

Ricerca di Sistema elettrico



Sviluppo di componenti per impianti di produzione di energia da realizzare mediante AM (LA3.5)

Daniele Mirabile Gattia, Giuseppe Corallo,
Christian Bellusci, Angelo Tati

SVILUPPO DI COMPONENTI PER IMPIANTI DI PRODUZIONE DI ENERGIA DA REALIZZARE MEDIANTE AM (LA3.5 *Sviluppo di componenti per impianti di produzione di energia da realizzare mediante AM*)

Daniele Mirabile Gattia, Giuseppe Corallo, Christian Bellusci, Angelo Tatì (ENEA)

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione*

Progetto: *1.4 Materiali di frontiera per usi energetici*

Linea di attività: LA 3.5

Responsabile del Progetto: *Daniele Mirabile Gattia (ENEA)*

Responsabile del Work Package: *Daniele Mirabile Gattia (ENEA)*

Responsabile Linea di Attività: *ENEA*

Mese inizio previsto: gennaio 2022

Mese inizio effettivo: gennaio 2022

Mese fine previsto: giugno 2023

Mese fine effettivo: giugno 2023

Indice

1	RISULTATI ATTESI	3
2	RISULTATI OTTENUTI.....	4
3	PRODOTTI ATTESI.....	6
4	PRODOTTI SVILUPPATI	6
5	ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI	7
6	SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE	8
7	DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	9
8	CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE.....	23
9	PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE.....	24
10	EVENTI DI DISSEMINAZIONE	25

1 Risultati attesi

Lista dei risultati attesi come da capitolato vigente

- 1.1 Progetto di una turbina radiale-assiale per utilizzo in impianti ORC per uso residenziale (potenza inferiore a 10 kW)*
- 1.2 Individuazione di limiti dimensionali di impianto, temperature di lavoro etc., realizzati a partire da componenti stampate mediante AM*
- 1.3 Indagini su palette con diverse inclinazioni rispetto al piano di stampa*

2 Risultati ottenuti

Lista dei risultati ottenuti

2.1 Progetto di una turbina radiale-assiale per utilizzo in impianti ORC per uso residenziale (potenza inferiore a 10 kW)

L'attività nel triennio prevede, in un'ottica di sostenibilità, la realizzazione, mediante additive manufacturing, di una turbina per impianti di produzione di energia ORC (Organic Rankine Cycle), ovvero a ciclo Rankine con fluido organico, con elevato peso molecolare. Questi impianti prevedono un ciclo termodinamico di un fluido organico tra una sorgente calda e una fredda. Il fluido viene inizialmente pompato e inviato all'evaporatore, uno scambiatore di calore, dove il fluido evapora, prima di espandere in una turbina. Durante l'espansione, avviene la trasformazione dell'energia termica in energia meccanica di rotazione di un asse collegato a un generatore di corrente, che permette di trasformare il lavoro utile in energia elettrica. Dopo l'espansione il fluido condensa all'interno di un condensatore e può essere pompato nuovamente verso l'evaporatore. Il ciclo del fluido può essere modificato mediante l'inserimento di un rigeneratore il quale recupera parte del calore ancora contenuto nel fluido prima di arrivare al condensatore. Questo calore viene trasferito al fluido prima dell'evaporatore, incrementando il rendimento del ciclo. La sorgente calda può essere un flusso di calore di scarto o di calore proveniente da impianti di energia rinnovabile, quali impianti solari termici, geotermici e a biomasse. La temperatura della sorgente calda è in genere inferiore a 200°C, quindi difficilmente riutilizzabile con altri metodi di recupero del calore. Gli impianti ORC vengono utilizzati per aumentare l'efficienza di processi nei quali si dissipa calore a bassa temperatura. Essendo bassa la temperatura della sorgente calda, i rendimenti di questi impianti sono limitati e possono essere intorno al 12% per impianti di piccola taglia (< 200 kW) e 20% per impianti con potenza superiore a 2 MW.

L'attività in corso ha previsto quindi una prima fase di preparazione di un software per il calcolo del ciclo termodinamico, sulla base di dati in ingresso, compatibili con il funzionamento di un impianto ORC per utilizzo nel settore domestico e residenziale (potenze interno a 10kW). Nella seconda fase è stata effettuata la progettazione di una turbina mediante l'utilizzo di un software di progettazione per turbomacchine, acquisito nel progetto. La fase di progettazione ha permesso la generazione di un file con estensione stl per la stampa della turbina stessa.

2.2 Individuazione di limiti dimensionali di impianto, temperature di lavoro etc., realizzati a partire da componenti stampate mediante AM

Sono stati individuati i limiti dimensionali degli impianti che possono essere realizzati a partire da componenti stampate mediante AM. In particolare è stato considerato il massimo volume di stampa della stampante EBM presente nel CR Casaccia: 200x200x380. Il volume di stampa è molto superiore a quello richiesto per la realizzazione di una turbina per un impianto da 10kW di potenza. Inoltre è possibile stampare nello stesso "build" diverse turbine, ottimizzando quindi i tempi di utilizzo della macchina. Il software che è stato realizzato per la simulazione del ciclo termodinamico ha permesso di definire delle condizioni di esercizio per questi impianti.

2.3 Indagini su palette con diverse inclinazioni rispetto al piano di stampa

Le attività condotte nel periodo in oggetto hanno permesso da una parte di realizzare degli strumenti che forniscono i dati in ingresso ad un software di progettazione per turbo-macchine e da questo di ottenere il file con standard stl, il quale può essere utilizzato per la stampa di una turbina, dall'altre di realizzare dei campioni finalizzati all'ottimizzazione della stampa della turbina. Sono state effettuate delle prove di

stampa mediante EBM realizzando inizialmente dei profili di paletta e successivamente, anche se non prevista in questa LA, un'intera turbina, con diametro 85 mm e altezza 35 mm con 12 palette di spessore 0.6 mm. Le prove effettuate hanno permesso di considerare la possibilità di limitare l'uso dei supporti.

La turbina è stata progettata quindi per impianti per la produzione di energia di tipo ORC da 10 kW, che possono trovare applicazione nel settore domestico o residenziale. Nel caso la turbina venisse realizzata mediante lavorazioni meccaniche (macchina CNC a 5 o più assi) da un tondo pieno, circa l'80 % del materiale verrebbe trasformato in truciolo, che andrà successivamente rifuso per poter essere riutilizzato. Inoltre le lavorazioni, in particolare nel caso delle leghe di titanio, richiedono un numero elevato di ore. Per componenti di questo tipo quindi l'utilizzo dell'additive manufacturing potrebbe portare dei benefici al processo produttivo.

Nel prosieguo dell'attività si approfondirà il processo di stampa EBM, con l'obiettivo di limitare l'eventuale deformazione del componente, dovuta principalmente ad elevati carichi termici e a parametri di stampa non corretti, e di ridurre l'utilizzo dei supporti al fine di limitare il più possibile i trattamenti post-stampa. Inoltre verranno effettuati dei trattamenti, tra i quali sabbiatura o shot peening, per valutare la possibilità di ridurre l'elevata rugosità superficiale che caratterizza i campioni realizzati mediante EBM.

3 Prodotti attesi

3.1 Progetto di una turbina radiale-assiale per utilizzo in impianti ORC per uso residenziale (potenza inferiore a 10 kW)

Tra i prodotti attesi nella LA era previsto, previa acquisizione di un software per la progettazione di turbomacchine, il progetto di una turbina, di tipo radiale-assiale, per un impianto ORC idoneo la settore domestico-residenziale con potenza inferiore ai 10kW.

3.2 Redazione del report tecnico

L'attività prevedeva la redazione di un report tecnico delle attività sperimentali svolte.

4 Prodotti sviluppati

4.1 Progetto di una turbina radiale-assiale per utilizzo in impianti ORC per uso residenziale (potenza inferiore a 10 kW)

Mediante l'utilizzo del software CFTURBO, sono state progettate alcune turbine per impianti ORC di potenza prossima ai 10kW. I parametri in ingresso, per la progettazione della turbina sono stati ottenuti mediante un software per la stima dei parametri termodinamici (temperatura, pressione, entalpia, entropia, titolo del vapore) del ciclo (vedi punti successivi).

4.2 Software per la determinazione dei parametri di progettazione dell'impianto ORC

In aggiunta, rispetto a quanto previsto nella tabella 4 della proposta di progetto, è stato realizzato un software per la stima delle condizioni di lavoro di un impianto ORC. Il software, implementato mediante Labview, permette: di scegliere un fluido di lavoro, partendo da un database open source; scegliere delle condizioni di esercizio, dipendenti dalle caratteristiche di un ipotetico sito di installazione dell'impianto, sostanzialmente le temperature della sorgente e del pozzo di calore; di determinare, sulla base delle condizioni di esercizio, portata del fluido, potenza teorica dell'impianto.

