dati per indicare lo status di funzionamento del sistema. Il sottosistema di distribuzione dell'ossigeno comprende quattro valvole di cut-off, due delle quali sono dotate di doppia interfaccia analogamente a quanto visto per NDS, otto sensori di pressione e sei termistori. Il sottosistema di distribuzione dell'acqua è infine dotato di cinque valvole di cut-off, tre delle quali sono dotate di doppia interfaccia, quattro sensori di quantità (uno per serbatoio, come visto nel paragrafo 4.3) e sei termistori, per il controllo della temperatura dell'acqua. Le valvole indicate come dotate di doppia interfaccia sono controllabili e monitorabili da entrambe le unità di controllo termico (TCUs): le due interfacce sono equivalenti dal punto di vista funzionale e forniscono un grado di ridondanza essenziale per garantire il corretto funzionamento dei meccanismi di isolamento delle linee in caso di guasto.

#### 4.5.1 Sensori di pressione

I sensori di pressione implementati nel sistema CSS del modulo ESM-MPCV fanno parte della serie PA4089 prodotta e sviluppata da Ametek; il modulo presenta le

seguenti versioni dei sensori di pressione in questione:

- Sensore a bassa pressione per NDS (pressione operativa da 0 a 14 bar);
- Sensore a bassa pressione per water-loop NDS (pressione operativa da 0 a 8.25 bar);
- Sensore a bassa pressione per ODS (pressione operativa da 0 a 14 bar);
- Sensore ad alta pressione per NDS (pressione operativa da 0 a 392 bar);
- Sensore ad alta pressione per ODS (pressione operativa da 0 a 392 bar).

Ciascuna delle versioni elencate è caratterizzato da un consumo di potenza compreso tra  $0.435W$  e  $0.58W$ , e fornisce in output un segnale a 9V a corrente diretta. L'interfaccia di collegamento alla rete elettrica dei sensori in questione è dotata di sei pin, etichettati con lettere in ordine alfabetico da "A" a "F": i pin "A" e "D" sono dedicati all'alimentazione a 35V, "B" e "C" trasmettono in output il segnale con potenziale compreso tra 0V e 9V e contenente la lettura di pressione effettuata dal sensore, "E" costituisce la messa a terra per proteggere il sensore in caso di scariche elettrostatiche o picchi di corrente e infine "F" è un pin non utilizzato. L'elettronica interna al sensore non differisce tra le varie versioni presenti nel sistema CSS.

Il corpo del sensore è costituito da un cilindro, suddiviso internamente in tre volumi; a partire dal tubo in pressione, troviamo innanzitutto la camera in pressione contenente elio ad una pressione di riferimento. I due volumi interni rimanenti contengono rispettivamente le schede elettroniche per il processamento dei dati e i filtri EMI<sup>9</sup> che forniscono in output il segnale privo di rumore elettromagnetico all'interfaccia elettronica. Le singole parti che compongono il sensore sono costituite da acciaio inossidabile, sono tra di loro saldate mediante saldatura a fascio elettronico (EBW) e non possono pertanto essere disassemblate per accedere alle componenti interne. Tutta l'elettronica è inoltre immersa in resina epossidica tipo Stycast per garantire un grado ulteriore di protezione.

L'elemento principale del trasduttore di pressione<sup>10</sup> è il diaframma, elemento elastico in grado di deformarsi se sottoposto ad una variazione di pressione: la membrana del diaframma è collegata ad un elemento cilindrico assimilabile ad una trave, il cui spostamento lineare dipende esclusivamente dalla pressione assoluta a cui è sottoposto il diaframma stesso. Quando la membrana si deforma, la trave si sposta e va a incidere su un misuratore di sforzi<sup>11</sup> che è dotato di un amplificatore

---

<sup>9</sup>"Electro Magnetic Interference".

<sup>10</sup>Assieme pneumo-elettronico per la conversione del valore di pressione in segnale elettronico.

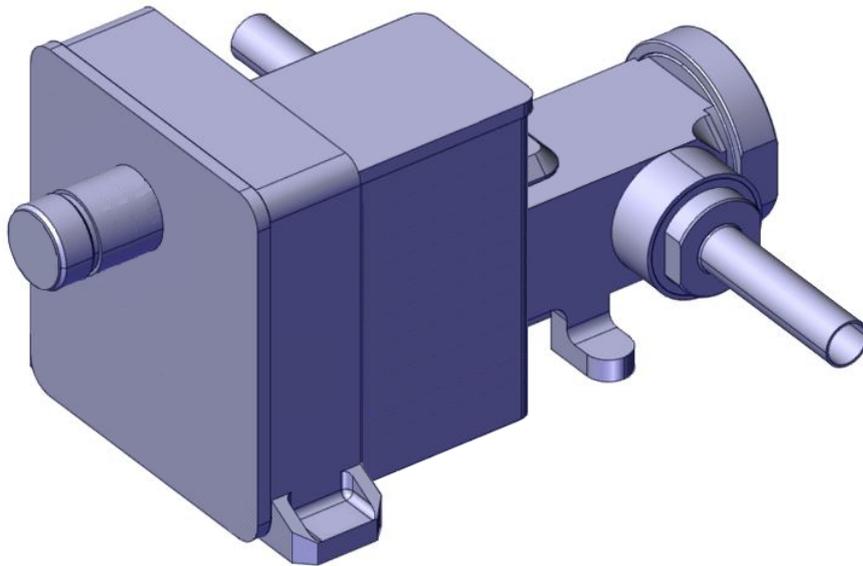
<sup>11</sup>In questo caso si intendono gli sforzi meccanici generati dalla trave sul misuratore.

allo stato solido: si genera quindi un potenziale elettrico direttamente dipendente della pressione, che viene poi interpretato ed amplificato dalla sezione elettronica del sensore. In fase di produzione il trasduttore viene calibrato in modo tale da generare una tensione nulla in caso di pressione uguale alla pressione di riferimento generata dall'elio contenuto nel sensore e pari a 9V in caso di pressione pari alla pressione massima di design.

#### 4.5.2 Valvole di cut-off

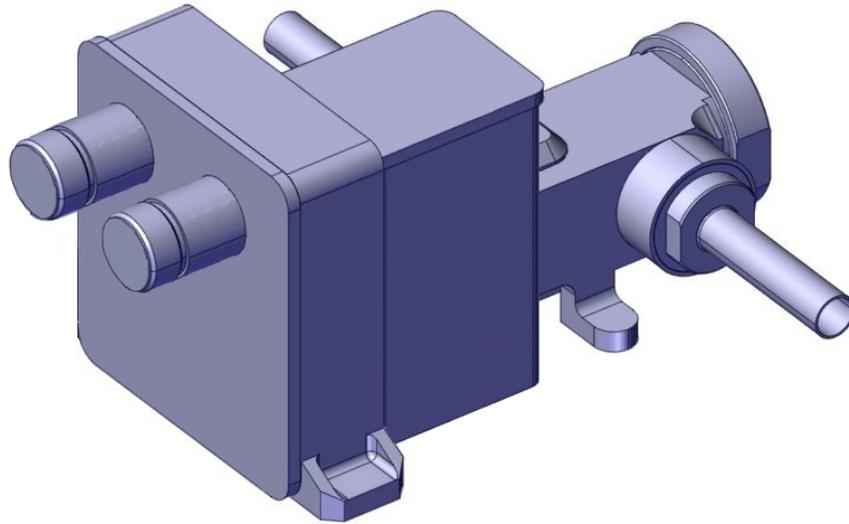
Come intuibile da quanto riportato nel paragrafo 4.5, le valvole di cut-off implementate nel sistema CSS del modulo ESM-MPCV sono di due tipi:

- Nominalmente chiuse e dotate di doppia interfaccia;
- Nominalmente aperte e dotate di singola interfaccia.



**Figura 4.12:** Rappresentazione CAD valvole di cut-off a singola interfaccia (NO)

Le prime sono collegate alle due TCU attraverso ciascuna interfaccia e sono considerate "componenti critici": queste valvole, come indicato nei paragrafi da 4.1 a 4.3, sono posizionate solitamente in modo da isolare interi tratti delle linee CSS in caso di guasto, solitamente all'altezza dei serbatoi. Le seconde, dotate di una singola interfaccia, sono posizionate in tutti gli altri segmenti di piping che da requisito devono poter essere isolate a favore di un percorso alternativo equivalente per la distribuzione delle risorse verso il CM.



**Figura 4.13:** Rappresentazione CAD valvole di cut-off a doppia interfaccia (NC).

Ciascuna interfaccia comprende quattro poli<sup>12</sup>: due poli sono adibiti alla comunicazione dello status della valvola (aperta o chiusa), uno è assegnato all'alimentazione della valvola e l'ultimo al comando della valvola. La tensione di alimentazione della valvola è compresa tra 35 – 50 V a corrente diretta, mentre la tensione di comando può assumere due livelli differenti a seconda della posizione della valvola: quando riceve un segnale a 20 V la valvola si chiude, mentre si apre quando riceve tensione nulla. Per le valvole a doppia interfaccia, nonostante la ridondanza dal punto di vista delle connessioni, l'elettronica che permette il funzionamento della valvola è singola: se una delle due TCPU connesse invia un segnale di chiusura a 20 V, la valvola si chiude e rimane chiusa fino ad una variazione del segnale in arrivo dalla medesima TCPU; se la valvola riceve un segnale a 20 V da una delle due TCPU, l'altra non può forzare l'apertura della stessa inviando un segnale a 0 V. Il bypass di questo comportamento può avvenire solo attraverso uno spegnimento manuale dell'unità di controllo termico che ha inviato il segnale di chiusura, ma ciò è possibile solo nel caso in cui essa risulti guasta e tale segnale sia stato inviato alla valvola per errore.

Il funzionamento delle valvole del CSS in condizioni di normale funzionamento durante la missione è il seguente:

- Nel WDS le valvole rimangono aperte per tutta la durata della missione a partire dalla fase di pre-lancio, in modo che i quattro serbatoi abbiano in

---

<sup>12</sup>Suddivisi su 10 pin, indicati da una lettera in ordine alfabetico da A a K.

ogni momento lo stesso grado di svuotamento; in caso di guasto viene inviato un segnale a 20 V alle valvole utili all'isolamento del serbatoio o del tratto danneggiato.

- Nel NDS e nel ODS le valvole rimangono aperte per tutta la durata della missione e possono essere chiuse attraverso un segnale di 20 V per isolare uno dei serbatoi e/o una delle linee dirette al CM in caso di guasto.

## 4.6 Componenti non elettroniche

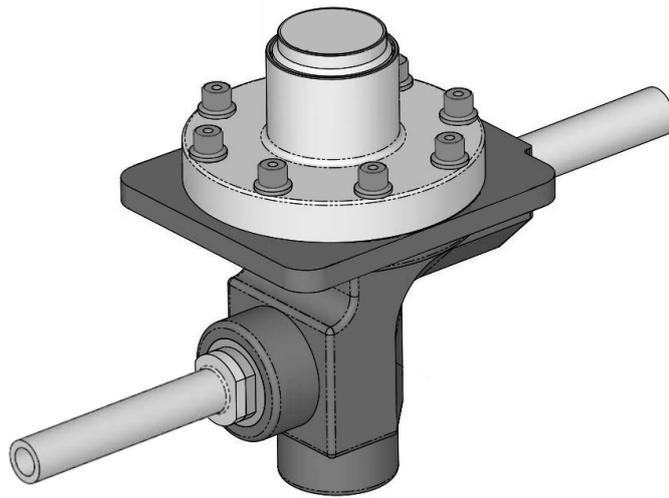
### 4.6.1 Regolatori di pressione

I regolatori di pressione, come espresso nei paragrafi precedenti, hanno la funzione di ridurre la pressione delle linee dei sottosistemi di distribuzione del gas dal valore di design delle linee ad alta pressione (392bar) al valore di design delle linee a bassa pressione (4.32bar per NDS, 6.22bar per ODS); per raggiungere le prestazioni desiderate, i regolatori di pressione sono costituiti da materiali metallici e polimerici ad alta resistenza. Il corpo mobile della valvola, costituito da una valvola a fungo, è costituito da MONEL K500, una lega Ni-Cu-Ti-Al con un'elevatissima resistenza alla corrosione ossidativa ideale per applicazioni in ambienti caratterizzati da ossigeno ad alta pressione. La valvola a fungo, o "poppet", è tenuta in posizione da una molla Belleville<sup>13</sup> e da una molla elicoidale. Il corpo esterno del regolatore di pressione è invece costituito da MONEL 400 (lega Ni-Cu-Mn). Il flusso ad alta pressione entra nel regolatore di pressione dal lato inlet, dove incontra un filtro a maglia fine (10 micron nominali) in Nichel 200, oltre il quale incontra l'ingresso vero e proprio della valvola; l'ingresso e la parte mobile della valvola sono separati da una struttura a ripiegamenti metallici, simile a quella vista nei serbatoi dell'acqua (Paragrafo 4.4.1): la funzione di questa struttura è legata al bilanciamento della pressione di ingresso agente sulla valvola a fungo e sulla sua sede, in modo da generare una pressione di uscita omogenea nel tempo. Al di sopra del corpo mobile della valvola è presente un diaframma metallico precaricato da una molla: la molla in questo caso ha un'azione regolatoria, poiché il precarico sul diaframma determina l'entità della caduta di pressione all'interno della valvola e quindi la pressione d'uscita. A valle, verso l'uscita, è presente assieme costituito da un'ulteriore valvola a fungo e una molla, che funge da limitatore di flusso: quando il flusso attraverso il regolatore di pressione sale sopra i livelli di design a causa di un guasto alle linee a monte o a valle, il limitatore di flusso si chiude, andando a ostruire l'uscita della valvola e obbligando il flusso ad attraversare un piccolo foro sulla valvola a fungo,

---

<sup>13</sup>Un tipo particolare di molla costituita da una rondella conica, viene utilizzata per applicare un precarico assiale.

che funge da ugello di bypass. I rispettivi regolatori di pressione installati sulle linee ODS e sulle linee NDS sono identici nel funzionamento e nella costruzione, ma differiscono per la posizione di uno dei fori di interfaccia: questa distinzione è stata introdotta esclusivamente per evitare confusione tra i due in fase di assemblaggio, dato che hanno due pressioni di uscita differenti e non sono quindi interscambiabili.



