



Ricerca di Sistema elettrico

Specifiche per la realizzazione della rampa H₂ dell'impianto AGATUR

Giuseppe Messina

Specifiche per la realizzazione della rampa H₂ dell'impianto AGATUR

Giuseppe Messina

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Work Package WP3: "Power to Gas" (P2G)

Linea di Attività LA3.24: Integrazione P2G/sistemi generazione elettrica innovativi: fuel-flexibility – sviluppo sezione H2-AGATUR e sistemi monitoraggio combustione

Responsabile del Progetto: Giulia Monteleone, ENEA

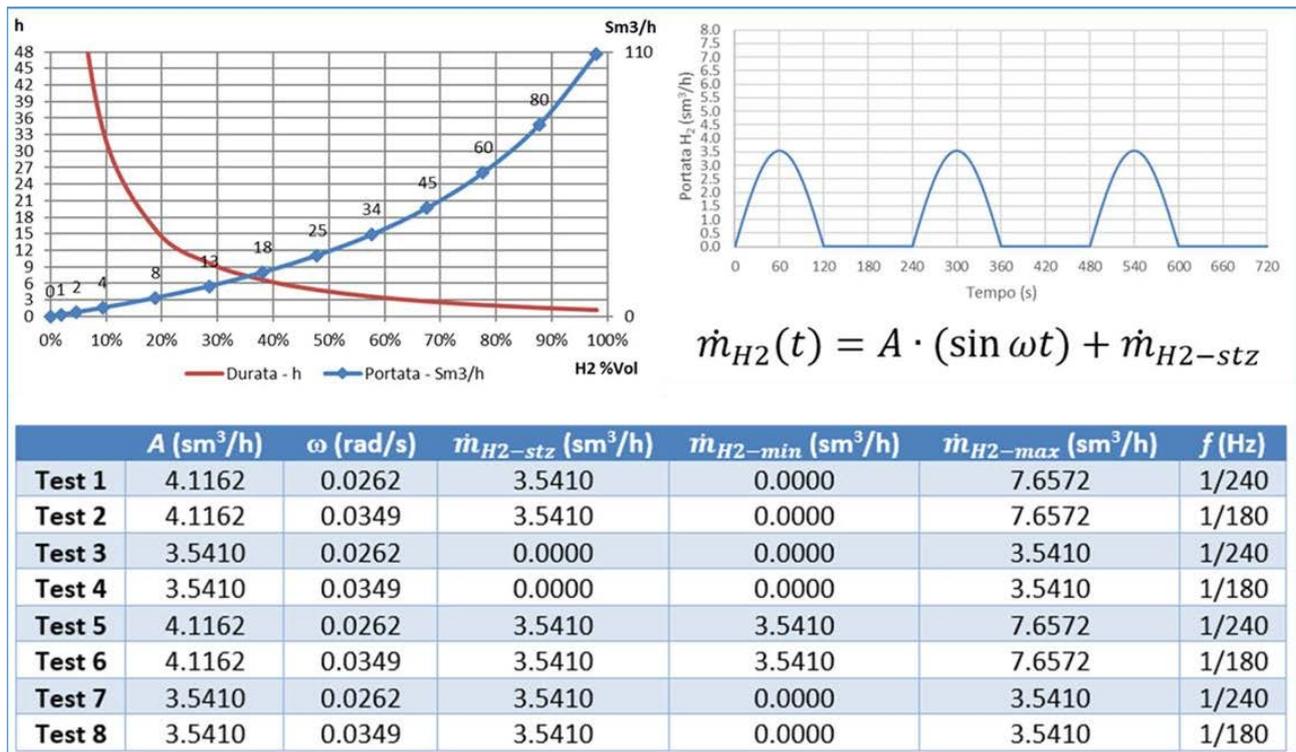
Responsabile del WP3: Eugenio Giacomazzi, ENEA

Indice

SOMMARIO E SINTESI GRAFICA	4
1 INTRODUZIONE	5
2 SPECIFICHE TECNICHE DEL SISTEMA	6
2.1 CARATTERISTICA STATICA DELLA RAMPA H2	7
2.2 CARATTERISTICA DINAMICA DELLA RAMPA H2	7
2.3 LINEE GUIDA ALLA PROGETTAZIONE	12
3 CONCLUSIONI	12