4.3 Palette con diverse inclinazioni rispetto al piano di stampa

Sono stati realizzati, mediante processo EBM, diversi profili di paletta con diverse inclinazioni. E' stata posta particolare attenzione alla possibilità di realizzare questi profili senza l'utilizzo di supporti, per ridurre al minimo le lavorazioni post-stampa.

4.4 Realizzazione mediante processo EBM di una intera turbina

Inizialmente era prevista la realizzazione solamente di profili di paletta per valutare la possibilità di realizzare mediante EBM delle palette con elevate inclinazioni rispetto al piano orizzontale. In aggiunta a quanto previsto sono state realizzate due turbine di dimensioni prossime a quelle previste per la realizzazione dell'impianto ORC da 10 kW.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Le attività sperimentali della LA 3.5 non presentano scostamenti rispetto a quanto previsto nella proposta e non sono individuabili criticità rispetto a quanto previsto nel piano di rischio. L'attività in realtà ha portato a un maggior numero di prodotti sviluppati, in particolare il software per la stima dei parametri di massima dell'impianto ORC e la realizzazione mediante il processo di stampa EBM di due turbine di dimensioni compatibili con quelle previste per l'impianto ORC da 10kW.

Dal punto di vista economico c'è stata una lieve variazione dei costi per materiale di consumo, dovuta principalmente a una mancata fornitura della polvere necessaria per la stampante EBM ARCAM A2X sita presso il CR Casaccia (polvere di lega metallica Lega Ti64-GR2345-106, Ti-6Al-4V grade 23, granulometria 45-106). Il materiale verrà rendicontato nel prossimo SAL. L'attività è stata comunque svolta utilizzando una riserva di materiale presente in laboratorio.

6 Sintesi delle attività svolte

La necessità di una maggiore indipendenza energetica e l'avvio di un processo di decarbonizzazione, come stabilito nel PNIEC 2023 e nel Set Plan, è alla base della ricerca di sistemi innovativi di produzione di energia basati su impianti di fonti rinnovabili. Gli ORC sono una tecnologia strutturata con numerosi impianti installati nel mondo a partire dagli anni '80. Mentre sono presenti diversi produttori di impianti di media e alta potenza, sono in numero limitato quelli che producono impianti di piccola taglia, inferiore ai 200 kW, che possono trovare applicazione nel settore domestico e residenziale o come sistemi a loro volta cogenerativi per lo sfruttamento di cascami di calore industriale. A partire da queste premesse l'attività ha visto la progettazione di una turbina, per impianti ORC da 10kW, e la sua realizzazione mediante processi di manifattura additiva a letto di polvere mediante fascio di elettroni (EBM). Il lavoro ha previsto inoltre caratterizzazioni microstrutturali e non distruttive dei componenti realizzati.

6.1 Progetto di una turbina radiale-assiale per utilizzo in impianti ORC per uso residenziale (potenza inferiore a 10 kW)

Mediante l'utilizzo del software CFTURBO, sono state progettate alcune turbine per impianti ORC di potenza prossima ai 10kW. I parametri in ingresso, per la progettazione della turbina sono stati ottenuti mediante un software per la stima dei parametri termodinamici (temperatura, pressione, entalpia, entropia, titolo del vapore) del ciclo (vedi punti successivi).

6.2 Software per la determinazione dei parametri di progettazione dell'impianto ORC

In aggiunta, rispetto a quanto previsto nella tabella 4 della proposta di progetto, è stato realizzato un software per la stima delle condizioni di lavoro di un impianto ORC. Il software, realizzato implementato mediante Labview, permette: di scegliere un fluido di lavoro, partendo da un database open source; scegliere delle condizioni di esercizio, dipendenti dalle caratteristiche di un ipotetico sito di installazione dell'impianto, sostanzialmente le temperature della sorgente e del pozzo di calore; di determinare, sulla base delle condizioni di esercizio, portata del fluido, potenza teorica dell'impianto.

6.3 Palette con diverse inclinazioni rispetto al piano di stampa

Sono stati realizzati, mediante processo EBM, diversi profili di paletta con diverse inclinazioni. E' stata posta particolare attenzione alla possibilità di realizzare questi profili senza l'utilizzo di supporti, per ridurre al minimo le lavorazioni post-stampa.

6.4 Realizzazione mediante processo EBM di una intera turbina

Inizialmente era prevista la realizzazione solamente di profili di paletta per valutare la possibilità di realizzare mediante EBM delle palette con elevate inclinazioni rispetto al piano orizzontale. In aggiunta a quanto previsto sono state realizzate alcune turbine di dimensioni analoghe a quelle previste per la realizzazione dell'impianto ORC da 10 kW.

7 Dettaglio delle attività svolte

La produzione di energia elettrica mediante impianti ORC ha subito negli ultimi anni un enorme impulso. Sono diverse le aziende nel mondo che realizzano impianti di media e grossa taglia. E' possibile citare in primis l'azienda Turboden che ha al suo attivo 455 impianti installati in 52 paesi del mondo. L'azienda ha mosso i suoi primi passi nel campo degli ORC negli anni '80 in Italia, partendo dagli studi del Prof. Angelino e del Prof. Mario Gaia, fondatore, presso il Politecnico di Milano. Dal 2013 è entrata a far parte del gruppo Mitsubishi Heavy Industries. Nel 2016 Turboden ha installato il più grande impianto ORC a biomassa da 8 MW [1]. Alcune delle aziende produttrici di ORC, il numero di impianti e le potenze installate sono riportati nella Tabella 1 [2]. Oltre alle aziende citate è possibile aggiungere le seguenti: ENEL Green PowerX, Ingeco, Exaenergie, Exergy, Freepower, Atlas Copco, Newcomen Siemens, Bosch Kwk Kohler&Ziegler.

Sono presenti al momento alcune aziende che producono ORC di piccola potenza (Micro-ORC), in genere basati sull'utilizzo di espansori volumetrici o micro-turbine, non prodotte mediante stampa 3D. Alcune delle aziende che producono Micro-ORC sono: le italiane RENEX, S.TRA.TE.G.I.E. srl, spin-off dell'Università delle Marche nato nel 2005, Starengine produce espansori brevettati per ORC di piccola potenza, da 11 a 30 kWel, Zuccato Energia, azienda italiana, ha una linea di impianti ORC a bassa potenza tra i 30 e i 100 kWel, l'azienda tedesca DEPRAG SCHULZ GMBH & CO, le aziende americane Calnetix e Electratherm e l'azienda svedese Againity.

Lo scenario descritto considera quindi diversi esempi di micro-generatori e impianti ORC, ma nessuno che utilizza turbine realizzate mediante AM.

Tabella 1: aziende produttrici di ORC, numero di impianti e potenza totale installata (aggiornata al 31/12/2016) [2]

Produttore ORC	Impianti ORC	Potenza totale installata MW
ORMAT	1102	1701
Turboden	267	363
Exergy	34	300
TAS	17	143
General Electric	6	101
Kaishan	40	27,2
Adoratec	23	16,4
Enex	1	9,3
Calnetix/CETY	50	6,3
GMK	18	5,3
Triogen	37	5,2
ABB	2	3,8
BEP-E-rational	20	3,6
Electratherm	55	3,14
UTC-Power	10	2,8
Opcon	3	2
Johnson Control	1	1,8
Zuccato Energia	21	1,7

[1] <https://www.turboden.com/>

[2] T. Tartière, M. Astolfi, A World Overview of the Organic Rankine Cycle Market, Energy Procedia, 129 (2007) 2-9

Enertime	2	1,6
DürrCyplan	6	1,2
TMEIC	1	1
gT-Energy Tech	2	0,7
Orcan	16	0,3
Enogia	11	0,26
Enreco	1	0,15
Enerbasque	3	0,13
Rank	5	0,07

I risultati di una ricerca condotta nel 2017 mostrano come circa il 77% degli impianti ORC con potenza superiore ai 50kWel era di tipo geotermico, seguito dagli impianti a biomasse con l'11%. Gli altri impianti erano basati principalmente sul recupero del calore da turbine a gas, da sistemi di compressione lungo le tubazioni del gas, da impianti stazionari a diesel e da tipologie di impianti basate su altre forme di recupero del calore. Applicazioni si trovano anche nelle industria in particolare cementifici, inceneritori, industria metallurgica e del vetro. Al momento è limitata la potenza generata da ORC accoppiati con impianti solari. La potenza totale installata nell'anno 2016 è stata pari a circa 525 MWel. Dal 2010 il progetto del Life Program HR11 LIFE08 ENV/IT/000422 e il successivo LIFE10 ENV/IT/000397 ha effettuato una ricognizione a livello europeo delle potenzialità dei sistemi ORC per il recupero del calore in alcuni processi industriali, quali del cemento, metallurgici, dei forni ad arco elettrico, della produzione del vetro e delle turbine a gas utilizzate nelle infrastrutture di trasporto del gas per la sua compressione all'interno di stazioni dedicate. Questo mercato è stato stimato essere pari a 2.5 GW di potenza lorda da ORC. Considerando 8000 ore di funzionamento annue, questi impianti ORC potrebbero produrre 20 TWh di energia elettrica, pari a circa il 5 % dell'energia consumata dall'industria europea nel 2009. In termini ambientali è possibile stimare 7.5 milioni di tonnellate in meno di CO₂ emessa.