**Figura 4.14:** Pressure regulator CSS.

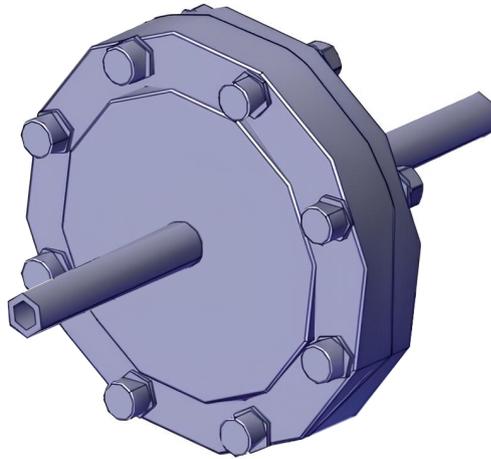
#### 4.6.2 Filtri idrofobici

La funzione dei filtri idrofobici è evitare che, in caso di guasti in cui il gradiente di pressione dovesse invertirsi, l'acqua contenuta all'interno dei serbatoi del sottosistema di distribuzione dell'acqua si riversi all'interno delle linee NDS. La membrana che svolge l'azione filtrante è realizzata in materiale ceramico costituito al 99% da ossido di alluminio<sup>14</sup> ed è supportata da un substrato del medesimo materiale: i trattamenti superficiali effettuati in fase di produzione su membrana e substrato rendono la prima idrofobica, caratterizzata da pori con ampiezza di  $0.3\mu m$ , e la seconda idrofila. L'alloggiamento per il filtro è costituito da due dischi accoppiati mediante l'utilizzo di bulloni. Per garantire la tenuta dall'esterno, tra i

---

<sup>14</sup> $Al_2O_3$

due dischi sono inseriti due C-ring<sup>15</sup> metallici compressi assialmente, posizionati in apposite guide indentate sulla superficie a contatto dei due dischi. Similarmente, per garantire la tenuta dall'interno, la membrana filtrante è circondata da una guarnizione O-ring in Viton, materiale elastomerico spesso utilizzato in applicazioni di questo tipo per le sue caratteristiche chimico-fisiche: il Viton è un materiale polimerico con una forte resistenza ad acidi, olii, carburanti e composti aromatici, ha un ampio range di temperatura operativa, è resistente all'invecchiamento ed è estremamente poco permeabile ai gas. Per permettere il collegamento alle linee CSS, ciascuno dei due dischi che costituiscono l'alloggiamento del filtro è saldato a un tratto di piping con caratteristiche costruttive analoghe a quelle delle linee NDS in cui verranno installati i filtri.



**Figura 4.15:** Filtro idrofobico CSS.

### 4.6.3 Nitrogen relief valves

Le relief valve, o valvole di sfogo, hanno lo scopo di prevenire che le linee azoto operino in condizioni di lavoro caratterizzate da pressioni superiori rispetto alla pressione limite di design: condizioni di questo tipo possono verificarsi in caso di guasto ai regolatori di pressione posti all'interfaccia tra le linee ad alta pressione e

---

<sup>15</sup>Le guarnizioni C-ring svolgono la stessa funzione degli O-ring ma offrendo una maggior elasticità grazie alla sezione a "C". Esistono diverse tipologie di C-ring a seconda dell'applicazione e dello stato di carico.

quelle a bassa pressione. Quando la pressione del gas nella linea azoto supera la MDP, la valvola si apre e lascia fuoriuscire il flusso, abbassando la pressione nella linea ed evitando che si verifichino ulteriori guasti. Le valvole sono costituite da un corpo principale in acciaio AISI 316LN, saldato ad un tubo che permette l'ingresso del gas all'interno della valvola. All'interno del corpo principale è presente una molla assiale, che garantisce la completa chiusura della valvola quando si hanno pressioni inferiori a quella d'apertura. L'interfaccia superiore del corpo principale è caratterizzata da una serie di fori, che in caso di apertura della valvola permettono l'espulsione radiale del flusso di gas. Sopra ai fori radiali, la valvola presenta ulteriori due fori, più larghi, che permettono di smaltire completamente il flusso in eccesso nel caso i quattro fori inferiori non risultino sufficienti. Sia la pressione di apertura della valvola, sia la configurazione di completa apertura ("full flow configuration") sono regolabili agendo su appositi dadi filettati: una volta trovata la regolazione desiderata, i due dadi sono fissati in posizione mediante due viti avvitate dall'esterno in modo che non possano perdere la regolazione specialmente a causa delle vibrazioni durante il lancio. Durante le operazioni di terra è previsto che le valvole vengano messe in sicurezza attraverso l'installazione di un'apposita spina filettata: questo dispositivo deve poter essere installato a mano senza necessità di ulteriori strumenti e previene l'apertura della valvola durante le operazioni di terra ed eventuali test di leakage svolti a pressioni superiori rispetto alla pressione di apertura. Essendo installate a valle dei regolatori di pressione, la pressione di completa apertura della valvola è fissata ad un valore leggermente superiore alla pressione di design delle linee NDS a bassa pressione: 8.17bar.

## Capitolo 5

# Definizione dei processi produttivi

### 5.1 Specifica dei processi produttivi

Il primo passo, fondamentale per garantire che le procedure seguite durante la fase di produzione generino prodotti conformi ai requisiti funzionali e strutturali stabiliti in fase di progettazione, è la certificazione dei processi produttivi: lo scopo di questa fase è definire la fattibilità, i parametri di macchina, le procedure di preparazione della postazione e i criteri di accettazione e non accettazione delle parti prodotte. La certificazione di un processo produttivo e la successiva stesura di una specifica sono strumenti utili sia all'azienda sia al cliente committente: questi documenti, oltre ad accertare l'abilitazione dell'azienda ad operare con determinati macchinari o ad applicare certi processi produttivi, permettono di procedere con la produzione sulle basi di un'approfondita consapevolezza, limitando al minimo gli errori di fabbricazione e quindi i costi attesi. L'iter da seguire per poter redigere una specifica e ricevere una certificazione prevede un'approfondita sperimentazione sul singolo processo produttivo, con lo scopo di produrre provini il più possibile rappresentativi del pezzo finale testando diversi parametri di macchina e configurazioni in modo da trovare quelli più opportuni in ogni situazione. Quanto appena detto tenendo conto delle risorse materiali e umane in dotazione all'azienda e mantenendo sempre le corrette condizioni di sicurezza. Le sperimentazioni devono inoltre essere il più possibile minuziose per limitare, al massimo delle possibilità aziendali, la possibilità che in fase di produzione si verifichino condizioni non precedentemente considerate. La stesura di una specifica rappresenta quindi per l'azienda un lungo percorso e un grande investimento di tempo e risorse, ma permette di elevare gli standard produttivi e quindi il valore aggiunto dei beni prodotti. Data la quantità di tempo necessaria per produrre le specifiche, solitamente queste vengono redatte

in contemporanea alla progettazione del sistema e della creazione dei disegni e dei modelli CAD. Entrando più nello specifico nel caso del sistema CSS del modulo ESM-MPCV, le procedure da certificare per la fabbricazione delle parti sono numerose e includono, oltre ai processi di lavorazione primari e secondari<sup>1</sup>, anche i controlli distruttivi e non distruttivi. Ad esempio, per intraprendere la produzione di una delle linee trattate nel capitolo precedente è necessario<sup>2</sup>:

- stabilire il processo più economicamente e tecnicamente consono alla creazione di tubi utilizzando i materiali scelti in fase di progetto;
- definire la procedura adatta al piegamento dei tubi per la produzione dei tratti curvi;
- determinare il metodo di saldatura da utilizzare per unire le singole parti e produrre l'assieme completo;
- scegliere i controlli non distruttivi da effettuare sulla linea per verificare efficacemente che l'assemblaggio delle parti sia avvenuto secondo i requisiti di progetto;
- trovare un metodo efficace ed efficiente per mantenere la serializzazione delle parti.

Ciascuno dei punti riportati richiede un'approfondita ricerca e la produzione di una o più specifiche produttive: la specifica di saldatura, ad esempio, richiede la produzione di provini da sottoporre a controlli distruttivi e non; tali controlli devono in primis essere certificati e regolati da una specifica aziendale. Solitamente l'iter di definizione e specifica delle procedure inizia con una ricerca approfondita di documenti e manuali, redatti da altre aziende o da istituti internazionali di regolamentazione, come ad esempio la International Organization for Standardization (ISO), che trattino procedure equivalenti o inerenti a quella da specificare. In questo modo l'azienda può affidarsi a delle linee guida preesistenti e risparmiare risorse.

## **5.2 Stesura dei cicli di produzione**

Il ciclo di produzione, o “manufacturing operations sheet” (MOS in breve), è un documento redatto solitamente dal reparto di ingegneria della produzione che

---

<sup>1</sup>Un processo è definito primario se produce semilavorati a partire dalle materie prime, secondario se produce pezzi finiti a partire da semilavorati.

<sup>2</sup>La lista non è completa e ha esclusivamente un valore indicativo, poiché non include i processi produttivi necessari per la fabbricazione di valvole, regolatori di pressione, sensori, tubi flex e giunti filettati.

racchiude tutti i passaggi e le operazioni necessarie per produrre un determinato prodotto. Per la redazione del MOS, è necessario avere una conoscenza approfondita dei processi produttivi, dell'apparato produttivo aziendale e dei requisiti costruttivi del prodotto; è inoltre interesse dell'azienda che il ciclo di lavoro sia il più specifico e approfondito possibile, che durante la stesura si prevedano le problematiche che potrebbero verificarsi durante la produzione e si tenga conto di esse e che il documento sia possibilmente privo di ambiguità. Nel ciclo di produzione non sono inclusi soltanto gli step produttivi che portano ad una trasformazione fisica del semilavorato, come ad esempio le fasi di machining, ma anche fasi di assemblaggio e saldatura, trattamenti chimici e termici, test distruttivi e non distruttivi, manipolazione e logistica degli spostamenti del semilavorato e del pezzo finito all'interno dell'azienda durante e al termine del ciclo ed infine informazioni sul luogo e le pratiche inerenti allo stoccaggio del prodotto in magazzino. Ciascuno step contenuto in un ciclo di lavorazione deve essere numerato univocamente e deve contenere informazioni utili; sono infatti riportati il codice di riferimento del centro di costo che avrà la responsabilità di portare a termine tale step ed eventuali riferimenti a modelli CAD e documenti applicabili a tale fase, come ad esempio specifiche di processo o certificazioni. Tendenzialmente un MOS deve iniziare con una fase di ritiro dal magazzino dei semilavorati, attrezzature e utensili necessari alle lavorazioni considerate all'interno del documento, e terminare con una fase di immagazzinamento o spedizione del prodotto. Una volta terminata la stesura da parte dell'ingegnere di produzione, il ciclo deve essere sottoposto ad un ciclo firme di approvazione che coinvolga figure legate a diversi organi dell'azienda, in modo da stimolare l'intercollaborazione fra reparti e minimizzare la possibilità che siano presenti errori nel documento finale. Il funzionamento dell'iter di approvazione e del giro firme a cui sottoporre un documento prima della pubblicazione è una prerogativa aziendale; solitamente, tuttavia, la valutazione finale riguardo l'approvazione di un ciclo di lavoro spetta al reparto di qualità dell'organo di produzione aziendale. Nella Figura 5.1, è riportato come esempio uno step di un ciclo di saldatura relativo al subassy CSS NDS 10.