Sommario e sintesi grafica

Lo scopo di questo documento è la definizione delle specifiche tecniche per la progettazione e la realizzazione del sistema di accumulo e alimentazione della linea idrogeno per la Turbec T100 S3 dell’impianto AGATUR. Il sistema di accumulo e alimentazione ha l’obiettivo di supportare le attività sperimentali relative alla gestione della turbina a gas in regime di fuel-flexibility, con miscele combustibili costituite da gas naturale e idrogeno (GNH2). Le attività sperimentali sono finalizzate alla validazione del comportamento della turbina a gas al variare del tenore di H₂ nella miscela combustibile in condizioni di alimentazione statiche e dinamiche. Le condizioni di alimentazione statiche prevedono un tenore di H₂ predefinito e costante nel tempo, mentre le condizioni di alimentazione dinamiche valideranno il comportamento della macchina alimentata con miscele GNH2 con tenore di H₂ variabile nel tempo in condizioni controllate, ma con dinamiche rilevanti. Il combustore della Turbec T100 è equipaggiato con un bruciatore pilota (*pilot*) di tipo diffusivo e un bruciatore principale (*main*) di tipo premiscelato. Se si esclude la fase di *ligh-up*, l’apporto energetico del bruciatore *pilot* è minoritario e la sua funzione è principalmente quella di stabilizzare la fiamma durante le transizioni di carico e ai bassi regimi di potenza, mentre la sua attività è marginale per potenze medio-alte a regime costante. L’alimentazione con miscele GNH2 riguarderà pertanto solo il bruciatore *main*, con l’obiettivo di preservare la stabilità della macchina e massimizzare l’efficacia tecnico-economica della sperimentazione. Il sistema di accumulo previsto avrà una capacità pari a 120 Sm³ e sarà realizzato mediante l’installazione di un pacco bombole all’esterno della hall tecnologica in cui è collocata la turbina a gas. La rampa gas includerà la linea di connessione tra il sistema di accumulo e la valvola di alimentazione del bruciatore *main*, unitamente a tutti gli organi di misura, regolazione e controllo necessari all’erogazione in sicurezza dell’idrogeno. Fatte salve specifiche esclusioni dettate della normativa sulla sicurezza, tutti gli organi di regolazione saranno predisposti per il controllo remoto. Il sistema di accumulo e alimentazione sarà dotato di organi riduzione della pressione di numero e caratteristiche tali da garantire un’erogazione stabile delle portate richieste ad una pressione compresa tra 5 e 10 bar assoluti, con capacità di regolazione in questo intervallo non inferiore a 0.1 bar.



1 Introduzione

Lo scopo di questo documento è la definizione delle specifiche tecniche per la progettazione e la realizzazione del sistema di accumulo e alimentazione della linea idrogeno per la Turbec T100 S3 dell'impianto AGATUR. Il sistema di accumulo e alimentazione ha l'obiettivo di supportare le attività sperimentali relative alla gestione della turbina a gas in regime di fuel-flexibility, con miscele combustibili costituite da gas naturale e idrogeno (GNH₂). Le attività sperimentali sono finalizzate alla validazione del comportamento della turbina a gas al variare del tenore di H₂ nella miscela combustibile in condizioni di alimentazione statiche e dinamiche. La motivazione che spinge a utilizzare l'idrogeno come combustibile per le turbine a gas, in sostituzione del metano o miscelato con esso, nasce dall'opportunità di azzerare o ridurre le emissioni di CO₂. Tali emissioni sono legate evidentemente al metano, quindi fatto 100 l'apporto energetico introdotto con il combustibile, se si desidera dimezzare le emissioni di CO₂, è necessario dimezzare la portata di CH₄ e sostituirla con l'equivalente energetico di H₂. La densità energetica del CH₄ su base volumetrica è circa 3 volte (3.315) di quella dell'H₂, quindi per sostituire metà dell'apporto energetico, ogni m³ di metano deve essere rimpiazzato con circa 3 m³ di idrogeno. Possiamo quindi concludere che per dimezzare le emissioni di CO₂ miscelando l'idrogeno al metano bisogna raddoppiare la portata volumetrica di combustibile, componendola in volume con tre parti di H₂ e una parte di CH₄. Dovrebbe essere ovvio a questo punto che per azzerare le emissioni di CO₂ la completa sostituzione del metano con l'idrogeno ci restituisce una portata volumetrica di combustibile triplicata. Lo stato dell'arte per le turbine a gas heavy-duty, colloca il tenore di H₂ tollerabile in miscele GNH₂ mediamente al 30%_{vol}, mentre per le micro-turbine questo valore si riduce a circa il 10%_{vol}. Emerge pertanto la necessità di allineare la tolleranza all' H₂ delle micro-turbine a gas allo stato dell'arte delle macchine heavy-duty, condizione indispensabile per raggiungere gli obiettivi fissati dall'Europa per il 2030 che prevedono lo sviluppo di turbine a gas 100% H₂.