In un'ottica di decarbonizzazione, con riduzione delle emissioni, e di indipendenza dei sistemi energetici (PNIEC, Repower EU) acquista interesse la realizzazione di impianti anche di piccola taglia (< 10 kW) per il settore residenziale e delle PMI.

Negli impianti ORC il componente che presenta le maggiori sfide tecnologiche è la turbina. L'AM rappresenta una valida alternativa alle tecnologie sottrattive per la produzione di questo componente. Sono presenti in letteratura diversi lavori che riportano la realizzazione di impianti ORC di piccola taglia (<100kWel), ma sono pochissimi quelli che considerano l'utilizzo delle tecnologie additive per la realizzazione della turbina.

Sull'utilizzo dell'AM per la realizzazione di microturbine è possibile citare i lavori di A. P. Weiß e colleghi, i quali si sono concentrati soprattutto sulla possibilità di realizzare questi componenti utilizzando materiali polimerici, per impianti a bassa temperatura. Le attività sperimentali sono state effettuate soprattutto nell'ambito del progetto BTHA-JC-2018-56 / 8E18B012, finanziato dall' Agenzia accademica bavarese-ceca [3].

Lo scenario riporta quindi diversi esempi di micro-generatori e impianti ORC commerciali, ma, per quanto di nostra conoscenza, nessuna che utilizzi turbine realizzate mediante AM.

7.1 Software per la determinazione dei parametri di progettazione dell'impianto ORC

[3] A. P. Weiß, V. Novotný, T. Popp, P. Streit, J. Špale, G. Zinn, M. Kolovratník (2020). Customized ORC micro turbo-expanders - From 1D design to modular construction kit and prospects of additive manufacturing. Energy, 209, 118407.

In Figura 1 è possibile osservare uno schema di impianto ORC, con riscaldatore e il relativo diagramma T-S (ciclo termodinamico).

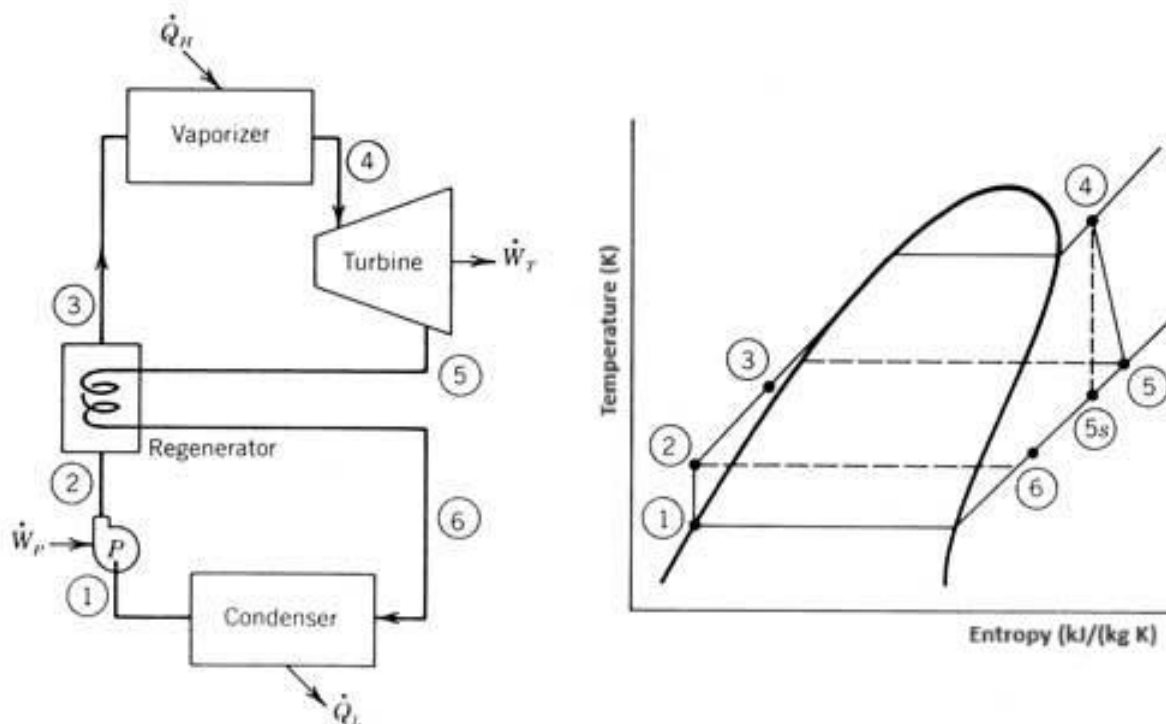


Figura 1: schema di impianto ORC e relativo diagramma T-S.

Il software ORC_AM è stato implementato in LabVIEW e consente di determinare i parametri termodinamici del ciclo sulla base dei dati in ingresso, a loro volta dipendenti dalle caratteristiche della sorgente calda e della sorgente fredda e dalla scelta del tipo di fluido. I dati ottenuti vengono utilizzati come dati in ingresso nel software di progettazione CFTURBO, acquisito all'interno del progetto, per la generazione della geometria della voluta e della turbina.

Il software ORC_AM utilizza il database opensource Coolprop [4, 5], il quale contiene le proprietà termodinamiche di 122 diversi fluidi. Inoltre la comunità di Coolprop ha realizzato diversi moduli software (wrappers) per poter utilizzare il database con svariati software di programmazione.

Il ciclo è basato sulle seguenti assunzioni:

- la compressione è una trasformazione isotropica (1-2);
- nel tratto 2-3 avviene un pre-riscaldamento mediante il rigeneratore;
- il riscaldamento è una trasformazione isobara (3-4);
- L'espansione in turbina è una trasformazione isoentropica ideale (4-5_s), e tenendo conto di un'efficienza stimata della turbina è possibile determinare le condizioni del fluido in un'espansione reale (4-5);
- il raffreddamento è una trasformazione isobara e isoterma (6'-1);

[4] Bell, I., Wronski, J., Quoilin, S., & Lemort, V. (2014). Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(6), 2498–2508.

[5] www.coolprop.org

Per ricavare il punto 5, fine dell'espansione in turbina, sapendo che questo ha la stessa pressione del punto 1 e la stessa entropia del punto 4 (trasformazione isoentropica ideale), si determina prima il punto 5_{is} e si considera il rendimento della turbina data da:

$$\eta_T = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{5is}}$$

dalla quale si determinano le grandezze del punto 5.

All'evaporatore e al condensatore, si considerano le temperature di ingresso e uscita del fluido caldo o freddo e, in particolare, la differenza di temperatura tra la temperatura minima del fluido caldo e la temperatura di evaporazione, nell'evaporatore, e la differenza di temperatura tra la temperatura massima del fluido freddo e la temperatura di condensazione, nel condensatore. E' possibile quindi ottenere la temperatura di evaporazione T_4 e quella di condensazione T_1 .

Nel punto 4 siamo in condizioni di vapore saturo secco (titolo pari a 1), mentre nel punto 1 siamo in condizioni di liquido saturo (titolo pari a 0).

E' possibile considerare, per alcuni fluidi, un sistema di surriscaldamento del vapore, al fine di limitare il rischio di formazione di gocce di liquido, che danneggerebbero la turbina, durante l'espansione, portando però a una maggiore richiesta di potenza termica in entrata e riducendo il rendimento del ciclo.

Le unità di misura utilizzate per le diverse grandezze sono: temperatura, $T = K$; pressione, $P = \text{bar}$; entropia specifica, $h = \text{kJ/kg K}$; entalpia specifica = kJ/kg ; densità, $\rho = \text{kg/m}^3$

Il rendimento teorico del ciclo (Carnot) è calcolato con la seguente formula:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$$

Mentre il rendimento del ciclo reale è calcolato mediante la formula:

$$\eta_{ORC} = \frac{L_T}{q_{evap}}$$

Ovvero il rapporto tra il lavoro in turbina, $L_T = h_4 - h_5$, diviso il calore necessario per l'evaporazione del fluido, $q_{evap} = h_4 - h_3$.