### **5.2.1 Revisione dei cicli di produzione**

Dopo l'approvazione, i cicli di produzione sono sottoposti ad un continuo processo di ottimizzazione e revisione, con lo scopo di rimuovere eventuali criticità e ambiguità nel testo, aggiungere istruzioni utili a risolvere problemi che possono riscontrarsi durante la produzione, modificare l'ordine o aggiungere/rimuovere degli step al documento: solitamente la revisione del MOS viene richiesta in luogo di modifiche progettuali relative al prodotto del ciclo oppure se in fase di produzione vengono riscontrati problemi che vanno ad interrompere il flusso produttivo; in questo ultimo caso viene aperta una relazione di non conformità (NCR) e, se il problema che ha

80	64.00	<p>LEGGERE ATTENTAMENTE LE NOTE A DISEGNO E NOTE DEL CICLO DI LAVORAZIONE.</p> <p>ESEGUIRE TERZA SALDATURA DEL PARTICOLARE SECONDO:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• DISEGNO;</li><li>• MODELLO 3D VIA;</li><li>• SPECIFICA TASI [REDACTED];</li><li>• PROCEDURA DI SALDATURA [REDACTED]</li></ul> <p><b>NOMINARE LA SALDATURA "290N3" TRAMITE TARGHETTA ADESIVA SU FASCETTA E INSERIRE SUL RETRO IL SERIALE DEL SUBASSY</b></p> <p><b>ATTENZIONE:</b> PER ESEGUIRE LA SALDATURA ESEGUIRE I SEGUENTI PASSAGGI:</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. POSIZIONARE GLI ELEMENTI DA SALDARE COME DA MODELLO VISTA SAL. 290N3-290N6 (EL 35 [REDACTED] E EL 31 [REDACTED]);</li><li>2. POSIZIONARE LA PINZA DI SALDATURA ED ESEGUIRE PROVA IN BIANCO;</li><li>3. MANTENENDO LA PINZA AGGANCIATA AI DUE ELEMENTI RUOTARLA IN MODO TALE DA AVERE LA SALDATURA ORIZZONTALE;</li><li>4. PROCEDERE CON LA SALDATURA.</li></ol>
----	-------	--

**documenti applicabili**

**numero di step**

**centro di costo/reparto**

**istruzioni pratiche approfondite**

**Figura 5.1:** Esempio di step di saldatura MOS. Questa immagine è stata volutamente oscurata in alcune delle sue parti in accordo con Thales Alenia Space, per limitare la fuoriuscita di dati sensibili dalla realtà aziendale.

provocato la non conformità è facilmente risolvibile modificando o aggiungendo dettagli al ciclo di produzione, esso viene revisionato. Tutte le variazioni al testo originale del ciclo devono essere giustificate e indicate nel documento revisionato, per velocizzare l'iter di approvazione della nuova versione. Nell'intestazione del MOS deve infine essere ben visibile il numero di revisione del documento, oltre al nome dell'autore e del checker<sup>3</sup>. L'iter di ottimizzazione dei cicli di produzione è sicuramente dispendioso in termini di tempo poiché spesso richiede l'interruzione della linea produttiva relativa al ciclo in esame, ma genera un rilevante valore aggiunto in quanto permette di velocizzare la produzione una volta terminato, limitando la possibilità di nuovi eventi che possano portare ad una successiva interruzione della produzione; Questo effetto positivo è osservabile specialmente nel caso di produzione in serie. Nel caso in cui un gran numero di cicli devono essere revisionati a seguito di una variazione del progetto originale, tuttavia, l'effetto positivo sull'efficienza produttiva spesso non è presente e dal punto di vista aziendale rimane esclusivamente il costo in termini di ore di lavoro necessario all'aggiornamento dei MOS: questo problema può essere limitato in maniera rilevante dall'introduzione di un sistema MES (Manufacturing Execution System); questo argomento verrà approfondito nel prossimo capitolo.

---

<sup>3</sup>Per "checker" si intende la persona responsabile dell'approvazione del documento, solitamente facente parte dell'organico del reparto di qualità.

## Capitolo 6

# Digitalizzazione dei cicli di produzione con DELMIA Apriso

### 6.1 Introduzione ai sistemi *MES*

I **Manufacturing Execution Systems**, “*MES*” in breve, sono una specifica tipologia di software aziendali implementati nei sistemi produttivi con lo scopo di monitorare, tracciare e ottimizzare le attività di produzione. Questi sistemi, infatti, costituiscono il ponte operativo tra la pianificazione aziendale e il controllo in tempo reale del processo produttivo in officina, rappresentando quindi una componente fondamentale per un approccio moderno alla produzione, improntato all’efficienza e alla qualità.

I sistemi *MES* permettono una gestione dei processi produttivi, a partire dall’ordine e dal ritiro delle materie prime, fino alla consegna del prodotto finito, basata sull’integrazione di tutte le informazioni utili in un’unica piattaforma: attraverso la digitalizzazione del ciclo di lavoro è possibile seguire, passo dopo passo, l’iter di completamento dei *work order*, monitorando l’efficienza dei reparti produttivi e integrando, in un unico contenitore gestionale, tempi di produzione, fasi di logistica, spostamenti interni all’azienda dei semilavorati, carico di lavoro dei singoli reparti ed eventuali non conformità in cui si può incorrere durante la produzione. Il raggruppamento della quasi totalità degli aspetti gestionali inerenti all’ambito produttivo all’interno di un software rende inoltre molto più semplice la tracciabilità dei singoli prodotti finiti e semilavorati, garantendo all’azienda un risparmio notevole di risorse umane ed economiche. Il raggruppamento di tutte le informazioni utili al controllo degli apparati produttivi aziendali permette inoltre di incrementare la produttività

attraverso la riduzione dei tempi di produzione; la possibilità di segnalare problemi e non conformità direttamente sul software permette infatti ai reparti di ingegneria di intervenire rapidamente sui cicli, implementando miglioramenti utili ad evitare che tali non conformità si presentino nuovamente e riducendo quindi la frequenza di quegli eventi che, in assenza di una gestione centralizzata e digitalizzata dei processi produttivi, rischiano di rappresentare un collo di bottiglia e interrompere momentaneamente le attività produttive di determinati reparti.

Un ulteriore vantaggio dei sistemi *MES* è la pianificazione automatica, basata sulla durata stimata dei processi e dei *work order*, ovvero la “*schedule*” operativa dei reparti produttivi. Questo è reso possibile dall’implementazione, in allegato ai cicli di lavoro digitalizzati tramite il software, dei tempi medi di completamento dei singoli step: queste indicazioni includono solitamente, in aggiunta ai tempi associati alle lavorazioni, anche i tempi necessari alla preparazione del reparto e degli attrezzi (*setup*) alla lavorazione descritta nello step e i tempi impiegati per il trasferimento tra reparti del semilavorato (o del *batch* in caso di produzione in serie).

In ultimo, uno degli incentivi più rilevanti all’adozione di sistemi digitalizzati è la possibilità di standardizzare la formulazione degli step operativi nei cicli di produzione. Questo permette di velocizzare il processo di stesura dei *MOS* limitando, al contempo, i possibili errori umani che possono verificarsi nel caso in cui i cicli di produzione dovessero essere prodotti in forma cartacea: gli step operativi diventano “*operazioni standard*”, mattoncini che, adattati opportunamente, possono essere assemblati gli uni con gli altri per comporre il ciclo di produzione. Questo aggiunge, inoltre, un ulteriore grado di semplificazione in caso di revisione dei vecchi cicli, dato che una modifica alle operazioni standard aggiorna istantaneamente tutti i cicli che utilizzano tale operazione come uno dei mattoncini standardizzati usati per comporlo, eliminando completamente il bisogno di aggiornare i cicli singolarmente.

I principali svantaggi dei software gestionali *MES* sono invece legati alle difficoltà che, le aziende decise a adottare questi sistemi, possono riscontrare nella fase di implementazione degli stessi e nella transizione da procedure pensate inizialmente per funzionare sfruttando supporti cartacei o ibridi ad altre, equivalenti in termini di obiettivi, ma completamente digitalizzate. La transizione digitale degli iter aziendali può essere inizialmente complessa per qualsiasi tipo di azienda, ma risulta particolarmente difficoltoso specialmente per le aziende che non adottano un modello produttivo in serie; le aziende la cui produzione è improntata alla creazione di prototipi, infatti, sono caratterizzate da un costante aggiornamento dei progetti e delle procedure, e ciò si ripercuote pesantemente nei tempi di produzione. Per queste imprese, dunque, la difficoltà di implementazione dei sistemi *MES* è particolarmente acuita dall’assenza di continuità tra le procedure seguite per la realizzazione di diversi progetti e, in alcuni casi, di diverse revisioni dello stesso progetto, fattore che ne complica la standardizzazione riducendo di conseguenza i

vantaggi appena esposti.

## 6.2 Il caso Thales Alenia Space: *DELMIA Apriso MES*

Thales Alenia Space è un'azienda leader del settore aerospaziale italiano, specializzata nella progettazione, sviluppo e produzione di moduli spaziali e satelliti per conto di diversi contractor. La realizzazione di questa tipologia di prodotti è un compito notoriamente complesso che richiede un approccio multidisciplinare molto dispendioso in termini temporali; per questo motivo, Thales Alenia Space è un'azienda la cui produzione può essere definita *discreta*, ovvero caratterizzata da esemplari prodotti in numero ridotto o singolarmente, senza una serialità ben definita: questo aspetto va a complicare in modo rilevante l'implementazione di un sistema *MES* e la transizione digitale degli iter di gestione della produzione, per i motivi elencati precedentemente. Il passaggio a un sistema completamente digitale, superata la fase transitoria iniziale, presenta tuttavia tutti i vantaggi esposti nel precedente paragrafo, risultando complessivamente positivo in termini di efficienza e di produttività. Viste le difficoltà legate alla standardizzazione, le indagini interne svolte con lo scopo di trovare la piattaforma più adatta alla realtà aziendale hanno portato alla scelta del sistema *DELMIA Apriso*, prodotto da Dassault Systèmes.

Tra le soluzioni *MES* presenti sul mercato, *DELMIA Apriso* di Dassault Systèmes si distingue per la sua capacità di fornire una piattaforma integrata e flessibile per la gestione operativa delle attività produttive, concepita per supportare sia industrie *discrete* che *continue*, offrendo strumenti avanzati per il monitoraggio in tempo reale, il controllo qualità, la gestione delle risorse produttive e la tracciabilità dell'intero processo. La piattaforma supporta non solo il monitoraggio e il controllo dei processi, ma anche l'ottimizzazione dei cicli di lavoro, consentendo di identificare e correggere inefficienze in modo proattivo. La capacità del sistema di fornire dati dettagliati in tempo reale e di integrare informazioni provenienti da differenti fonti permette di ottenere un quadro completo delle operazioni, utile per decisioni strategiche e operative. *DELMIA Apriso* permette inoltre la modifica individuale delle *operazioni standardizzate*, semplificando la transizione dal supporto cartaceo al digitale.

Con l'obiettivo di ridurre al minimo gli effetti avversi sugli apparati produttivi del processo di implementazione del *MES*, Thales Alenia Space ha pianificato l'introduzione di *DELMIA Apriso* a partire dai processi più identificabili come *seriali*, ad esempio lo stampaggio di schede elettroniche o l'assemblaggio di pannelli sandwich. Una volta integrato perfettamente il sistema nei reparti caratterizzati da un alto tasso di ripetitività—le cui operazioni possono essere facilmente standardizzate—si passerà all'implementazione del *MES* anche per i processi produttivi più *discreti*.

## 6.3 Digitalizzazione dei cicli di saldatura orbitale

Durante la mia permanenza presso Thales Alenia Space, ho avuto la possibilità di approfondire i processi di saldatura e, in modo particolarmente approfondito, la saldatura orbitale, a cui spesso ci si riferisce con il nome inglese *Orbital Welding* o *Orbital GTAW*<sup>1</sup>. Questa tipologia di saldatura, approfondita nel Capitolo 7, è utilizzata nella produzione del modulo ESM-MPCV per l'assemblaggio delle linee fluide e dei piping dei sistemi TCS e CSS.