Se si considera la variabilità delle rinnovabili non programmabili, dalle quali si prevede di produrre la gran parte dell'idrogeno da iniettare nella rete gas, a prescindere dal tenore massimo di H₂ tollerabile dalle turbine a gas, l'indagine sperimentale non può trascurare la variabilità temporale del tenore di H₂ nella miscela combustibile. Lo stato dell'arte delle macchine heavy-duty prevede una tolleranza alle fluttuazioni di H₂ nella miscela GNH₂ pari a ±10%_{vol}/min, con un target stimato al 2030 pari a ±30%_{vol} /min. Alla variabilità della composizione della miscela combustibile si aggiunge la variabilità di carico richiesta alle turbine a gas, derivante dal profilo operativo ad esse demandato, sempre più spostato verso il segmento della produzione di picco e backup delle rinnovabili non programmabili. Questo profilo operativo, che accoppia la flessibilità di carico alla flessibilità di combustibile, se ha ricadute positive sulle emissioni di CO₂ grazie all'utilizzo dell'idrogeno, presenta problematiche non di poco conto sulle emissioni di NO_x, che richiedono un'ulteriore sforzo di ricerca e sviluppo per mantenere gli standard di emissione attuali e, in prospettiva, per migliorarli.

La rampa H₂ dell'impianto AGATUR è un sistema chiave per la sperimentazione sulle micro-turbine a gas alimentate con miscele idrogenate di composizione variabile nel tempo, e può contribuire all'attività di ricerca e sviluppo necessaria a rispondere ai quesiti ancora irrisolti su questo fronte.

2 Specifiche tecniche del sistema

Il sistema di accumulo e alimentazione della linea idrogeno per la Turbec T100 S3 dell'impianto AGATUR ha l'obiettivo di supportare le attività sperimentali relative alla gestione della turbina a gas in regime di *fuel-flexibility*, con miscele combustibili costituite da gas naturale e idrogeno (GNH2). Le attività sperimentali sono finalizzate alla validazione del comportamento della turbina a gas al variare del tenore di H₂ nella miscela combustibile in condizioni di alimentazione statiche e dinamiche. Le condizioni di alimentazione statiche prevedono un tenore di H₂ predefinito e costante nel tempo, mentre le condizioni di alimentazione dinamiche valideranno il comportamento della macchina alimentata con miscele GNH2 con tenore di H₂ variabile nel tempo in condizioni controllate, ma con dinamiche rilevanti. Il combustore della Turbec T100 è ha una potenza termica massima pari a 350 kW ed è equipaggiato con un bruciatore pilota (*pilot*) di tipo diffusivo e un bruciatore principale (*main*) di tipo premiscelato. Se si esclude la fase di *ligh-up*, l'apporto energetico del bruciatore *pilot* è minoritario e la sua funzione è principalmente quella di stabilizzare la fiamma durante le transizioni di carico e ai bassi regimi di potenza, mentre la sua attività è marginale per potenze medio-alte a regime costante. L'alimentazione con miscele GNH2 riguarderà pertanto solo il bruciatore *main*, con l'obiettivo di preservare la stabilità della macchina e massimizzare l'efficacia tecnico-economica della sperimentazione. Le specifiche tecniche della rampa gas sono state suddivise in tre sezioni relative rispettivamente alle caratteristiche statica e dinamica della rampa gas e alle considerazioni (linee guida) di tipo impiantistico. La caratteristica statica fornisce tutte le informazioni sui requisiti di portata e durata dell'erogazione. La caratteristica dinamica fornisce i requisiti prestazionali richiesti al sistema di alimentazione sulla base della loro evoluzione temporale e dei gradienti richiesti dalla matrice sperimentale. Le linee guida forniscono dei riferimenti relativi agli organi e all'intervallo di regolazione e al controllo e alla trasmissione dei segnali.

Tabella 1. Caratteristiche della miscela GNH2 al variare del tenore di H₂ introdotto nella linea main della micro-turbina a gas Turbec T100.