In Figura 2 è possibile osservare la schermata del software ORC_AM dove è possibile inserire i dati di ingresso, relativi all'impianto, e determinare i dati richiesti dal software di progettazione della turbina

Programma ORC_AM
Autore: D. Mirabile Gattia
Versione: 2.0

Fluido di Lavoro: R245fa
Fluido evaporatore e condensatore: Water

Tin evap °C: 95

Tout evap °C: 90

ΔTevap °C: 7

Qevap Potenza termica di input kW: 140

Pin Pressione ingresso scambiatore bar: 1,5

q water evap kJ/kg: 21,0377
m water evap kg/s: 6,65473

Tin Cond °C: 20

Tout Cond °C: 25

ΔTCond °C: 7

q water cond J/kg: 20,9151
m water cond kg/s: 5,15444

PARAMETRI PER CF TURBO

m Portata del fluido kg/s: 0,563717
Pressure Ratio: 4,45607
Pressure IN turbina P(4): 8,50248

Temperature IN turbine T(4): 83
VELOCITÀ DI ROTAZIONE TURBINA: 30000 GIRI

ηciclo: 0,114342
L Potenza meccanica kW: 13,8818
h Carnot: 0,143198

Rendimento Turbina ηT = ((h4-h5)/(h5-h5is)): 0,9

RIGENERATORE
ΔTrig = T6-T2 = 5K: 5

Figura 2: schermata del software ORC_AM dove è possibile inserire i dati di ingresso, relativi all'impianto, e determinare i dati richiesti dal software di progettazione della turbina

In Figura 3 è riportato il diagramma T-S, generato dal software ORC_AM, per un ciclo ORC che utilizza il fluido R245fa tra le temperature 83°C e 32°C con rapporto tra le pressioni pari a circa 4.45.

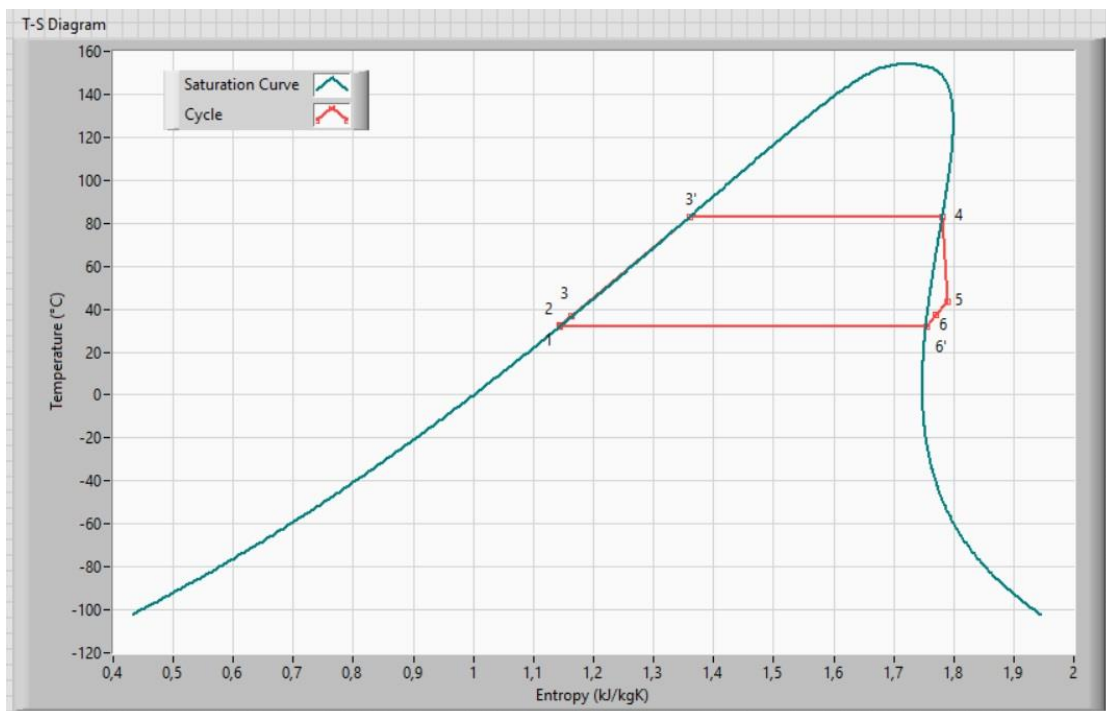


Figura 3: Diagramma T-S generato dal software ORC_AM per un ciclo ORC che utilizza il fluido R245fa.

7.2 Progetto di una turbina radiale-assiale per utilizzo in impianti ORC per uso residenziale (potenza inferiore a 10 kW)

I parametri richiesti dal software CFTURBO per il dimensionamento di massima della turbina sono i seguenti:

- La portata in massa \dot{m} espressa in kg/s
- Il rapporto di espansione totale P_{in}/P_{out}
- Il numero di giri al minuto n
- Il tipo di fluido
- Le condizioni di pressione e temperatura in ingresso alla turbina (P_{in} e T_{in}).

A titolo di esempio, considerando i seguenti dati termodinamici in ingresso:

- $P_{in}/P_{out} = 4.4$
- Fluido = R245fa
- $P_{in} = 7.9$ bar
- $T_{in} = 80$ °C
- $\dot{m} = 0.41$ kg/s
- $n = 35.000$ Rpm

è possibile ottenere una turbina che genera 12 kW di potenza con un rotore di dimensione pari a circa 80 mm di diametro. Questa dimensione è compatibile con i processi di stampa EBM, DMLS e con stampanti per la stampa di metalli a partire da filamenti carichi con particelle metalliche.

E' possibile fissare l'angolo di ingresso β_1 e il *rake angle* θ (Figura 4).

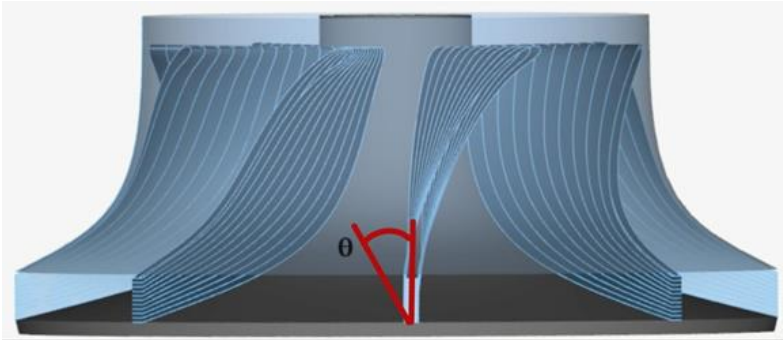


Figura 4: Rake Angle

Il software definisce il numero di pale da utilizzare, lo spessore delle palette, che possono essere modificati, alterando però l'efficienza e il campo di funzionamento della turbina, e il foro dell'albero e lo spessore della base. In Figura 5 è mostrata una turbina nella versione finale.

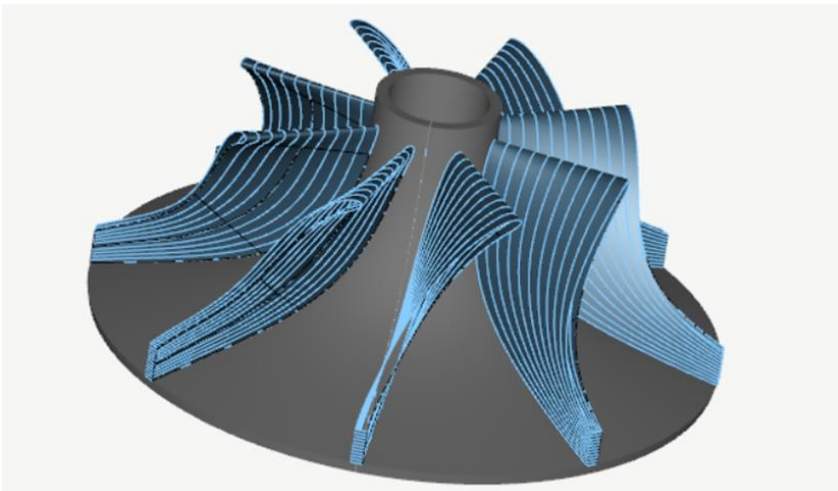


Figura 5: turbina progettata mediante il software CFTURBO.

Il software consente inoltre di definire la geometria dello statore e della voluta. Mediante a formulazione di Whitfield è stato definito l'angolo di uscita dei vapori dallo statore. La relazione di Whitfield lega l'angolo di uscita dallo statore α_1 con il numero di pale del rotore Z [6]:

$$\cos^2(90 - \alpha_1) = \frac{1}{Z}$$

Nel caso di $Z=8$, numero di pale di progetto, si ottiene $\alpha_1 \approx 20^\circ$. In Figura 6 è mostrato il nozzle prodotto e il volume fluido della voluta. In questo caso il software genera, a partire dalle stesse condizioni termodinamiche, il profilo del solo volume fluido e per motivi costruttivi si è scelta una cavità a sezione semi circonferenziale. Il software genera un geometria a chiocciola che consente di avere un flusso, all'interno di essa, costante.