Essendo caratterizzata da elevata ripetibilità e possibilità di automatizzazione, questo processo produttivo è certamente tra i più facilmente integrabili all'interno di un sistema *MES*, almeno tra quelli presenti nella linea produttiva di *Thales Alenia Space*. Avendo acquisito particolare dimestichezza con la saldatura orbitale applicata all'assemblaggio dei piping CSS e con la stesura dei cicli di produzione associati a tale processo, sono stato incaricato di gettare le basi per la digitalizzazione dei cicli di *Orbital Welding* su *DELMIA Apriso*. I cicli di lavoro sono denominati "*Routing*" nel software informatico *DELMIA Apriso MES*: in questa sezione del testo è descritta la struttura di un *Routing* e se ne riporta un esempio relativo ad un ciclo di saldatura orbitale, associato al subassy NDS 2.1 del CSS (vedi Paragrafo 4.2.1 per un approfondimento).

### 6.3.1 Struttura del *Routing*

In *DELMIA Apriso*, i *Routing* sono strutturati in modo molto simile ai *flow chart*<sup>2</sup>; esattamente come accade nei diagrammi di flusso, infatti, un *Routing* inizia sempre con una fase "*start*" e termina con un'operazione di immagazzinamento, che costituisce il termine delle lavorazioni, indicate nel ciclo, sui semilavorati ("*end*").

I singoli step del ciclo di produzione, su *DELMIA*, sono denominati "*Operations*" e possono essere assemblati, servendosi di una comoda interfaccia grafica, per comporre il *Routing*. Le *Operations* sono gestite, all'interno del database integrato nel software, secondo una gerarchia basata sul ciclo di approvazione delle stesse; le "*Operations*" possono essere infatti considerate come "*Prototype*", "*In Work*" o "*Released*":

- Un' *Operation* è *Prototype* (indicata dal colore giallo) quando è ancora in fase di definizione in termini di contenuti; gli step di questa categoria non possono essere inseriti in un routing, a meno che anch'esso, a sua volta, non

---

<sup>1</sup>"GTAW" è l'acronimo di "Gas Tungsten Arc Welding", ovvero il nome inglese della saldatura ad arco elettrico.

<sup>2</sup>Un "flow chart", o "diagramma di flusso" in italiano, è un diagramma che mappa passaggi e decisioni di un processo in maniera sequenziale, usando simboli e frecce.

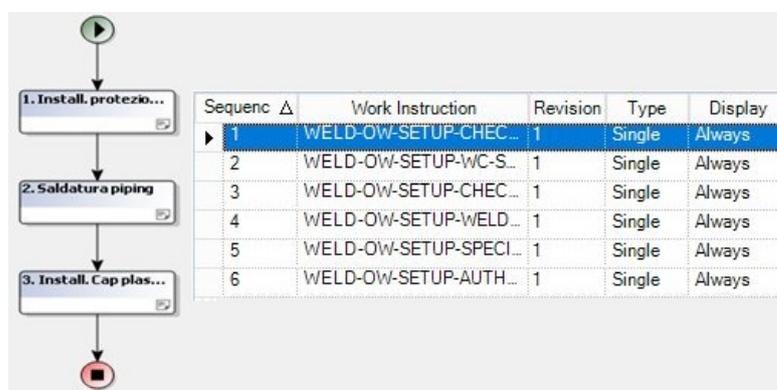
sia considerato come *Prototype*. Quando un utente assegna questo stato a un *routing* o a una *operation*, nessun altro utente può accedere ad esso/a tramite l'apposito editor per modificarne il contenuto;

- Le *Operations In Work* sono indicate con il colore blu, e sono considerate ad un livello di completezza e affidabilità più alto rispetto a quello in stato “*Prototype*”; queste *operations* possono essere utilizzate all'interno di nuovi *routing* ma possono essere ancora modificate nel contenuto;
- Un' *Operation* è considerata *Released* (indicata con il colore verde) quando è stata utilizzata all'interno di un *routing* che ha superato tutto l'iter di approvazione; quando un *routing* viene approvato, infatti, anche le *operations* contenute al suo interno sono considerate approvate nella loro interezza. Quando un *routing* o un' *operation* acquisisce lo stato “*Released*” non può più essere modificato/a nel contenuto senza rilasciarne una nuova revisione.

Le *operations* sono a loro volta suddivise nelle singole fasi che caratterizzano la lavorazione trattata, chiamate “*Work Instructions*”; anche le *WI* sono organizzate in maniera sequenziale sotto forma di diagramma di flusso, come mostrato nella Figura 6.1, e ciascuna *operation* deve contenere al suo interno almeno una *WI*. Il nome di questi elementi è autoesplicativo: all'interno delle *WI* sono contenute tutte le istruzioni utili all'operatore per eseguire una certa lavorazione, rappresentata dall'*operation*. Un esempio di *Work Instruction*, riferito in questo caso allo step di saldatura orbitale del *routing* del subassy NDS 2.1, è riportato in Figura 6.2. Nell'immagine si può notare come, nel testo contenuto nelle *WI*, possa essere fatto riferimento a specifiche o procedure: in questi casi, la specifica o la procedura indicata va allegata alla *Operation* corrispondente o al *Routing*, in modo che l'operatore in officina possa consultarne il contenuto senza dover cercare il documento altrove, allontanandosi dalla postazione di lavoro e interrompendo la produzione. Oltre a documenti di testo e file multimediali, la cui inclusione è utile ma non indispensabile, esistono ulteriori tre informazioni essenziali, da associare alle *Operation*, per poter approvare il *Routing*: i tempi di preparazione e lavorazione, i centri di lavoro/reparti e le *skills*. I tempi di preparazione e lavorazione sono considerati essenziali per il corretto funzionamento della pianificazione automatica del lavoro associato agli apparati produttivi dell'azienda. È pertanto vitale che, in fase di creazione del *Routing*, tutti i tempi necessari vengano attentamente valutati e associati alle singole *Operation*, facendo distinzione fra tempi di preparazione della postazione, o “*setup*”, di trasporto dei semilavorati, tra un reparto e un altro, e di lavorazione. Un altro elemento utile alla pianificazione del lavoro, gestita dal sistema *MES*, è il centro di lavoro associato a ciascuna *Operation*: in congiunzione ai tempi, di cui è appena stata descritta l'utilità, fornire al software il reparto in cui una certa lavorazione va svolta, permette una pianificazione accurata che eviti

il sovraccarico di determinati reparti. Infine, le *skill* indicano con precisione il tipo di formazione necessaria ad un operatore per poter svolgere le istruzioni contenute all'interno di un'Operation, e sono solitamente legate al centro di lavoro (ad es.: reparto → controlli non distruttivi, *skill* → utilizzo liquidi penetranti).

Una volta creato il *flow chart* e aggiunti tutti gli elementi necessari e facoltativi, utili al corretto funzionamento del software, il *Routing* può considerarsi completo e può essere sottoposto all'iter di approvazione: solitamente il *Routing* dev'essere approvato da una serie di figure interne all'azienda, i cosiddetti “*checker*”, appartenenti principalmente ai reparti di progettazione, controllo qualità e ingegneria della produzione, scelte in base alle proprie competenze specifiche. Se ciascuno dei *checker* approva il *Routing*, il suo stato passa da “*In Work*” a “*Released*” e può iniziare ad essere utilizzato negli apparati produttivi.



**Figura 6.1:** Suddivisione dell'Operation in *WIs*: a sinistra l'editor grafico a *flow chart*, a destra la vista sequenziale.

## Esempio di *Routing*: Subassy NDS 2.1

In questo paragrafo verrà descritto un semplice *Routing* di saldatura orbitale, riferito al subassy NDS 2.1, parte delle water lines del sistema CSS del modulo ESM-MPCV. Come mostrato in Figura 5.3, nell'apposito editor il *Routing* si presenta sotto forma di diagramma di flusso. Ciascuna delle caselle, connesse tra loro da una sequenza di frecce, rappresenta una *Operation*: per consultarne o modificarne il contenuto direttamente dalla schermata dell'editor per *Routing*, è sufficiente cliccarci sopra per aprire una schermata separata, dalla quale è possibile anche modificare i tempi associati a ciascuna di esse. La denominazione delle *Operations* sfrutta una stringa alfanumerica costituita da sei parole. Ciascuna stringa è univoca ed è strutturata in modo tale che le parole scelte rendano immediatamente chiaro, all'ingegnere di produzione che crea il *Routing*, il contenuto dell'*Operation*. Questo permette di

Eseguire **saldatura** del particolare secondo:

- Disegno;
- Modello 3D VIA;
- Specifica [REDACTED];
- Procedura [REDACTED];
- Configurazione per piping 3/8".

**Identificare** la saldatura con una **targhetta adesiva su fascetta** indicando sul fronte il nome della saldatura e sul retro inserire il S/N del subassy.

Per identificare la saldatura seguire la seguente convenzione: **XXXVZZ**

- **XXX** = Ultime 3 cifre identificative del P/N;
- **V** =
  - **N** per CSS linea AZOTO
  - **X** per CSS linea OSSIGENO
  - **W** per CSS linea ACQUA
  - **A** per TCS linea A
  - **B** per TCS linea B
- **ZZ** = numero progressivo della saldatura nel subassy, è indicato a ciclo o a modello.

**Figura 6.2:** Esempio di contenuto di una *Work Instruction*. Questa immagine è stata volutamente oscurata in alcune delle sue parti in accordo con Thales Alenia Space, per limitare la fuoriuscita di dati sensibili dalla realtà aziendale.

velocizzare l'integrazione di *Operation standard*<sup>3</sup> nei nuovi *Routing*. Lo schema seguito per definire il nome univoco di un' *Operation* è il seguente:

CATEGORIA PROCESSO - NOME PROCESSO - PRODOTTO - CAMPO FACOLTATIVO  
- CAMPO FACOLTATIVO - STABILIMENTO

Ad esempio, per stabilire il nome dell'operazione di saldatura riferita al *Routing* in questione, si segue il seguente ragionamento:

- **Categoria processo:** saldatura → *WELD*;
- **Nome processo:** saldatura orbitale (*Orbital Welding*) → *OW*;
- **Prodotto:** condotto metallico → *PIPING*;
- **Primo campo facoltativo:** caratteristica del prodotto, in questo caso il diametro del piping → *3/8inch*;

---

<sup>3</sup>Quando un *Routing* super l'iter di approvazione e viene rilasciato, le operazioni contenute al suo interno sono considerate approvate, e possono essere utilizzate in DELMIA Apriso nella creazione di nuovi *Routing*, senza richiedere alcuna modifica. Queste *Operation* vengono definite "Operation Standard".

- **Secondo campo facoltativo:** informazioni aggiuntive sul tipo di procedure da seguire durante la lavorazione; nel caso di parti con interfacce e componentistica elettronica, queste vanno collegate a terra prima di procedere (*ESD-sensitive*<sup>4</sup>) → *ESD*;
- **Stabilimento di produzione:** Torino → *TO*.

A partire dalla casella di “start”, troviamo la prima *Operation*: questa è l’operazione che inizierà, cronologicamente, il ciclo di produzione della parte in questione. Ogni ciclo di produzione, operativamente parlando, inizia con il prelievo delle parti e degli attrezzi necessari per la produzione del prodotto finito; per questo motivo, ogni *Routing* deve cominciare con un’*Operation* di prelievo delle parti dal magazzino.

Dopo aver ritirato le parti dal magazzino, queste vengono trasferite nel reparto di saldatura orbitale, dove vengono assemblate per produrre l’assieme finito. Tuttavia, prima di poter eseguire la saldatura, l’operatore deve completare la procedura necessaria alla compilazione della “*checklist pre-saldatura*”: questo documento indica, punto per punto, tutte le operazioni di preparazione della postazione, accensione e *setup* delle attrezzature e diagnostica del corretto funzionamento dell’impianto. La checklist prevede, inoltre, la saldatura di un provino di pre-produzione. Il provino da saldare per completare la checklist deve essere rappresentativo delle parti che verranno saldate durante la campagna di saldatura successiva, per verificare che il programma di macchina impostato generi un cordone di saldatura conforme alle specifiche.

A questo punto il *Routing* si ramifica in due percorsi paralleli. Il ragionamento dietro questa scelta tiene conto del modo in cui, in *DELMIA Apriso*, sono gestiti i *Routing* a livello di pianificazione temporale automatica delle attività produttive: suddividere le singole saldature su due rami permette agli operatori di eseguire ciascuna saldatura in modo indipendente dalle altre, permettendo loro di eseguire il controllo visivo del giunto immediatamente dopo la saldatura senza attendere la fine della campagna. In tal modo, inoltre, se un cordone risulta non conforme, si interrompe solo il ramo associato, lasciando attivi gli altri rami. Ciascun ramo è costituito, dunque, dall’*Operation* di saldatura corrispondente e, successivamente, dall’*Operation* di controllo visivo del giunto.