	0% _{vol} H2	2% _{vol} H2	5% _{vol} H2	10% _{vol} H2	20% _{vol} H2
GNH2 (XH2)	0.00	0.02	0.05	0.09	0.19
GNH2 (XCH4)	1.00	0.98	0.95	0.91	0.81
GNH2 LHV (kJ/kg)	50009.77	50177.14	50439.53	50909.88	51997.78
GNH2 LHV (kJ/sm ³)	35795.45	35327.06	34622.89	33445.02	31073.30
Combustor Max Power (kW)	350.00	350.00	350.00	350.00	350.00
GNH2 Mass Flow (g/s)	7.00	6.98	6.94	6.87	6.73
GNH2 Mass Flow (sm ³ /h)	35.20	35.67	36.39	37.67	40.55
H2 Mass Flow (sm³/h)	0.00	0.67	1.71	3.54	7.66
CH4 Mass Flow (g/s)	7.00	6.96	6.90	6.79	6.54
CH4 Mass Flow (sm ³ /h)	35.20	35.00	34.69	34.13	32.89
H2 Mass Flow (g/s)	0.00	0.02	0.04	0.09	0.19
Pilot Fuel LHV (kJ/kg)	50009.77	50009.77	50009.77	50009.77	50009.77
Pilot Fuel Mass Flow (g/s)	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
Pilot (XH2)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pilot (XCH4)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Main Fuel LHV (kJ/kg)	50009.77	50188.68	50469.33	50972.92	52140.21
Main Fuel Mass Flow (g/s)	6.55	6.53	6.49	6.42	6.28
Main (XH2)	0.00	0.02	0.05	0.10	0.20
Main (XCH4)	1.00	0.98	0.95	0.90	0.80
Storage Duration (h)	-	179.62	70.32	33.89	15.67

2.1 Caratteristica statica della rampa H2

La micro-turbina Turbec T100 dell'impianto AGATUR ha una potenza elettrica nominale pari a 100 kW_e e un'efficienza elettrica del 33%, entrambe dichiarate in condizioni ISO. Il combustore ha una potenza massima pari a 350 kW che corrisponde ad una portata massica di gas naturale non inferiore¹ a 35.2 sm³/h. Come già precisato in precedenza, la sperimentazione sulla micro-turbina prevede l'introduzione di idrogeno solo sulla linea *main*, quindi il tenore volumetrico di H₂ nella miscela combustibile si riferisce solo a questa linea e non alla portata complessiva di combustibile introdotto nella macchina. In Tabella 1 sono state riportate le caratteristiche della miscela GNH2 al variare del tenore di H₂ introdotto nella linea *main*, nell'intervallo 0%_{vol} – 20%_{vol} a cui corrisponde una portata di H₂ compresa tra 0 e 8 sm³/h. A queste portate è associata l'autonomia espressa in ore calcolata ipotizzando un'erogazione continua a portata costante con uno storage di H₂ in bombole pari a 120 sm³. La Figura 1 evidenzia la durata in ore e la portata richiesta al sistema di accumulo e alimentazione dell'idrogeno al variare del tenore volumetrico di H₂ alla linea *main*, nell'intervallo 0-100%.