[6] S. L. Dixon, C.A. Hall, Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, Elsevier (2014)

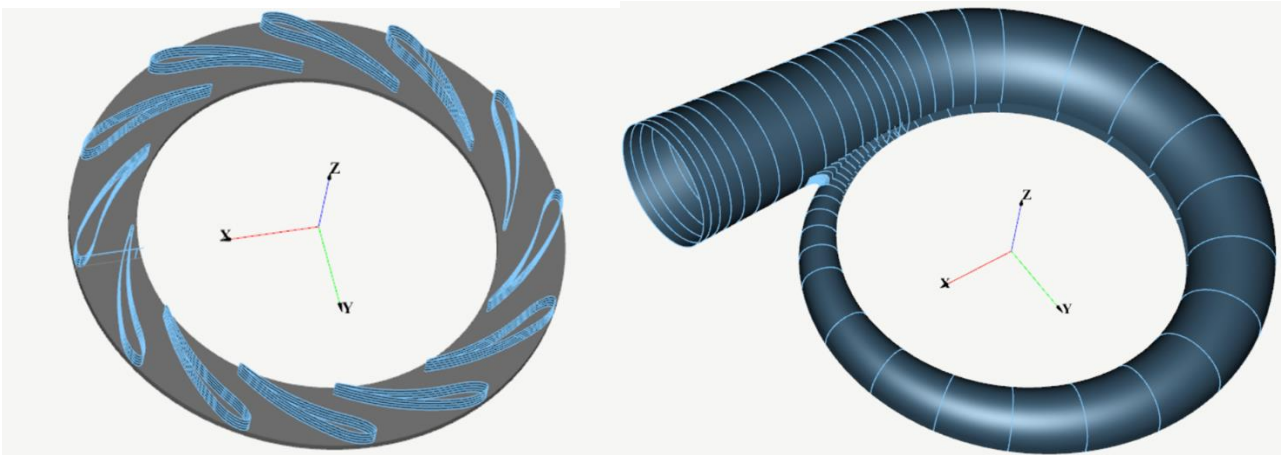


Figura 6 Nozzle e Volume fluido voluta

In Figura 7 sono riportate la curva del rendimento isoentropico, determinata considerando una velocità di rotazione pari a 35.000 rpm, e le curve caratteristiche della turbina in funzione della portata.

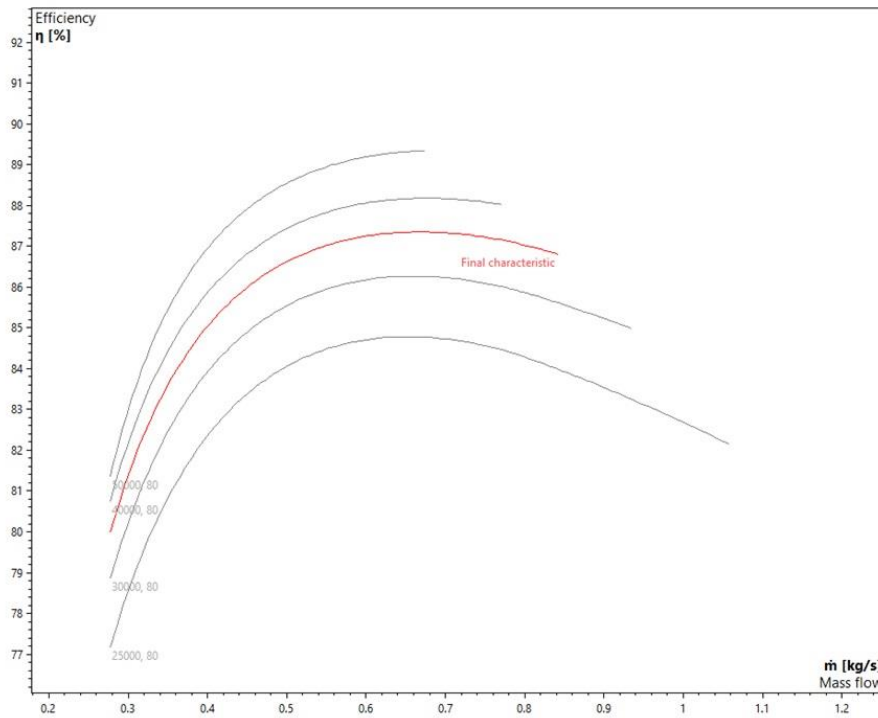


Figura 7 rendimento isoentropico e curve caratteristiche della turbina

In termini pratici, l'efficienza isoentropica di una turbina misura quanta energia disponibile nel fluido viene effettivamente convertita in lavoro utile dalla turbina stessa, tenendo conto delle perdite e delle inefficienze reali del processo e consente di valutare le prestazioni di una turbina al fine dell'ottimizzazione del progetto. Il software in ultimo consente di esportare un file CAD, in diversi formati, che possono essere ulteriormente elaborati e utilizzati per la stampa. In Figura 8 è riportata l'immagine digitale del file *stl* generato da CFTURBO.

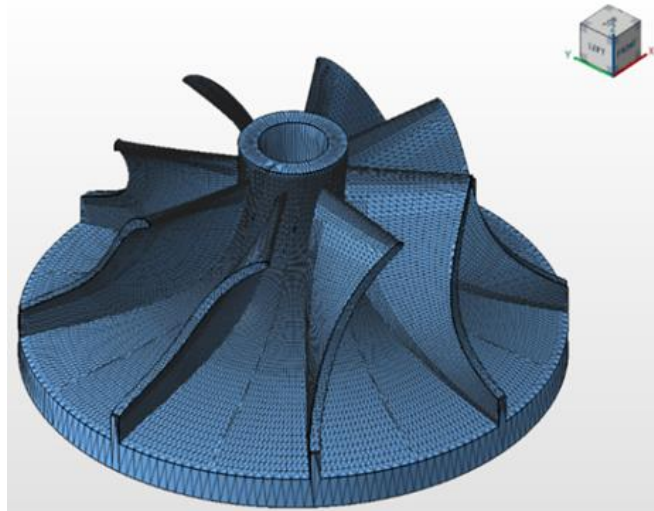


Figura 8: immagine digitale del rotore (file standard *stl*)

7.3 Indagini su palette con diverse inclinazioni rispetto al piano di stampa

Il processo di stampa a fascio di elettroni, EBM, è uno tra i processi additivi, per la stampa di componenti in lega metallica, più rapido ($80 \text{ cm}^3/\text{h}$). La polvere Ti-6Al-4V grade 23 ELI che si utilizza in questo processo ha una granulometria compresa tra $45 \mu\text{m}$ e $106 \mu\text{m}$. In Tabella 1 sono riportate le caratteristiche della stampante Arcam A2X mentre in Figura 9 sono visibili alcune fasi del processo di stampa.

Tabella 2: caratteristiche della stampante EBM A2X della Arcam (GE)

Volume di stampa	200x200x380 (WxDxH)
Massima potenza del fascio	3 kW
Tipo di catodo	Filamento di tungsteno
Minimo diametro del fascio	$250 \mu\text{m}$
Massima velocità del fascio	8000 m/s
Pressione durante la stampa	2×10^{-3} (pressione parziale di He)
Consumo di He	1 l/h
Temperatura di processo	$700\text{-}1100 \text{ }^\circ\text{C}$
Interfaccia CAD	Standard: <i>stl</i>

In breve un fascio di elettroni viene accelerato in una camera, che è stata preventivamente evacuata, e impatta su uno strato di particelle depositate su un piatto di stampa. Il piatto viene preriscaldato a $700 \text{ }^\circ\text{C}$ prima dell'avvio della stampa. Il fascio fornisce l'energia necessaria alla fusione locale del materiale e per il pre-riscaldamento delle polveri che vengono trascinate nella zona di stampa mediante un rastrello, il quale intercetta le polveri nei cumuli presenti al di sotto delle tramogge di carico.