Quando due o più rami paralleli si ricongiungono, il *Routing* non prosegue finché tutte le *Operations* di ogni ramo non sono state completate con successo. il prodotto sarà completamente assemblato e dovrà essere sottoposto a una serie di *controlli non distruttivi* per verificarne la conformità ai requisiti di progetto. L’*Operation*

---

<sup>4</sup>Le parti che possono essere danneggiate dal verificarsi di scariche di energia elettrostatica sono definite ESD-sensitive.

successiva prevede infatti l'imballaggio dell'assieme secondo le specifiche aziendali, per il trasferimento dal reparto di saldatura orbitale a quello di controlli ispettivi non distruttivi (*NDI*). I controlli non distruttivi da effettuare sulle saldature, in accordo con le procedure aziendali, sono i due seguenti: la radiografia e l'ispezione con liquidi penetranti.

La radiografia consiste nell'investire la zona sottoposta a saldatura con un fascio di particelle cariche, con una lunghezza d'onda associata ai raggi X. Questo metodo ispettivo non danneggia l'assieme e permette di verificare che i cordoni di saldatura non presentino cricche o discontinuità sotto la superficie.

L'ispezione con liquidi penetranti prevede invece l'impiego di fluidi caratterizzati da un colore molto acceso e un'elevata tendenza a capillarizzare: il liquido viene fatto aderire alla superficie esterna del cordone di saldatura mediante l'uso di un pennello, riempiendo eventuali cricche o avvallamenti. Una volta asciutta, la zona viene sottoposta a lavaggio per rimuovere il fluido precedentemente applicato: qualsiasi residuo visibile di colore a seguito del lavaggio indica la presenza di una cricca o di un difetto.

Nel caso in cui i controlli non distruttivi dovessero evidenziare difetti nel volume e nella superficie esterna del cordone di saldatura, il prodotto risulterebbe non conforme e venire scartato o, in alcuni casi, necessitare di un *rework*<sup>5</sup>. In seguito ai controlli non distruttivi, a seconda del tipo di prodotto, sono previsti una serie di test strutturali, necessari per verificare che le zone saldate non cedano se sottoposte alle condizioni di carico di design. Nel caso dei piping di CSS, questi test hanno lo scopo di verificare, in tre fasi, che il requisito di leakage sia rispettato: viene effettuata una prova di leak sottoponendo l'assieme finito ad una pressione interna pari alla *MDP*<sup>6</sup>, seguita da una fase di proofing ad una pressione pari a  $1.5 \times MDP$  e da un'ultima prova di leak. Se durante tutte e tre le fasi il tasso di leakage rimane nei limiti definiti in fase di progetto, l'assieme finito può passare alla prossima operazione.

Questa prevede che il prodotto venga nuovamente imballato e sottoposto a marcatura identificativa provvisoria, per il trasferimento al reparto di controllo qualità. La marcatura segue delle regole ben precise, definite dalla specifica di marcatura, ed è necessaria per mantenere la serialità delle parti e la tracciabilità, durante tutta la vita operativa, dei prodotti finiti. In questo caso la marcatura è considerata provvisoria, dato che l'imballaggio dovrà essere rimosso per rendere possibile l'esecuzione del controllo visivo dell'assieme presso il reparto di controllo qualità. Quest'ultimo non si limita all'ispezione visiva dei singoli giunti, ma prevede

---

<sup>5</sup>Con "rework" si intende, nel caso delle saldature, la modifica o la rilavorazione completa del cordone di saldatura. Ciò può richiedere, in alcuni casi, il taglio e la sostituzione della porzione di tubo su cui è stata eseguita la saldatura non conforme.

<sup>6</sup>Maximum Design Pressure.

l'esecuzione di un controllo geometrico su tutto l'assieme; se anche quest'ultimo controllo dovesse trovare il prodotto del ciclo conforme alle specifiche di design, sarebbe possibile passare alla fase successiva, che prevede imballaggio e marcatura definitiva dell'assieme finito. Il *routing* termina con un'*operation* di immagazzinamento del prodotto finito, in modo che, successivamente, possa essere nuovamente prelevato per essere spedito o per essere utilizzato come parte in un altro *routing*.

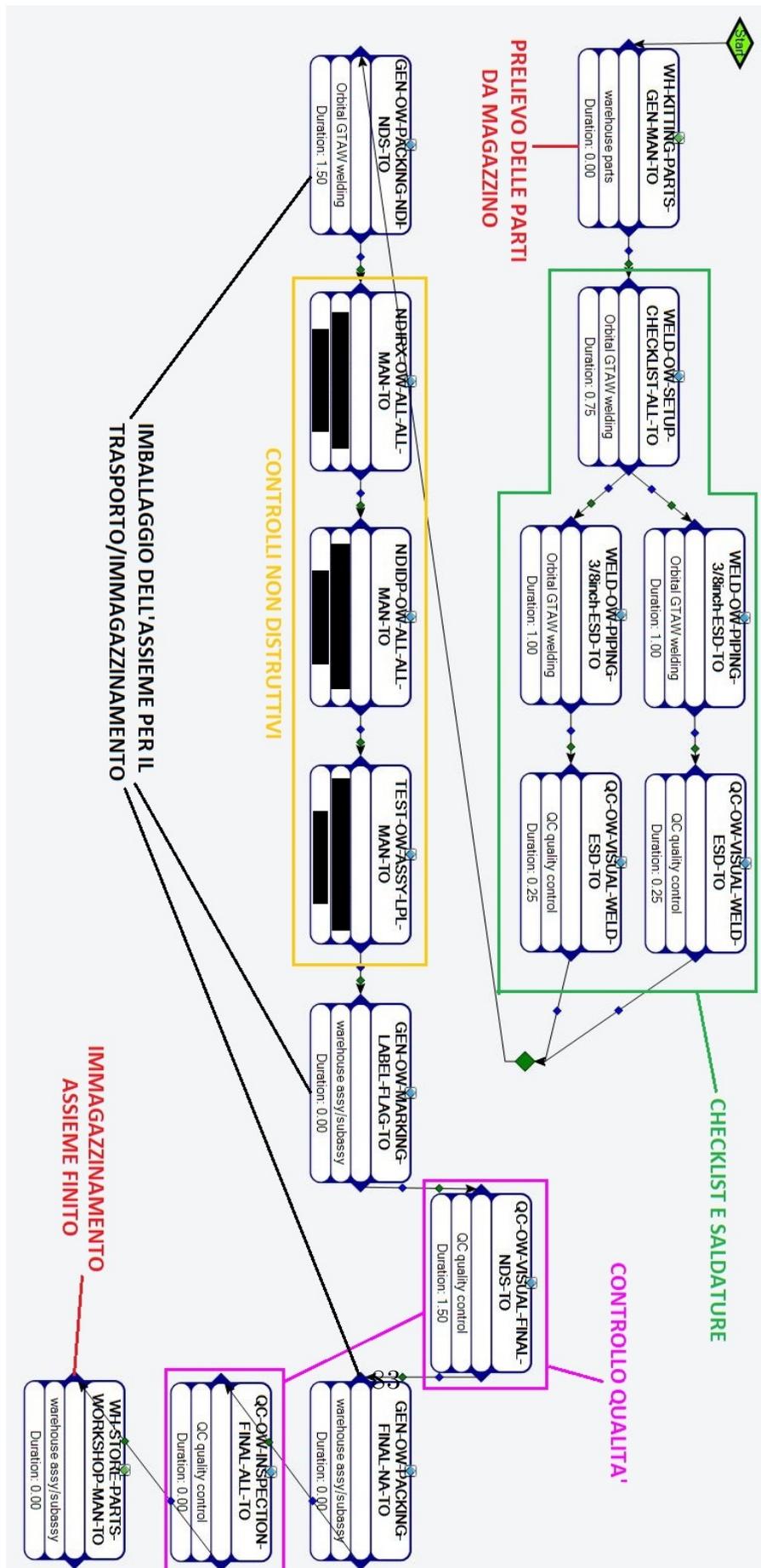


Figura 6.3: Routing NDS 2.1.

# Capitolo 7

## Orbital Welding

Nell'ambito dei sistemi CSS e TCS, descritti ampiamente nei capitoli precedenti, l'assemblaggio delle linee di piping avviene attraverso la creazione di giunti di saldatura; per garantire che il giunto non crei una discontinuità nelle prestazioni meccaniche del materiale di cui sono composti i vari tubi, e poter operare senza problemi alle pressioni di design, si è scelto di fare uso della saldatura TIG orbitale: questo capitolo sarà dedicato ad un approfondimento su questo metodo di saldatura.

### 7.1 Introduzione

La “saldatura gas-tungsteno ad arco orbitale” (Orbital GTAW), spesso chiamata semplicemente “orbital welding”, è un metodo di saldatura altamente specializzato utilizzato in origine prettamente in ambito aeronautico e spaziale, oggi usato anche nell'industria alimentare e in quella farmaceutica, in generale per le applicazioni in cui sono richieste un'elevata precisione e qualità del cordone di saldatura, in aggiunta ad alti standard di pulizia e igiene. Questa variante della tradizionale saldatura ad arco con elettrodo di tungsteno risolve i problemi di ripetibilità e di errore dell'operatore tipici della saldatura manuale, sfruttando un sistema prevalentemente automatizzato per generare giunzioni circolari continue su componenti cilindrici e tubi (è possibile eseguire saldature pipe-pipe e pipe-piastra), garantendo quindi uniformità e ripetibilità del giunto. La elevata ripetibilità e l'automazione del processo permettono di ridurre il carico di lavoro associato all'operatore, portando quindi ad una maggiore produttività e una miglior qualità del giunto rispetto alla saldatura TIG tradizionale. Il livello di esperienza richiesto all'operatore per eseguire saldature orbitali è poi sicuramente inferiore a quanto invece è richiesto ad un saldatore manuale. Infine, le contenute dimensioni della testa di saldatura permettono di operare anche in spazi ristretti o difficilmente accessibili, rendendo triviale saldature impossibili da realizzare manualmente senza

rinunciare alla sicurezza dell'operatore; una volta che la pinza è in posizione, infatti, è possibile avviare la saldatura da remoto proteggendo il saldatore da eventuali rischi ambientali. L'elevata densità energetica raggiungibile dagli archi elettrici rende inoltre possibile la saldatura di materiali notoriamente difficili da saldare, come ad esempio acciai inossidabili, leghe di nichel e titanio, mantenendo comunque la possibilità di utilizzare una configurazione di parametri meno energetica per saldare su leghe bassofondenti come quelle di alluminio; in alcuni casi è possibile saldare anche su ottone e bronzo. Infine, sotto determinate condizioni è anche possibile creare un cordone di saldatura quando le due estremità da giuntare sono costituite da materiali diversi. Questo processo è tuttavia meno frequente e richiede che i due materiali abbiano una simile saldabilità e temperature di fusione non distanti fra loro, per permettere la creazione di un cordone di saldatura conforme ai requisiti di uniformità. Gli svantaggi della saldatura TIG orbitale sono legati ai costi diretti ed indiretti: un impianto di saldatura orbitale richiede attrezzature più costose e sofisticate rispetto a processi alternativi, confrontabili nella qualità del giunto. Anche la scrittura delle procedure e la definizione dei corretti parametri di macchina per compilare i programmi di saldatura richiedono tempo ed elevati costi. Infine, i processi TIG hanno in genere un minor tasso di deposito di materiale rispetto ad altri processi di saldatura ad arco e richiedono quindi, in applicazioni in cui la profondità di cordone richiesta è elevata, un maggior numero di passate per creare il giunto richiesto. L'ostacolo posto dai costi di introduzione elevati sono tuttavia ampiamente giustificati se si ha bisogno di un processo di saldatura stabile, affidabile e altamente ripetibile.

## **7.2 Attrezzatura richiesta**

A seconda dell'applicazione, la postazione di saldatura può essere allestita secondo le esigenze di produzione, ma le seguenti attrezzature devono sempre essere presenti per permettere il funzionamento dell'impianto:

- Un generatore di saldatura;
- Bombole contenenti argon o una miscela argon-elio;
- Una testa saldante con elettrodo, annessi attrezzi di fissaggio e di regolazione adeguati;
- Linee di distribuzione per il gas.

In questo paragrafo verranno approfondite le attrezzature essenziali alla saldatura orbitale.

### 7.2.1 Generatore di saldatura

Il generatore è uno strumento essenziale in un impianto di saldatura orbitale, essendo l'elemento responsabile della generazione e della distribuzione della corrente elettrica necessaria alla testa saldante per generare l'arco elettrico; a seconda delle necessità, un generatore può produrre in uscita una corrente DC o AC, in base alla tipologia di elettrodi e materiali da saldare utilizzati e, nel caso di generatori programmabili, la totalità dei parametri di saldatura possono essere modificati. Un generatore per applicazioni orbitali è composto da diversi componenti, ciascuno dei quali è adibito ad una specifica funzione: Uno o più moduli inverter di potenza, per fornire la corrente di saldatura necessaria e per scaldare il filo di apporto in caso di saldatura a filo caldo;

- Un'unità di controllo programmabile responsabile della gestione dei parametri di saldatura associati ai vari programmi selezionabili dall'operatore;
- Un sistema di acquisizione dati per registrare le sequenze di saldatura.