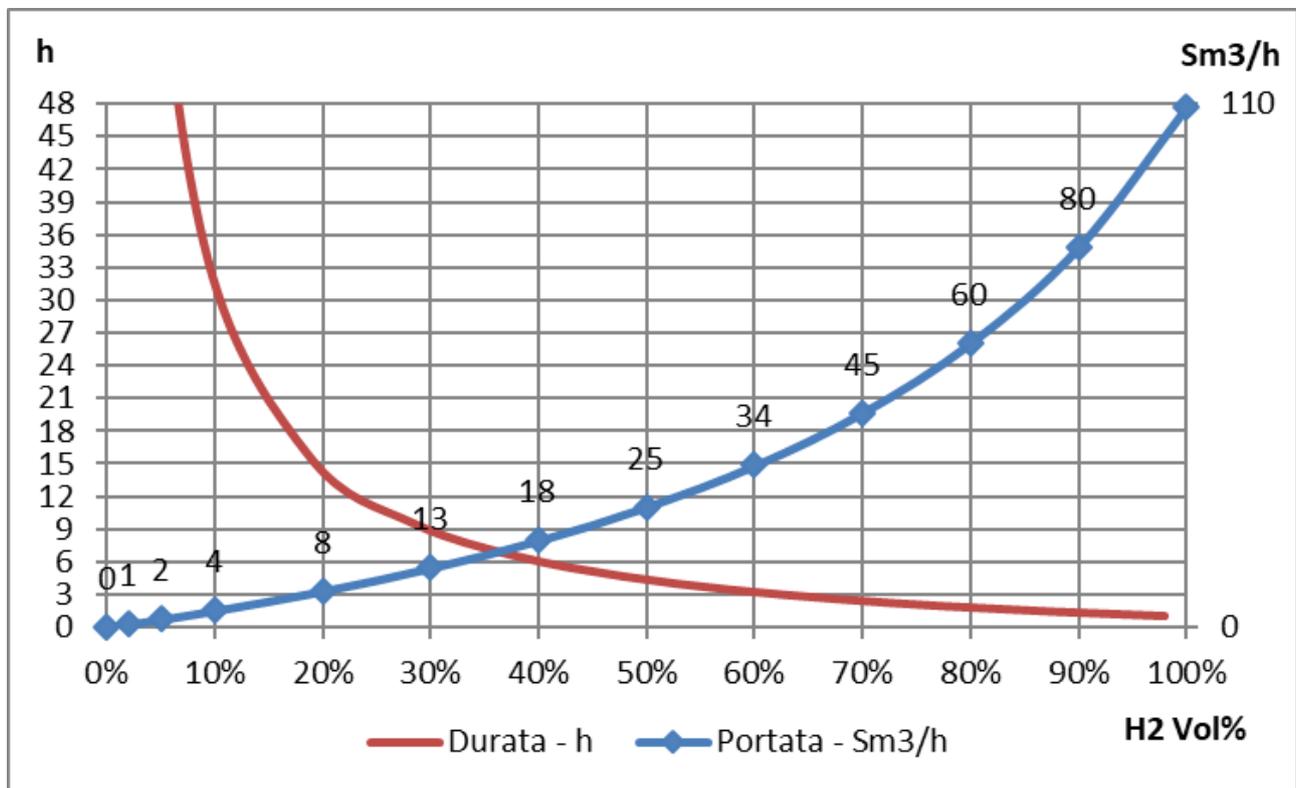


Figura 1. Autonomia (ore) e portata richiesta al sistema di accumulo e alimentazione al variare del tenore volumetrico di H₂ alla linea *main*.

2.2 Caratteristica dinamica della rampa H2

La prestazione dinamica della rampa dovrà garantire variazioni controllate della portata di H₂ con l'obiettivo di testare il comportamento della turbina a gas rispetto a fluttuazioni ripetute nel tempo della composizione della miscela combustibile. A tal fine si prevede una matrice sperimentale composta da otto tipologie di test raggruppate su due classi di frequenza della fluttuazione. Nello specifico la rampa dovrà sostenere fluttuazioni del tenore di H₂ con ampiezza fino al 10%_{vol} che, dimensionate rispetto alla micro-turbina a gas Turbec T100, corrispondono a fluttuazioni di portata di H₂ comprese tra 3.54 sm³/h e 4.12 sm³/h. L'emulazione sperimentale delle fluttuazioni del tenore di H₂ nella miscela combustibile verrà assimilata ad

¹ Il calcolo è stato effettuato ipotizzando 100% CH₄. Il gas naturale ha un potere calorifico in generale più basso a cui corrisponde una portata massica in generale superiore rispetto a quella del metano puro.

una curva sinusoidale di ampiezza A e pulsazione ω , essendo $\omega = 2\pi f$ ed f la frequenza della fluttuazione espressa in Hz. Tutti i test prevedono il raggiungimento di una portata di H_2 stazionaria (\dot{m}_{H_2-stz}) e, a partire da questo valore, l'innescò di fluttuazioni controllate della portata secondo la legge temporale definita dall'equazione (1):

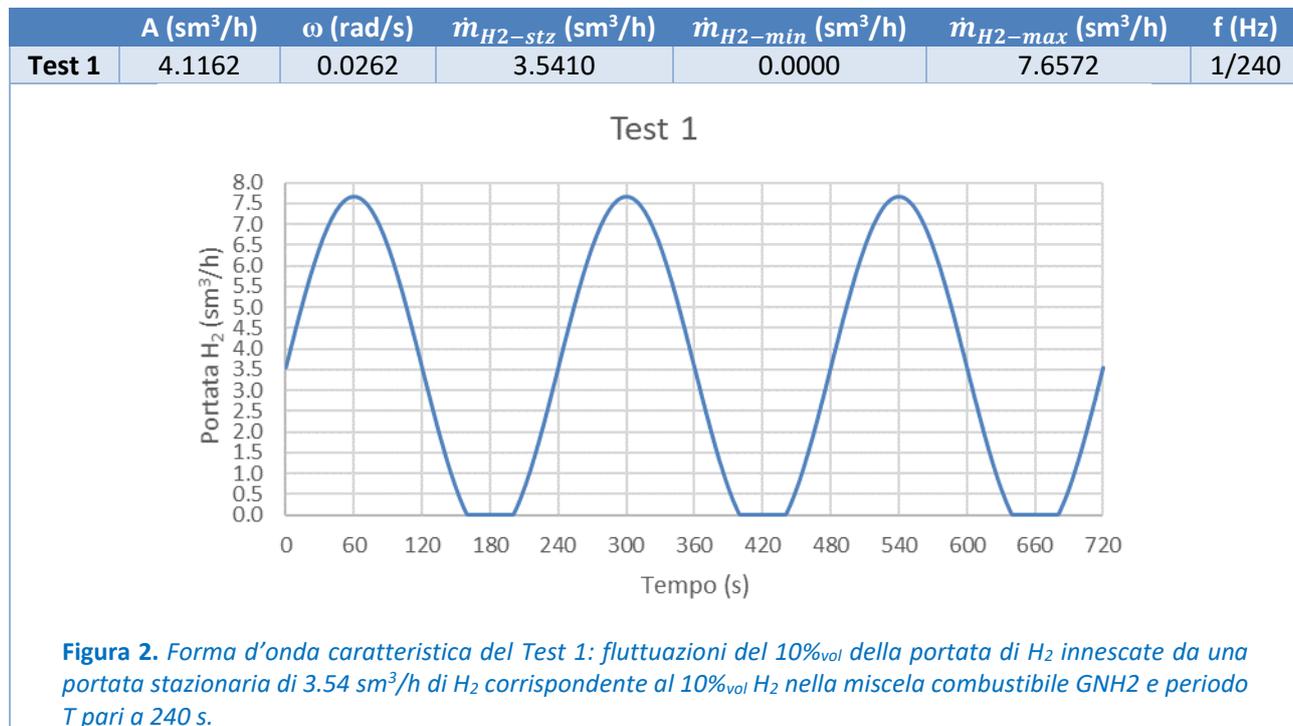
$$\dot{m}_{H_2}(t) = A \cdot (\sin \omega t) + \dot{m}_{H_2-stz} \tag{1}$$