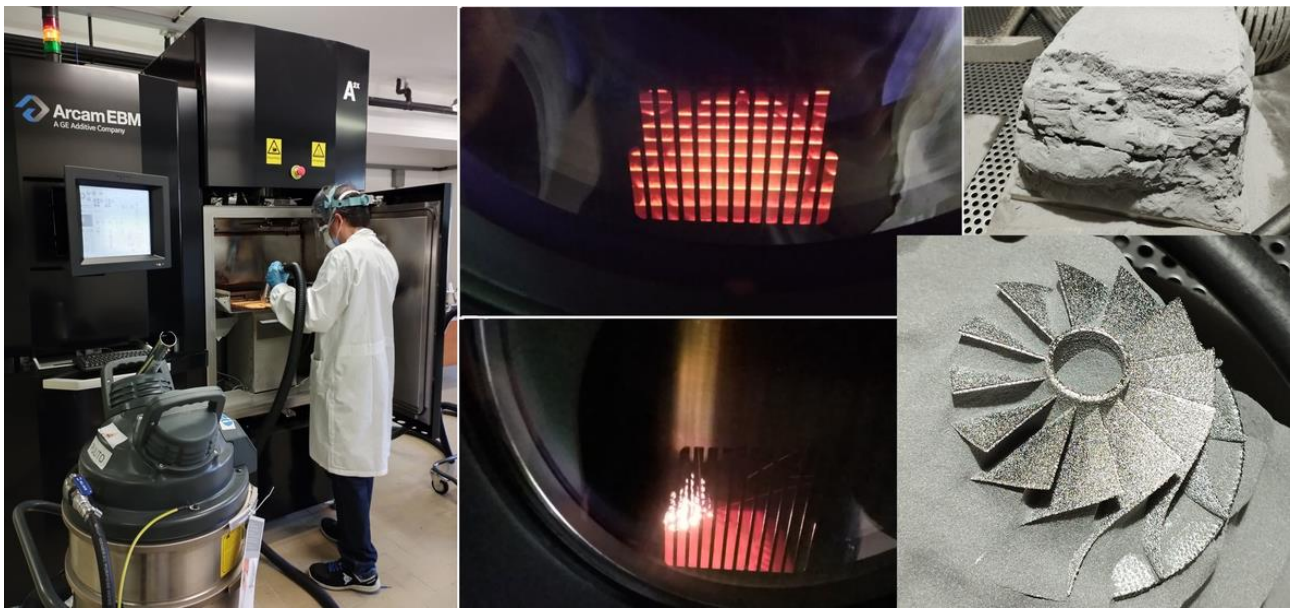


Figura 9: fasi di preparazione della macchina e del processo di stampa EBM

L'attività ha previsto diverse fasi di lavoro:

- stampa di profili di palette a diverse inclinazioni;
- prove preliminari di realizzazione di una turbina intera priva di supporti (non previsto nel periodo in oggetto).

E' stato realizzato un campione di prova con diversi profili di palette, che presentano sottosquadri variabili da 20 a 80° rispetto alla verticale, con l'intento di verificare la possibilità di realizzare profili di palette con diverse inclinazioni senza l'utilizzo di supporti. I campioni sono stati stampati direttamente sul piatto di stampa. La larghezza della palette è di 20 mm. Nonostante l'elevata inclinazione delle palette, non si sono osservate deformazioni dei profili o difetti.

In Figura 10 sono visibili i due campioni con i profili di palette variabili realizzati con parametri differenti.

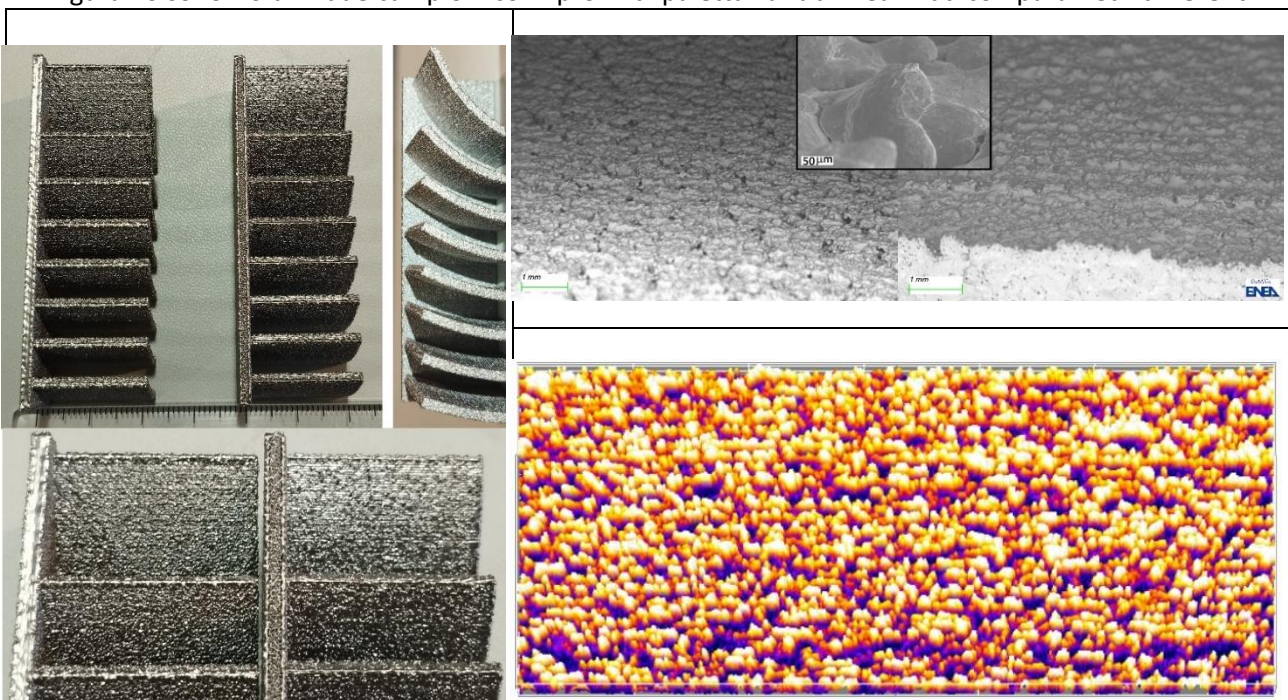


Figura 10: profili di palette a inclinazioni variabili, immagine SEM delle due superfici e ricostruzione digitale del profilo.

Elaborando digitalmente le immagini acquisite al SEM, mediante il software open source ImageJ [7], è stato possibile evidenziare il profilo della superficie della paletta con la massima inclinazione. Il valore di rugosità Ra calcolato, definito come la deviazione media aritmetica della superficie valutata, è pari a $21 \pm 2 \mu\text{m}$. Questo valore è prossimo ai dati riportati in altri lavori scientifici, relativi a campioni simili, anche se sembra essere sottostimato. Inoltre è possibile riscontrare una notevole variabilità dei valori di rugosità riportati in letteratura. In particolare la rugosità delle superfici, nei campioni realizzati mediante additive manufacturing varia in funzione della loro inclinazione rispetto al piano orizzontale [8]. Questo aspetto verrà affrontato nella prosieguo dell'attività.

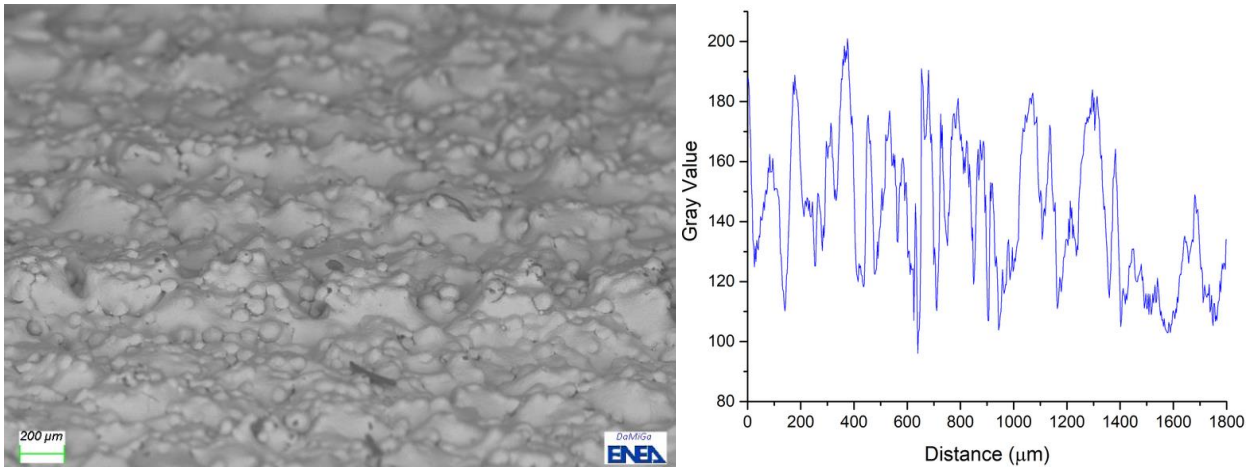


Figura 11: immagine SEM della superficie della paletta e profilo lineare.