In alcuni casi, specialmente per le applicazioni caratterizzate da un maggior grado di automazione, il generatore programmabile monitora e gestisce anche il sistema di raffreddamento della testa saldante, regola il flusso di gas e funge da strumento di diagnosi di eventuali malfunzionamenti. I generatori possono poi essere suddivisi in tre categorie, ognuna con i suoi specifici campi di applicazione:

- Generatori portatili;
- Generatori carrellati di media grandezza;
- Generatori multifunzione modulari.

I generatori portatili sono compatti, con una massa inferiore ai  $30\text{kg}$ , progettati per essere trasportati dall'operatore e spostati in caso di necessità. Questo tipo di generatori sono pensati per un'erogazione di corrente fino a  $160\text{ A}$  con alimentazione monofase a  $230\text{ V}$ , e possono gestire fino a quattro assi di controllo, ovvero quattro dispositivi possono essere controllati e programmati: la corrente di saldatura, il circuito del gas di protezione, la velocità di avanzamento della testa saldante e l'eventuale alimentatore del filo di apporto<sup>1</sup>. I generatori carrellati sono di dimensioni superiori rispetto a quelli compatti, e vanno quindi installati su un carrello dotato di ruote per poterli spostare a seconda delle necessità. L'alimentazione di questo tipo di generatori è generalmente trifase a  $400\text{ V}$ , ma in alcuni casi possono operare in modalità multitemperatura, generando correnti di saldatura con intensità fino a  $540$

---

<sup>1</sup>Vedi [3].



**Figura 7.1:** Una serie di generatori di diverse categorie.

A. l'operatore interagisce con il macchinario attraverso un'interfaccia dotata di uno schermo nei modelli più moderni e con un comando a distanza multifunzione. I generatori carrellati di media grandezza possono gestire fino a sei assi di controllo: in aggiunta ai quattro assi precedentemente elencati, in questo caso sono presenti anche il controllo dell'oscillazione e della tensione dell'arco<sup>2</sup>. I generatori modulari hanno modalità di funzionamento e capacità di erogazione di corrente comparabili ai generatori di medie dimensioni, con la possibilità accessoria di gestire sei o più assi di controllo, anche installabili in seguito attraverso l'aggiunta di schede elettroniche apposite, installabili direttamente sui pannelli della macchina. I singoli moduli aggiuntivi, così come tutte le porte di alimentazione del generatore, sono completamente programmabili dall'operatore e sono pensate per interfacciarsi con un PC dedicato, in modo da permettere una programmazione sia online che offline.

### 7.2.2 Bombole di gas inerte e linee di distribuzione

Per limitare il più possibile la possibilità che si generino difetti legati alla reazione di gas presenti nell'atmosfera per effetto delle alte temperature, come ossidi in superficie, inclusioni o porosità nel cordone di saldatura, la saldatura TIG viene eseguita in un'atmosfera protettiva di gas inerte, comunemente in argon: questo gas permette di avere una buona stabilità dell'arco anche a basse correnti ed è

---

<sup>2</sup>Vedi [3].

compatibile con tutti i tipi di materiali saldabili. In alcuni casi, tuttavia, può essere necessario incrementare l'energia di saldatura; a questo scopo si possono utilizzare altri gas da miscelare all'argon, ad esempio l'elio, l'azoto o l'idrogeno. L'elio, diversamente dall'argon, è un buon conduttore di calore e può quindi essere utilizzato per incrementare l'energia dell'arco, permettendo di creare cordoni di saldatura caratterizzati da una maggiore penetrazione. Questo gas può essere miscelato all'argon anche in concentrazioni molto elevate o addirittura utilizzato puro, e solitamente viene utilizzato su metalli con una buona conducibilità termica. Essendo una specie chimica molto leggera, se si sceglie di utilizzare elio in miscela o puro bisogna tenere conto che sarà necessario un afflusso di gas decisamente più abbondante rispetto all'argon per ottenere lo stesso grado di protezione. L'elio può essere utilizzato senza problemi sulla maggior parte dei materiali di base, non diversamente dall'argon, ma è preferito ad esso specialmente su metalli e leghe leggere, come le leghe d'alluminio e il titanio. L'idrogeno può essere aggiunto in miscela all'argon in basse concentrazioni ( $< 5\%$ ) con lo scopo di incrementare l'energia di saldatura e la profondità di penetrazione dell'arco. Tuttavia, questo gas viene utilizzato di rado per la sua tendenza a infiltrarsi all'interno dei grani metallici, generando inclusioni e porosità che possono ridurre le prestazioni meccaniche del cordone di saldatura e riducendone la vita a fatica per effetto di un incremento della criccabilità. L'utilizzo di idrogeno è poi vietato su metalli leggeri, come l'alluminio e il titanio. Per la saldatura di acciai Duplex e Super Duplex vengono solitamente utilizzate miscele di argon e azoto, ma possono essere utilizzati anche argon puro e miscele argon-elio. Il gas di protezione deve avere elevate purezze per garantire l'effetto protettivo; la purezza di un gas viene spesso indicata con un numero decimale a due cifre: il numero a sinistra della virgola indica il numero di "9" nel valore percentuale, mentre quello a destra indica l'ultima cifra nel valore percentuale. Ad esempio un gas con purezza 3.5 avrà una purezza percentuale del 99.95%. Nei processi di saldatura TIG la purezza dei gas di protezione deve essere superiore a 4.5, ma non è raro avere un requisito di purezza 5 o superiore, specialmente in applicazioni aerospaziali. Le linee che distribuiscono il gas di protezione sono spesso due: la linea diretta e la linea a rovescio. La prima è responsabile della protezione della superficie esterna del pezzo, esposta direttamente alla torcia di saldatura, mentre la seconda protegge la parte interna per garantire che il materiale che andrà a costituire il cordone rimanga puro e omogeneo. Nella saldatura TIG Orbitale non è raro che sia presente soltanto la linea a rovescio, specialmente nel caso si utilizzi una testa di saldatura a camera chiusa: il gas viene fatto fluire all'interno del tubo per tutta la procedura di saldatura, per evitare che le alte temperature vadano a far reagire le molecole dell'aria con il metallo di base.

### 7.2.3 Testa di saldatura

Per eseguire la saldatura TIG orbitale si possono utilizzare teste a camera aperta o chiusa, con o senza apporto di materiale; in questo paragrafo verranno approfondite le tipologie di torcia saldante esistenti e gli usi associati ad ogni tipologia. Le teste a camera chiusa sono utilizzate spesso nella saldatura autogena di tubi senza apporto di materiale aggiuntivo. Questa categoria di teste può saldare una grande gamma di diametri (da  $\frac{1}{16}$ " a circa 6") e di materiali, raggiungendo eccellenti risultati specialmente su acciai inossidabili, leghe di titanio e di zirconio. Per garantire un corretto posizionamento della testa sulle due estremità di tubo da saldare si utilizzano degli inserti semicircolari che mordono il tubo permettendo all'elettrodo, consumabile o non consumabile a seconda delle applicazioni, di ruotare "orbitando" attorno al pezzo e generare l'arco elettrico; Il sistema mordente della pinza di saldatura permette inoltre di eseguire le saldature senza il rischio che si presentino disallineamenti, che potrebbero provocare uno scarto della saldatura. Le teste di saldatura a camera aperta possono saldare con o senza apporto di materiale aggiuntivo, e possono operare su tubi con diametri fino a 11". A differenza della saldatura a camera chiusa, con camera aperta il gas di protezione viene concentrata esclusivamente nella zona limitrofa all'arco elettrico. Viene inoltre permesso all'operatore di monitorare e controllare l'arco elettrico, esposto, durante la saldatura. Per le applicazioni in cui sono richieste multiple passate per l'elevato spessore del tubo, infine, esistono le teste di saldatura carrellate. Questa tipologia di testa saldante è dotata di un carrello resistente in grado di sopportare per periodi prolungati il peso elevato delle apparecchiature, e possono essere dotate di telecamere per permettere all'operatore di monitorare la saldatura a distanza. Le teste carrellate possono avere ugelli per il gas protettivo simili a quelli in dotazione alle teste a camera aperta, oppure essere dotati di una torcia "narrow gap" in grado di fornire una protezione maggiore, paragonabile alle camere chiuse<sup>3</sup>. Per tutte le tipologie di teste saldanti, il vantaggio della saldatura orbitale risiede nella gestione dei parametri di corrente e di velocità di rotazione dell'elettrodo, assegnata ad un microprocessore in accordo con il programma di saldatura scelto dall'operatore: ciò permette di automatizzare gran parte del processo per ridurre al minimo l'errore umano. La testa di saldatura va sempre mantenuta pulita da eventuali residui carboniosi che possono formarsi specialmente sulla superficie interna, adiacente all'elettrodo, per evitare la possibilità che essi possano cortocircuitare il flusso di corrente generante l'arco elettrico, e permettendo quindi una continua ripetibilità delle caratteristiche e dei parametri associati al cordone di saldatura. Anche nel caso in cui si utilizzino elettrodi in tungsteno non consumabili, essi subiscono un deterioramento a seguito

---

<sup>3</sup>Vedi [3]

dell'utilizzo; è necessario pertanto stabilire, in fase di qualifica del processo produttivo e in accordo con quanto riportato nella documentazione fornita dal produttore dell'impianto, il numero di cicli di saldatura massimo oltre il quale è impossibile garantire la ripetibilità completa dei parametri di saldatura e quindi l'elettrodo deve essere sostituito.

## 7.3 Specifica del processo di saldatura orbitale

Per poter utilizzare la saldatura TIG orbitale su applicazioni aerospaziali occorre certificare che i giunti creati rispettino i requisiti stabiliti dalla specifica americana AWS D17.1: questo documento redatto dall'American Welding Society che fornisce le linee guida necessarie per le aziende che desiderino intraprendere la produzione di saldature a fusione su parti di volo, definendo i criteri di accettabilità di un giunto saldato, il tipo di elettrodo da utilizzare, le procedure da seguire per un corretto setup dell'attrezzatura e i controlli non distruttivi da effettuare per garantire la conformità del cordone di saldatura. Di seguito sono riportate alcune informazioni importanti per comprendere meglio questo processo produttivo.

### 7.3.1 Corrente di saldatura

Nei processi di saldatura orbitale possono essere applicati due tipi di corrente:

- Corrente continua o diretta (DC);
- Corrente alternata (AC).

La corrente DC è la più usata per la saldatura della maggior parte dei materiali. Se l'elettrodo viene connesso all'estremità negativa del generatore, la corrente scorre dall'elettrodo (negativo) al pezzo (positivo) attraverso l'arco elettrico, scaricando la maggior parte dell'energia rilasciata (circa il 70%) sul polo positivo sotto forma di energia termica e quindi scaldando a tutti gli effetti il pezzo; questa configurazione viene definita "DCEN". Se invece l'elettrodo è connesso al polo positivo la configurazione viene definita "DCEP": salvo applicazioni su materiali bassofondenti come le leghe d'alluminio, questa configurazione non viene utilizzata nei processi TIG, dato che tende a scaricare molta dell'energia sull'elettrodo sotto forma di energia termica, richiedendo quindi un efficiente sistema di raffreddamento per la torcia saldatrice. La corrente AC prevede che la polarità del flusso di corrente cambi periodicamente, alternando quindi il funzionamento dell'elettrodo come catodo e come anodo: quando l'elettrodo si comporta da anodo il flusso di calore si scarica maggiormente sull'elettrodo, rimuovendo eventuali ossidi o residui carboniosi dalla zona di saldatura sulla superficie del pezzo, mentre quando si comporta da catodo

il calore si scarica sul pezzo fondendone la superficie e permettendo all'elettrodo di tungsteno di raffreddarsi. Questa configurazione viene solitamente utilizzata su materiali bassofondenti come le leghe d'alluminio, preferita alla configurazione DCEP.