Ciascun test sarà quindi caratterizzato da un valore stazionario della portata di H_2 , accoppiato ad un valore massimo (\dot{m}_{H_2-max}) e un valore minimo (\dot{m}_{H_2-min}) della stessa, con leggi temporali raggruppate in due classi di frequenza $f = 1/T$ corrispondenti rispettivamente a periodi T (intervalli di tempo tra due creste d'onda) pari a 180 s e 240 s. Nella tabella seguente sono stati raggruppati i parametri che definiscono la forma d'onda delle fluttuazioni generate in ogni singolo test.

Tabella 2. Parametri che definiscono la forma d'onda delle fluttuazioni della portata di H_2 emulate negli otto Test che compongono la matrice sperimentale della Turbec T100 alimentata con miscele GNH2.

	A (sm ³ /h)	ω (rad/s)	\dot{m}_{H_2-stz} (sm ³ /h)	\dot{m}_{H_2-min} (sm ³ /h)	\dot{m}_{H_2-max} (sm ³ /h)	f (Hz)
Test 1	4.1162	0.0262	3.5410	0.0000	7.6572	1/240
Test 2	4.1162	0.0349	3.5410	0.0000	7.6572	1/180
Test 3	3.5410	0.0262	0.0000	0.0000	3.5410	1/240
Test 4	3.5410	0.0349	0.0000	0.0000	3.5410	1/180
Test 5	4.1162	0.0262	3.5410	3.5410	7.6572	1/240
Test 6	4.1162	0.0349	3.5410	3.5410	7.6572	1/180
Test 7	3.5410	0.0262	3.5410	0.0000	3.5410	1/240
Test 8	3.5410	0.0349	3.5410	0.0000	3.5410	1/180

L'ampiezza delle fluttuazioni A indicata in Tabella 2 deve essere interpretata come valore nominale. La caratteristica dinamica del sistema di accumulo e alimentazione della linea H_2 dovrà garantire valori di A compresi nell'intervallo 0-5 sm³/h.



	A (sm ³ /h)	ω (rad/s)	\dot{m}_{H_2-stz} (sm ³ /h)	\dot{m}_{H_2-min} (sm ³ /h)	\dot{m}_{H_2-max} (sm ³ /h)	f (Hz)
Test 2	4.1162	0.0349	3.5410	0.0000	7.6572	1/180