In Figura 12 è visibile una sezione del campione di riferimento lungo la sezione perpendicolare alla direzione di crescita. Sono inoltre visibili alcuni difetti che è possibile riscontrare all'interno dei campioni stampati mediante EBM. In genere sono porosità sferiche di dimensione inferiore ai $100 \mu\text{m}$ di diametro o anche cuspidi che possono crearsi localmente nel caso di una non perfetta fusione tra più particelle. Queste porosità, di piccole dimensioni, presenti in numero limitato, possono essere ridotte mediante trattamenti di pressatura isostatica a caldo (HIP, Hot Isostatic Press).

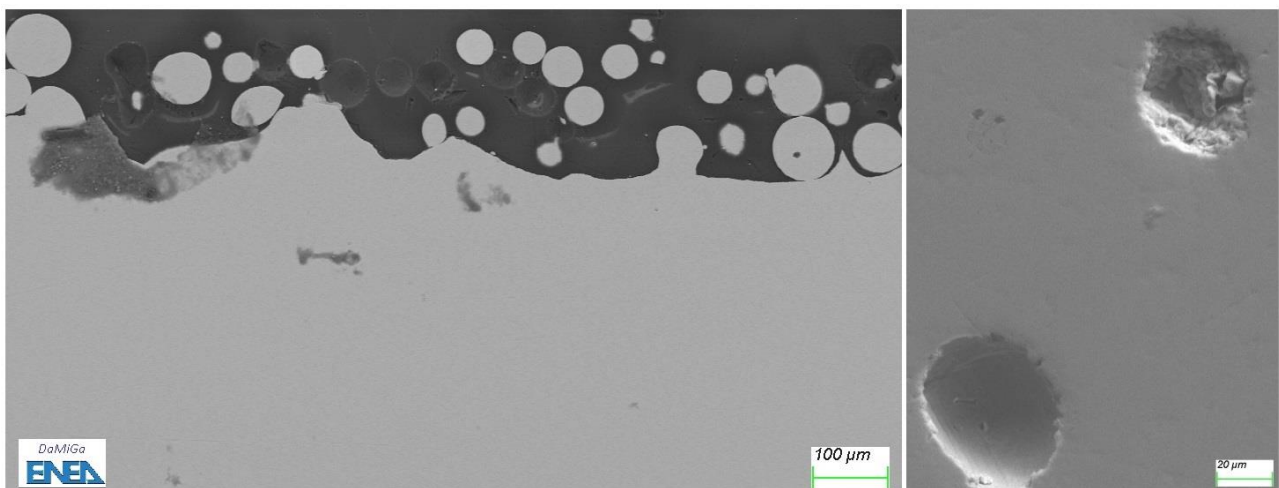


Figura 12: immagini SEM della sezione di un campione di riferimento ottenuta lungo la direzione perpendicolare a quella di crescita.

[7] Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9(7), 671–675. doi:10.1038/nmeth.2089

[8] A. Triantaphyllou, C.L. Giusca, G.D Macaulay, F. Roerig, M. Hoebel, R.K Leach, B. Tomita, K. Milne, Surface texture measurement for additive manufacturing, *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.* 3 (2015) 024002

Dalle immagini riportate in precedenza è possibile osservare come la superficie dei campioni stampati mediante EBM presentino un'elevata rugosità superficiale. Questo aspetto verrà affrontato nella LA3.6 dove verranno valutati i trattamenti di finitura superficiale quali: lavorazioni meccaniche, sabbiatura, pallinatura, vibro-finitura, burattatura e trattamenti elettrochimici.

Visti i risultati ottenuti con il campione di prova si è deciso, anche se non previsto nel periodo in oggetto, di realizzare, mediante EBM, un'intera turbina con diametro 85 mm e altezza 35 mm con 12 palette di spessore 0.6 mm. In Figura 13 è visibile il modello CAD della turbina, la scena di stampa, la turbina stampata e il piatto di stampa dopo la rimozione dei componenti.

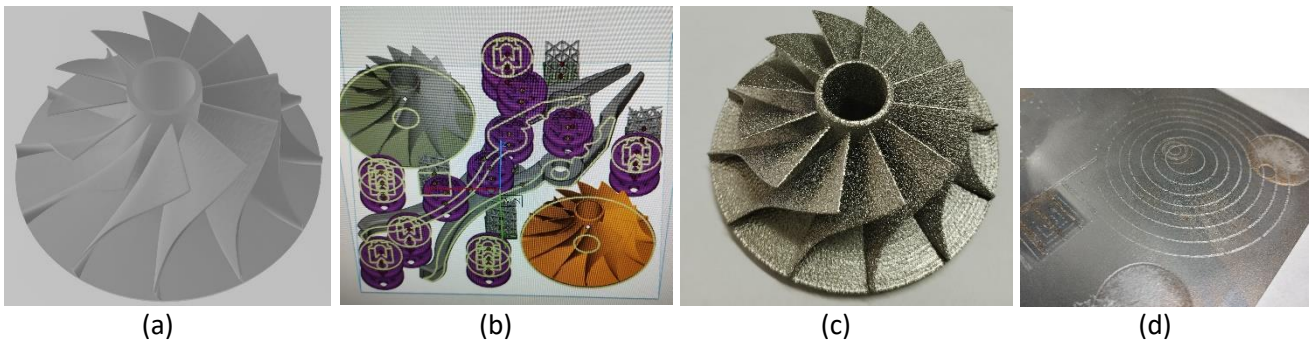


Figura 13: modello CAD (a), scena di stampa (b) turbina (c), piatto di stampa(d)

La turbina si presenta deformata soprattutto da un lato con una deformazione massima punto-punto di circa 3 mm. Dopo un'analisi del problema riscontrato è opportuno ritenere che l'utilizzo di supporti non adeguati e la presenza sul piatto di stampa, in prossimità della turbina di un altro componente, abbiano causato la deformazione osservata. In Figura 13 è possibile osservare come sul piatto di stampa il segno lasciato dai supporti dopo la sabbiatura del componente non sia regolare, ma presenti una zona, verso il centro del piatto, distaccata.

Sono state quindi effettuate delle indagini microstrutturali e non distruttive, con un tomografo XE-L HE Gilardoni, per individuare la presenza di cricche all'interno delle palette, delle radiografie e una ricostruzione tomografica del componente ottenuta elaborando, tramite il software VGSTUDIO MAX ver 3.5, le 1440 proiezioni radiografiche. Il tomografo è equipaggiato con: Sorgente Minifuoco da 450 kV (limitata temporaneamente a 150 kV), Sorgente Microfuoco aggiuntiva da 150 kV, Rilevatore 2D (Detector) Flat Panel da 16" e 16 bit, rivelatore lineare a diodi da 614 mm, e un sistema di movimentazione a 6 assi (Figura 14).



Figura 14: cabina tomografica e le 2 sorgenti radiografiche

In Tabella 3 sono riportate le condizioni di misura mentre in Figura 15 è riportata una proiezione radiografica della turbina. Le indagini condotte hanno permesso di verificare l'assenza di cricche nel componente.

Tabella 3: condizioni di misura indagine tomografica

Tecnica	CONE BEAM CT SCAN DATA
Scan started on	22-05-2023 at 11:19:24
Scan ended on	22-05-2023 at 12:23:12
kV:200.00	mA:3.50
Scan with	1440 projections
Projection integration:	3 frames
Turnable acceleration:	LOW
Projections dimensions:	Width: 4096
	Height: 4096
Sensor settings:	Gain: 2 Exposure: 2 Binning: 1
FDD: 1094.0	FOD: 405.0
Estimated Rotation Center offset:	0.00

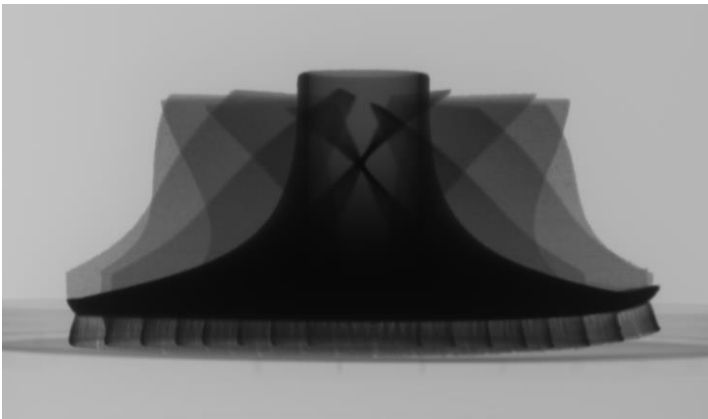


Figura 15 Una proiezione (radiografia) della turbina con base deformata

Mediante la ricostruzione tomografica è stato possibile fare un confronto tra il modello CAD e il componente stampato (Figura 16). Il confronto dimostra come, nonostante la deformazione macroscopica visibile su un lato della turbina, la differenza geometrica tra il modello e il componente reale sia limitata (ordine decimi di millimetro).