### 7.3.2 Energia di saldatura e apporto di calore

L'apporto di calore è una grandezza che non può essere misurata con strumenti specifici, quindi per studiarne gli effetti bisogna innanzitutto calcolarlo; a questo scopo si può utilizzare la seguente formula:

$$H = 60 \frac{UI}{S} \quad (7.1)$$

Dove  $H$  è l'apporto di calore, dimensionalmente assimilabile ad un'energia per unità di lunghezza ( $\frac{J}{mm}$ ),  $U$  è la tensione d'arco,  $I$  la corrente e  $S$  la velocità di avanzamento dell'arco elettrico sul cordone di saldatura. Questa formula assume che la corrente di saldatura sia continua e non tiene conto delle caratteristiche del processo di saldatura utilizzato. Se si volesse calcolare l'apporto di calore nel caso di corrente alternata occorrerebbe calcolare l'intensità media di corrente, come segue:

$$I_{mean} = \frac{I_h T_h + I_l T_l}{T_l + T_h} \quad (7.2)$$

Dove le grandezze con il pedice "h" sono rispettivamente l'intensità di corrente di picco  $I_h$  e la durata del picco  $T_h$ , mentre quelle con il pedice "l" sono rispettivamente l'intensità di corrente di base  $I_l$  e la durata del tempo di base  $T_b$ . Per considerare l'apporto di calore effettivo specifico per un determinato processo di saldatura occorre introdurre un parametro che ne esprima l'efficienza termica:

$$H_{eff} = \eta H \quad (7.3)$$

Il parametro di efficienza termica assume solitamente un valore compreso tra 0.6 e 0.8 nei processi TIG; ciò indica che, in genere, tra il 60% e l'80% dell'energia rilasciata dall'arco elettrico viene convertita in energia termica e va a scaldare il pezzo. La restante energia viene persa sotto forma di radiazioni, riscaldamento della torcia ed espansione del gas di protezione<sup>4</sup>. L'apporto di calore influisce sia sulla zona investita dal flusso termico, definita "zona termicamente alterata" o "ZTA", sia sul tasso di raffreddamento del pezzo dopo l'esposizione all'arco elettrico. Un basso apporto di calore si traduce ad esempio in una ZTA piccola e un elevato tasso

---

<sup>4</sup>Vedi[3]

di raffreddamento. Un rapido raffreddamento è spesso collegato ad una limitata variazione della struttura cristallina del materiale metallico, che si traduce in una variazione contenuta delle prestazioni meccaniche del giunto. Per questo motivo molti acciai trattati termicamente o altri materiali trattati con un trattamento di rafforzamento superficiale o di passivazione possono essere esposti al più ad un determinato apporto di calore; generalmente questo limite viene indicato dalle specifiche del produttore.

### **7.3.3 Il ruolo della corrente pulsata**

La saldatura orbitale può essere effettuata in posizioni e configurazioni differenti a seconda delle necessità; ad esempio, se lo spazio disponibile per la rotazione attorno al pezzo della torcia di saldatura è molto limitato si può decidere di utilizzare una configurazione nella quale è il tubo che ruota attorno al suo asse per generare lungo tutta la circonferenza il cordone di saldatura, mantenendo immobile la testa saldante. Quanto appena descritto accade spesso nelle applicazioni in cui è necessaria una elevata energia di saldatura a causa dell'elevato spessore delle parti da saldare, elemento che richiede l'impiego di teste di saldatura a camera aperta o carrellate. Le applicazioni in cui è il pezzo in rotazione sono comunque una minima parte rispetto a quelle in cui è invece la torcia di saldatura a mettere in rotazione l'elettrodo attorno alle parti da giuntare. È proprio in questa stragrande maggioranza di applicazioni che diventa necessario tener conto dell'effetto della gravità sul bagno di saldatura: il contatto con l'arco elettrico generato dall'elettrodo fonde il materiale compreso entro i limiti della zona termicamente alterata, rendendo la geometria assunta dal cordone di saldatura, una volta raffreddatosi e solidificatosi, dipendente dall'azione che la forza di gravità esercita su di esso a seconda del suo orientamento nello spazio al momento della fusione. Oltre a provocare disomogeneità geometriche, l'azione della gravità può determinare anche una disomogeneità nelle proprietà termiche del cordone, che si possono tradurre in una variazione nella velocità di raffreddamento di alcune zone rispetto ad altre e quindi nelle prestazioni meccaniche del giunto finito. Per limitare questi effetti i programmi di saldatura orbitale, molto di frequente, fanno uso della corrente pulsata, in combinazione alla divisione in differenti settori della saldatura. La corrente pulsata alterna due livelli di intensità di corrente nel tempo, un livello massimo e uno minimo, in un andamento a onda quadra: all'inizio la corrente passa da un valore nullo al valore massimo, per generare il primo punto di saldatura; la corrente, passato un certo lasso di tempo dipendente dalla profondità e dal diametro richiesti per il singolo punto di saldatura, viene ridotta fino al valore minimo per permettere al bagno di saldatura di raffreddarsi velocemente, riducendo così gli effetti che la forza di gravità può avere sul materiale fuso. La differenza tra il valore massimo e quello minimo dell'intensità di corrente dipende dallo spessore e dal diametro del tubo che si vuole saldare: maggiori sono il

diametro del tubo e il suo spessore, minori saranno gli effetti della gravità sul bagno di saldatura, risultando quindi in una minor differenza tra i due valori caratteristici della corrente pulsata. In congiunzione alla corrente pulsata, una programmazione dei parametri di saldatura basata su una divisione in zone della circonferenza diventa uno strumento fondamentale per limitare al massimo gli effetti della gravità sulle caratteristiche finali del giunto. Solitamente la circonferenza viene suddivisa in quattro zone di 90° ma con l'utilizzo di generatori moderni, completamente programmabili, è possibile suddividere il cordone in un numero superiore di settori o addirittura creare programmi che variano attivamente i valori massimo e minimo dell'intensità di corrente in modo continuo, per minimizzare al massimo gli effetti della gravità e generare giunti caratterizzati da una perfetta omogeneità.

### 7.3.4 Criteri visivi di accettabilità del giunto

Un giunto saldato deve essere sottoposto ad un'ispezione visiva e deve essere rispettare alcuni criteri di accettabilità per poter essere considerato conforme alle specifiche;

- Assenza di cricche visibili;
- Assenza di fusione incompleta o overlap;
- La colorazione del cordone deve essere compatibile con una totale assenza di ossidazione;
- Il cordone deve apparire "regolare", ovvero di spessore costante lungo tutta la circonferenza;
- La zona di evanescenza deve ridursi nello spessore in maniera graduale.

L'ispezione visiva va effettuata sia esternamente che internamente al piping: le superfici esterne vanno ispezionate ad occhio nudo o con l'ausilio di una lente, mentre quelle interne possono essere osservate utilizzando una sight-pipe. Su materiali come il titanio, che cambiano le loro proprietà cromatiche a seconda della quantità di calore assorbita e alla temperatura raggiunta, sono richiesti criteri aggiuntivi basati sul colore del cordone per poter valutare se la saldatura rispetta i requisiti.

### 7.3.5 Controlli non distruttivi sul giunto

In aggiunta all'ispezione visiva, su tutti i giunti è necessario eseguire dei controlli non distruttivi, per verificare la presenza o meno di difetti non riscontrabili durante l'ispezione visiva, come ad esempio porosità, disomogeneità metallografiche interne

alla saldatura, inclusioni oppure semplicemente cricche troppo piccole per poter essere osservate ad occhio nudo. Tendenzialmente i controlli non distruttivi effettuati variano a seconda dell'uso che verrà fatto della parte prodotta, dello spessore delle pareti del piping e delle esigenze del produttore; di seguito sono elencati i NDI applicabili:

- Controllo radiografico;
- Ispezione con correnti parassite;
- Controllo con liquidi penetranti;
- Ispezione con ultrasuoni;
- Magnetoscopia;

Alcuni metodi non sono applicabili a tutti i tipi di materiali saldabili, come ad esempio la magnetoscopia, che richiede materiali ferromagnetici per funzionare. La radiografia, il test delle correnti parassite, gli ultrasuoni e la magnetoscopia permettono di trovare difetti sub-superficiali e sono quindi definiti “Volumetric NDI” (controlli non distruttivi volumetrici), mentre l'ispezione con liquidi penetranti permette di trovare, se presenti, difetti superficiali non visibili a occhio nudo. In alcuni casi, specialmente in fase di certificazione del processo di saldatura o di nuove attrezzature, può essere necessario produrre dei provini che verranno sottoposti a controlli distruttivi, con lo scopo di effettuare un controllo metallografico più approfondito e stabilire i parametri di macchina corretti per lavorazioni future.

### **7.3.6 Tipologie di elettrodi utilizzabili**

Gli elettrodi utilizzati nella saldatura TIG orbitale sono sempre costituiti prevalentemente da tungsteno, materiale refrattario molto utilizzato principalmente per le sue elevatissime temperature di fusione e per la sua stabilità ad alte temperature; a seconda del materiale e delle caratteristiche geometriche dei pezzi da saldare, viene poi scelto se utilizzare un elettrodo di tungsteno puro, oppure se utilizzarne uno contenente altre specie chimiche sotto forma di ossidi o in lega con il tungsteno. Segue una caratterizzazione delle composizioni chimiche più utilizzate.

- Tungsteno puro: Questi elettrodi si possono facilmente riconoscere in quanto appaiono di color verde; possono trasmettere densità di corrente limitate e per questo motivo vengono solitamente utilizzati per saldare alluminio e leghe di alluminio, che sono tendenzialmente bassofondenti. Questi elettrodi sono tra i più economici ma in alcuni casi possono generare inclusioni di tungsteno in forma atomica all'interno del cordone di saldatura.

- Zirconio-Tungsteno: Gli elettrodi appartenenti a questa tipologia sono la scelta più diffusa per la saldatura TIG orbitale di leghe di alluminio utilizzando corrente alternata (AC); gli archi generati sono molto stabili e ammettono densità di corrente anche elevate, riducendo anche il rischio di generare inclusioni di tungsteno nella saldatura.
- Torio-Tungsteno: Gli elettrodi toriati sono molto diffusi nell'ambito della saldatura TIG manuale ma meno nella TIG orbitale; permettono di ridurre al minimo il rischio di inclusioni di tungsteno e possono trasmettere un'alta densità di corrente, per questo vengono solitamente utilizzati sotto corrente diretta (DC). Sono sempre meno utilizzati poiché il torio è un elemento a bassa radioattività, quindi per motivi di sicurezza spesso vengono preferite altre composizioni chimiche.
- Cerio-Tungsteno: Introdotti a partire dagli anni '80 per essere un sostituto quasi equivalente agli elettrodi Torio-Tungsteno, data l'assenza di isotopi radioattivi al loro interno; in termini di prestazioni sono comparabili agli elettrodi in puro tungsteno e possono essere usati sia in corrente diretta che alternata. Sono una scelta abbastanza diffusa per la saldatura TIG orbitale. Hanno una vita operativa elevata rispetto ad altre composizioni chimiche.
- Lantanidi-Tungsteno: Gli elettrodi lantanati sono un'altra alternativa priva di caratteristiche radioattive a quelli toriati, praticamente equivalenti ai Cerio-Tungsteno. Sono spesso utilizzati, sia in corrente alternata che diretta, nella saldatura TIG orbitale. Permettono di gestire densità di corrente più elevate rispetto ai ceriati, ma sono meno efficienti.
- Cerio-Lantano-Tungsteno: Questa composizione chimica permette di avere un compromesso eccellente tra la durata della vita degli elettrodi Cerio-Tungsteno e la massima densità di corrente dei lantanati.

Per mantenere un livello sempre costante di penetrazione e un arco stabile, occorre effettuare l'affilatura dell'elettrodo, utilizzando una specifica macchina affila-elettrodi: l'affilatura consiste nell'incisione della parte rastremata dell'elettrodo con delle tracce longitudinali. Per ottenere una corretta affilatura è necessario che le tracce siano parallele all'asse dell'elettrodo.

## Capitolo 8

# Conclusioni

La stesura di questo elaborato ha rappresentato per me un'occasione preziosa per approfondire tematiche rilevanti nel panorama aerospaziale italiano, con particolare riferimento alla progettazione e alla produzione di sistemi di controllo termico e distribuzione di fluidi associati a moduli di supporto, in questo caso il modulo ESM-MPCV della navicella Orion. Grazie all'esperienza da me intrapresa in collaborazione con Thales Alenia Space, ho potuto osservare da vicino le complessità connesse alla realizzazione di sottosistemi fondamentali per il corretto funzionamento di un modulo abitabile destinato all'orbita lunare, costituiti da piping assemblati mediante processi di saldatura orbitale.

Nel corso della trattazione, sono stati analizzati i principi di funzionamento dei sistemi di controllo termico (Thermal Control System) e di distribuzione e stoccaggio consumabili (Consumables Storage Subsystem) con una successiva analisi delle relative configurazioni, componenti e criteri di progettazione. Una particolare attenzione è stata rivolta alla fase di selezione delle soluzioni progettuali, supportata da un'accurata analisi di trade-off che ha consentito di identificare le architetture più efficaci in termini di prestazioni termiche, robustezza strutturale e compatibilità con le esigenze del modulo.