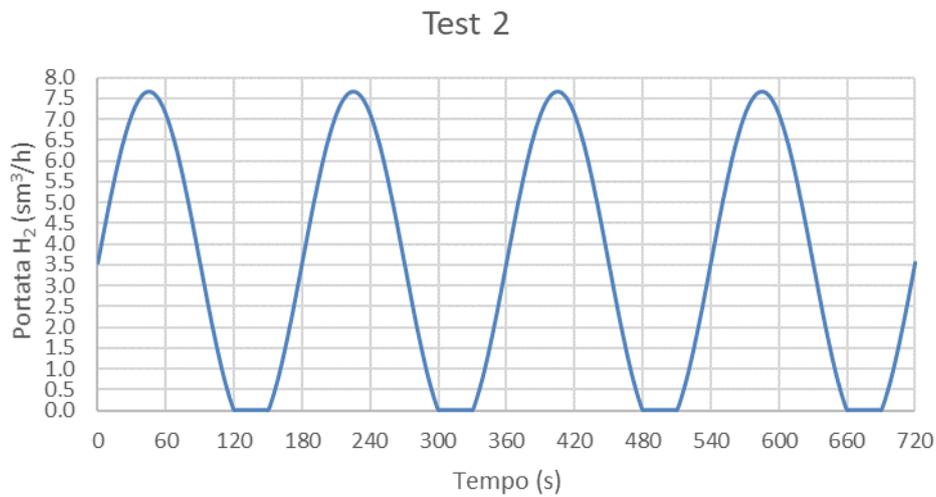


Figura 3. Forma d'onda caratteristica del Test 2: fluttuazioni del 10%_{vol} della portata di H₂ innescate da una portata stazionaria di 3.54 sm³/h di H₂ corrispondente al 10%_{vol} H₂ nella miscela combustibile GNH₂ e periodo T pari a 180 s.

	A (sm ³ /h)	ω (rad/s)	\dot{m}_{H_2-stz} (sm ³ /h)	\dot{m}_{H_2-min} (sm ³ /h)	\dot{m}_{H_2-max} (sm ³ /h)	f (Hz)
Test 3	3.5410	0.0349	0.0000	0.0000	3.5410	1/240