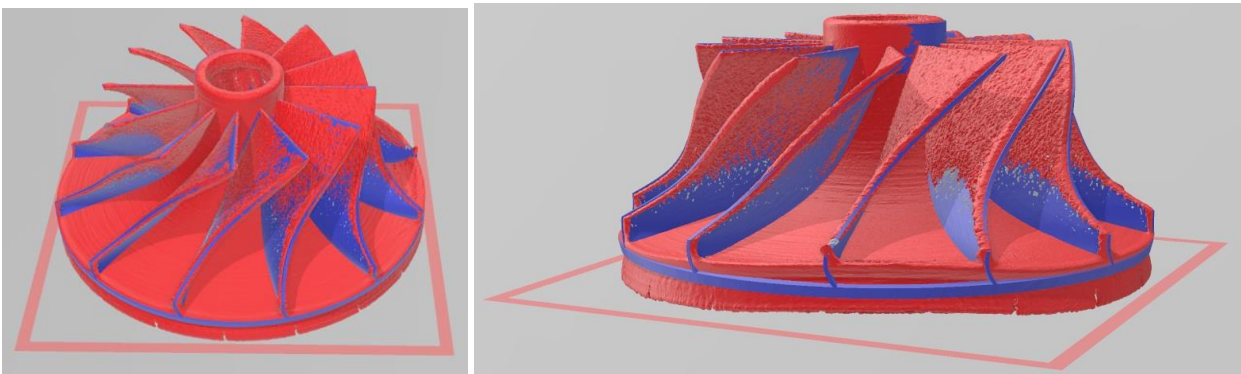


Figura 16: confronto dimensionale tra la ricostruzione tomografica (rossa) e il modello CAD (blu) utilizzato per la stampa

Le attività svolte nel periodo in oggetto si sono concentrate prima sulla progettazione, con l'ausilio di un software specifico, di una turbina per impianti ORC di potenza pari a 10 kW, utilizzando come dati di input quelli generati dal software ORC_AM, realizzato all'interno del progetto, che simula il ciclo termodinamico chiuso di un fluido tra le due sorgenti calda e fredda. Il modello CAD generato è stato utilizzato per la realizzazione mediante AM di una turbina. Nel prosieguo dell'attività è prevista quindi l'ottimizzazione delle condizioni di stampa del componente, al fine di limitarne le deformazioni, e la stampa della turbina. Verranno valutati alcuni trattamenti superficiali, automatizzabili, per la riduzione della rugosità superficiale. In ultimo è prevista la progettazione e realizzazione della voluta per l'assemblaggio di un piccolo impianto di prova non in condizioni di esercizio.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze all'interno della LA.

9 Pubblicazioni scientifiche

Elenco delle pubblicazioni scientifiche eventualmente risultanti dall'attività svolta

E' stato sottomesso l'articolo: A. Tati, F. Palano, T. Marcianò, M. Nacucchi, F. De Pascalis, D. Marseglia, A. Coglitore, A. Palombi, G. Barbieri, D. Mirabile Gattia, *Indagini non distruttive per la valutazione di campioni in lega di Titanio realizzati mediante additive manufacturing*, presso la rivista "The journal of the Italian Society of Non Destructive Testing Monitoring Diagnostics" (19° Congresso AIPND 19-21 Ottobre 2022) ISSN 1721-7075

E' stato sottomesso l'articolo: Daniele Mirabile Gattia, Alessandra Palombi, Antonino Coglitore, Fabio De Pascalis, Michele Nacucchi, Fania Palano, Angelo Tati, Giuseppe Barbieri, Maria Richetta, Ugo De Angelis, *Production of a Ti6Al4V Automobile's Lower Control Arm with EBM*, *Key Engineering Materials*, per la pubblicazione sulla rivista Key Engineering Materials. ISSN: 1662-9795.

10 Eventi di disseminazione

Sottomessi due lavori presso il congresso THERMEC 2023 che si terrà tra il 3 e il 7 luglio 2023 Vienna, Austria:

- Daniele Mirabile Gattia, Carmine Scordella, Alessandra Palombi, Angelo Tati, Antonino Coglitore, Fabio De Pascalis, Michele Nacucchi, Fania Palano, Giuseppe Barbieri, Maria Richetta, Production of a Ti6Al4V centrifugal pump impeller by EBM
- Daniele Mirabile Gattia, Alessandra Palombi, Antonino Coglitore, Fabio De Pascalis, Michele Nacucchi, Fania Palano, Angelo Tati, Giuseppe Barbieri, Maria Richetta, Production of a Ti6Al4V automobile's lower control arm with EBM

Partecipazione al 39° Convegno AIM tenutosi a Padova nel periodo 21-23 settembre 2022. Presentato, nell'ambito della sessione "Additive manufacturing - Leghe non Ferrose" il lavoro: A. Palombi, M. Richetta, D. Mirabile Gatti, A. Tati, G. Barbieri, A. Coglitore, F. De Pascalis, M. Nacucchi, F. Palano, *Stampa 3D di un braccetto per automobile in Ti6Al4V con struttura alleggerita*.

Ricevuto invito per una presentazione nell'ambito dello *Strategic foresight workshop "Key Enabling Technologies and Innovation Trends for Bettering the Competitiveness in Aerospace Industry"* organizzato ICAMCYL- 12-13 luglio 2023, nell'ambito del Progetto finanziato nell'ambito del programma H2020 - Grant Agreement n. 952463. E' stato proposto il seguente contributo: D. Mirabile Gattia "New alloy for Advanced Materials and its applications".

Presentazione presso il Workshop "ENEA per la Stampa 3D" - 7 Luglio 2022, organizzato dal nuovo Laboratorio ENEA MaPIS4.0 e dall'azienda LISA TECH di Kilometro Rosso, D. Mirabile Gattia "Sviluppo di Materiali e di componenti in lega metallica".

<https://materiali.sostenibilita.enea.it/news/workshop-enea-stampa-3d-7-luglio-2022>

Corso per aggiornamento professionale ingegneri organizzato dall'Ordine degli Ingegneri di Roma, nell'ambito del Convegno Nanoinnovation, tenutosi a Roma il 19-23 settembre 2022: Nanotecnologie nell'ingegneria civile e nell'architettura. E' stato fornito il seguente contributo: D. Mirabile Gattia "Le tecnologie additive e le loro applicazioni nel campo ingegneristico"

Partecipazione all' RM Forum tenutosi presso il Museo dell'Alfa Romeo nei giorni 28-29 settembre 2022. Partecipazione, su invito, del Capo Progetto, D. Mirabile Gattia, alla Tavola Rotonda "Materiali per l'AM" organizzata all'interno di RM Forum (29 settembre 2022)

E' stata organizzata presso il CR Casaccia dell'ENEA, il 31 marzo 2023, una visita tecnica in collaborazione con l'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma (FOIR) intitolata "Materiali Avanzati e Manifattura Additiva". Nell'intervento: D. Mirabile Gattia "Stampa 3D come strumento per applicazioni speciali nel settore ingegneristico, sono stati presentati alcune delle attività e dei risultati del progetto in corso.

Partecipazione al congresso Nanoscience & Nanotechnologies 2023 (N&N 2023), tenutosi a Frascati presso la sede dell'INFN nel periodo 29 maggio - 1 giugno 2023. Presentato il lavoro: D. Mirabile Gattia, L. Pilloni, G. Corallo, *Innovative materials and additive technologies for the energy sector*.

Partecipazione alla trasmissione RAI "Geo&Geo", 8 febbraio 2023, Conduttore: Sagramola Sveva - Biggi Emanuele: Energia. I progetti di ricerca sui materiali innovativi per risparmiare energia. Ospiti Eleonora Petrolati (CSEA), Daniele Mirabile Gattia (ENEA Centro Ricerche Casaccia). Sono stati presentati i progetti

svolti e attivi nell'ambito dell'Accordo di programma tra Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica e ENEA, Ricerca sul Sistema Energetico - RSE SpA e Consiglio Nazionale delle Ricerche.

[Geo 2022/23 - Puntata del 08/02/2023 - Video - RaiPlay](#)

https://it.linkedin.com/posts/ricerca-di-sistema_rds-geo-raitre-822023-activity-7029881970163617792-ol9A?trk=public_profile_like_view

Intervista, su invito, al Capo Progetto sul palco dell'E-Village nell'ambito dell'evento E-PRIX, tenutosi a Roma tra il 9 e il 10 aprile 2022 per la presentazione del progetto "Materiali di frontiera per usi energetici". L'evento è la prima tappa europea della stagione del Campionato Mondiale Abb Fia Formula E.