- La prima analisi di trade-off affrontata ha analizzato approfonditamente le prestazioni termiche di diversi fluidi refrigeranti in termini di *cooling effectiveness*, con lo scopo di stabilire il più adeguato all'implementazione come medium per il trasferimento termico nel sistema TCS del modulo ESM-MPCV; al termine della disamina iniziale, i due fluidi potenzialmente più prestazionali sono risultati essere l'ammoniaca ( $NH_3$ ) e il HFE-7200. La scelta finale è tuttavia ricaduta sul HFE-7200, vista la troppo elevata pressione necessaria al corretto funzionamento dell'ammoniaca nel sistema TCS e alle dirette conseguenze progettuali di questo fattore.

- Successivamente, è stata affrontata un'analisi per la scelta della migliore architettura, in termini costruttivi e strutturali, dei radiatori del sistema TCS del modulo ESM-MPCV. Questi ultimi, oltre a dover espletare la loro primaria funzione di dissipazione termica, hanno il ruolo di fornire protezione per il modulo di supporto da detriti spaziali e meteoroidi. In particolare, l'analisi ha confrontato l'efficacia, dal punto di vista della protezione fornita nei confronti di impatti di detriti di ridotte dimensioni, di due diverse configurazioni: la prima, completamente estrusa, "Plate / Stiffeners" e la seconda, caratterizzata da un pannello sandwich con cuore a nido d'ape, "Honeycomb"; sono state inoltre considerate due ulteriori configurazioni, identiche alle prime due ma con un design più conservativo dal punto di vista della massa. La disamina ha condotto, infine, alla scelta della configurazione "Plate / Stiffeners" ottimizzata, in quanto la configurazione "Honeycomb" avrebbe comportato un incremento di massa della struttura e maggiori complicazioni produttive senza tuttavia presentare miglioramenti dal punto di vista termico. Viene sì rilevata una migliore capacità, della configurazione scartata, di assorbire impatti obliqui con meteoroidi e detriti rispetto a quella scelta, fattore considerato tuttavia meno rilevante ai fini progettuali.
- Proseguendo, è stata indagata la possibilità di ottimizzare il design dei condotti per il trasporto del refrigerante dal punto di vista della conduzione termica tra essi e la superficie radiativa; in particolare, è stato ipotizzato che l'implementazione di scanalature, o *grooves*, nella superficie interna dei condotti, avrebbe potuto migliorare il trasferimento termico tra il fluido refrigerante e la superficie del radiatore. Alla luce dell'analisi, tuttavia, è stato dimostrato che la resistenza termica principale nella *Analysis Network* è costituita dalla resistenza radiativa. Pertanto un limitato miglioramento del flusso termico tra il fluido refrigerante e la superficie radiativa è risultato irrilevante, specialmente a fronte di complicazioni produttive e di una maggiore potenza richiesta al FPP per l'incremento dell'attrito a parete causato dalle scanalature. È quindi stato scelto di mantenere il design semplice, privo di scanalature.
- Similmente a quanto fatto per i condotti per il trasporto del refrigerante, è stata poi indagata la possibilità di migliorare le prestazioni termiche del ramo delle cold plates, in termini di assorbimento del calore proveniente dai sistemi avionici del veicolo spaziale. In particolare, questa analisi di trade-off ha confrontato la configurazione tradizionalmente implementata nel progetto preliminare del modulo ESM-MPCV, definita *baseline* e caratterizzata da una disposizione full serial delle cold plates, con due varianti: una full parallel e una ibrida, nella quale le nove cold plates sono disposte in tre rami costituiti da tre cold plates in serie. Anche in questo caso, a fronte di un'approfondita analisi, la soluzione tradizionale si è rivelata la più adeguata in quanto, una

ramificazione parallela delle linee avrebbe provocato una rilevante riduzione della velocità del flusso di refrigerante in corrispondenza delle cold plates, riducendo il coefficiente di scambio termico del sistema. Anche l'incremento di massa richiesto per implementare un'architettura full parallel o ibrida risulta essere un caveat non trascurabile.

- Infine, è stata affrontata un'investigazione per determinare la migliore architettura per l'assieme radiatori. Le tre configurazioni considerate, analogamente al caso precedente, vedono i radiatori posti fra loro in serie, in parallelo o in una configurazione ibrida. La soluzione full parallel, in questo caso, offre dei vantaggi dal punto di vista termico in quanto, in assenza di guasti, questa configurazione permetterebbe di avere una temperatura costante su tutto l'assieme radiatori e quindi una dissipazione del calore omogenea per irraggiamento; rimane tuttavia una soluzione esosa dal punto di vista del budget di massa del modulo, oltre a complicare in maniera rilevante il progetto. Analogamente, la soluzione ibrida risulta vantaggiosa in termini di distribuzione del calore sulla superficie radiativa, ma mantiene la complessità delle linee e il non trascurabile incremento di massa. A fronte di quanto detto, è stato scelto di implementare una soluzione full serial che, nonostante la disomogeneità nella distribuzione del calore nei radiatori, risulta avere comunque prestazioni migliori in termini di potenza termica dissipata grazie alla minore caduta di velocità del flusso. La soluzione scelta offre inoltre vantaggi dal punto di vista della massa, dato che non richiede l'implementazione di restrittori di flusso e di altri componenti per il corretto funzionamento dell'impianto, che ne incrementerebbero in modo rilevante il peso totale.

La seconda parte dell'elaborato ha poi affrontato le fasi produttive legate alla realizzazione fisica dei sistemi trattati, descrivendo i cicli di produzione, il ruolo dei documenti MOS e l'iter di approvazione dei processi. L'introduzione progressiva di un sistema informatico MES (Manufacturing Execution System), nella fattispecie DELMIA Apriso, ha rappresentato un ulteriore punto di approfondimento: si è discusso dei vantaggi offerti da tale strumento nella gestione centralizzata dei processi produttivi, nella digitalizzazione delle operazioni e nell'ottimizzazione dei flussi di lavoro. Sebbene la digitalizzazione dei processi presenti criticità, soprattutto in contesti a produzione discreta come quello che si può trovare in Thales Alenia Space, l'adozione graduale del MES si sta dimostrando una scelta adatta, seppur complessa, ad aumentare l'efficienza produttiva e la tracciabilità delle operazioni di manufacturing.

Infine, è stato dedicato spazio ad un approfondimento sulla saldatura orbitale, tecnologia produttiva essenziale per l'assemblaggio delle linee TCS e CSS. Questo processo, caratterizzato da un alto livello di precisione, ripetibilità e automazione, è risultato essere particolarmente adatto ad una progressiva digitalizzazione tramite

il sistema MES. La mia attività in azienda mi ha permesso di contribuire alla creazione dei primi Routing digitali per i cicli di saldatura orbitale, applicati ad assemblaggi reali del modulo ESM.

Nel complesso, il lavoro svolto ha messo in evidenza l'interconnessione tra progettazione e produzione, tra esigenze funzionali e realtà operative. Sono state esaminate le difficoltà che le aziende produttive moderne devono affrontare quando tentano di congiungere l'innovazione digitale e la tradizione industriale. L'esperienza maturata ha rafforzato la mia consapevolezza sull'importanza di un approccio integrato e multidisciplinare nell'ambito dell'ingegneria aerospaziale, nonché sull'efficacia di strumenti come le analisi comparative, la tracciabilità digitale e i metodi automatizzati nella realizzazione di sistemi complessi destinati all'ambiente spaziale.

# Fonti

- [1] F. Schäfer, S. Ryan e M. Lambert. «Ballistic limit equation for equipment placed behind satellite structure walls». In: *International Journal of Impact Engineering* (2008) (cit. a p. 25).
- [2] X.-K. Zhu. «Exact Solution of Burst Pressure for Thick-Walled Pipes». In: *International Journal of Mechanical Sciences* (2023) (cit. a p. 46).
- [3] Polysoude S.A.S. *Guida alla saldatura orbitale*. Nantes, FR: Polysoude, 2009 (cit. alle pp. 86, 87, 89, 91).

# Ringraziamenti

Prima di iniziare con i sentimentalismi, è doveroso ringraziare il mio relatore, il Dr. Stefano Primatesta, per il supporto che mi ha fornito durante la stesura di questo elaborato. Sentiti ringraziamenti per avermi dato l'opportunità di scrivere questa tesi, inoltre, vanno a Thales Alenia Space e al mio tutor aziendale, Stefano Rossi.

*«Coraggio, ce la puoi fare!».*

Questa è la frase che negli ultimi otto anni mi sono sentito dire più spesso dalle persone a me più care. Dopo tutto questo tempo è ora che io dedichi questo spazietto, al termine della mia tesi, per esprimere la mia più sincera gratitudine verso quelle persone che, anche solo una volta in questi otto lunghi anni, hanno creduto in me e nelle mie capacità.

Il primo ringraziamento va a quelle persone che da sempre sono in prima linea per me: i miei genitori, Leandra e Sergio, e Adriano. Se oggi sono qui, a festeggiare questo traguardo, è solo perchè voi ci siete sempre stati e avete sempre voluto il meglio per me. Negli anni siete stati le mie più importanti figure di riferimento e non sarei chi sono oggi se non fosse stato per voi ed il vostro amore nei miei confronti. Vi ringrazio per esservi presi cura di me anche quando, soprattutto negli ultimi anni, mi sono sentito sopraffatto e ho pensato di mollare. Grazie a voi e alla vostra presenza nella mia vita, oggi so che tipo di persona aspiro a diventare. Ringrazio di cuore anche i miei nonni, che hanno sempre fatto tanto per me senza mai chiedere nulla in cambio.

A tutti voi, *vi voglio bene*, e spero di avervi resi fieri di me.

Un ringraziamento speciale va, senza dubbio, a Celine. Da quando sei entrata nella mia vita, ormai più di cinque anni fa, non passa giorno che io non ringrazi l'universo di averci fatti incontrare. Non sei solo stata un supporto essenziale durante il mio percorso universitario, ma la mia forza. Sei stata la mia luce quei giorni in cui il mondo mi crollava addosso e vedevo solo oscurità, la fonte dei miei sorrisi quando ero triste, l'amica più paziente e comprensiva quando avevo bisogno

di essere ascoltato e la compagna di vita migliore che potessi mai chiedere per tutto il resto del tempo. Grazie, perchè senza di te e il tuo amore non sarei arrivato a questo traguardo.

Infine, un ringraziamento va rivolto a tutte quelle persone che, in questi anni, hanno arricchito la mia esistenza con la loro amicizia, facendomi sentire fortunato e mai solo. Grazie a Daniel, Giulio, Luca, Elena, Nicole e Bruno, per essere miei amici da tempo immemore: nonostante i tanti anni passati e le diverse strade percorse, gli allontanamenti e i riavvicinamenti, sono sinceramente grato di avervi nella mia vita. Grazie a Daniele, Davide, Edoardo e Samuel, per aver condiviso con me, in questi anni, momenti leggeri ma anche discorsi impegnati e stimolanti. Il tempo passato con voi, tra risate e pianti, giochi da tavolo e chiacchierate, è stato veramente prezioso per me in questi anni a dir poco complessi. Grazie ancora.

Per terminare, sembrerà strano, ma vorrei ringraziare colei che mi ha accompagnato per tutta la vita, la mia ansia. Abbiamo avuto da sempre un rapporto conflittuale io e lei, a volte ho pensato che sarebbe stato meglio se non fosse mai esistita. Senza di lei probabilmente sarebbe stato tutto più semplice, sarei più estroverso e ottimista, probabilmente avrei anche terminato prima l'università. Per tanti anni mi sono chiesto cosa avessi fatto di male per meritarmi un'ansia così forte da immobilizzarmi e l'ho percepita esclusivamente come una condanna.

*Oggi no.*

Oggi, finalmente, sento di averla accettata: non come una sensazione passeggera, ma come una parte di me. Oggi ho capito che l'ansia non ha mai voluto farmi soffrire, ha solo cercato in maniera piuttosto goffa di proteggermi. Così come una madre premurosa cerca di preservare la salute e il benessere del proprio pargolo, l'ansia cerca di preservare noi stessi in uno status quo che ci è comodo e familiare, allarmandosi e facendosi sentire specialmente quando si è in procinto di affrontare cambiamenti imminenti.

Crescere e diventare adulti significa affrontare il cambiamento a testa alta, accettando che l'ansia ci accompagnerà sempre nonostante le esperienze vissute e le soddisfazioni raggiunte. Cambiare, nonostante lei cerchi di impedircelo, è ciò che ci rende realmente forti, ciò che ci ricorda che siamo vivi.

*Che senso avrebbe la vita senza quella sensazione di soddisfazione e pienezza che ci assale dopo aver superato la causa della nostra ansia?*

Perciò grazie, ansia. Grazie di rendermi ogni giorno più forte.

Grazie di ricordarmi ogni giorno che sono vivo.