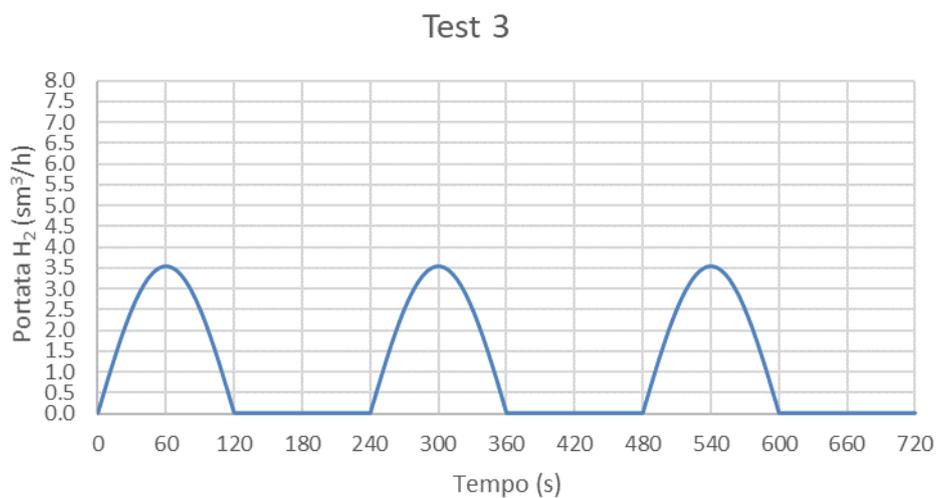
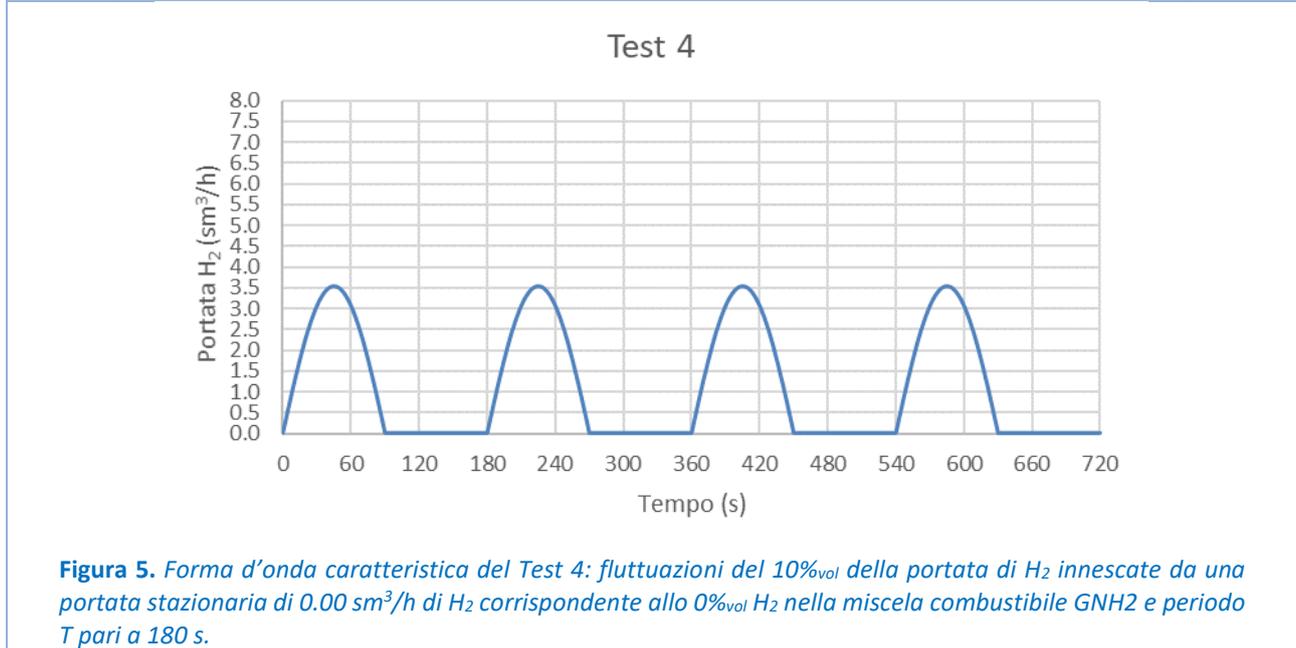
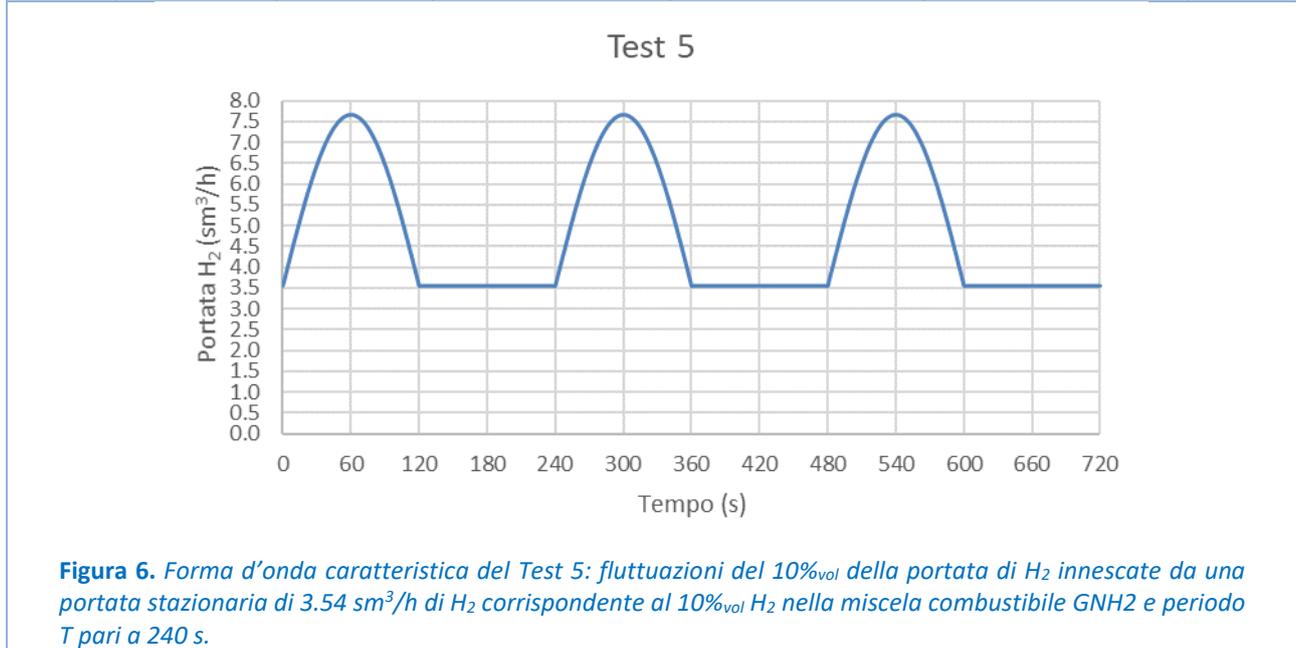


Figura 4. Forma d'onda caratteristica del Test 3: fluttuazioni del 10%_{vol} della portata di H₂ innescate da una portata stazionaria di 0.00 sm³/h di H₂ corrispondente allo 0%_{vol} H₂ nella miscela combustibile GNH₂ e periodo T pari a 240 s.

	A (sm ³ /h)	ω (rad/s)	\dot{m}_{H_2-stz} (sm ³ /h)	\dot{m}_{H_2-min} (sm ³ /h)	\dot{m}_{H_2-max} (sm ³ /h)	f (Hz)
Test 4	3.5410	0.0349	0.0000	0.0000	3.5410	1/180



	A (sm ³ /h)	ω (rad/s)	\dot{m}_{H_2-stz} (sm ³ /h)	\dot{m}_{H_2-min} (sm ³ /h)	\dot{m}_{H_2-max} (sm ³ /h)	f (Hz)
Test 5	4.1162	0.0262	3.5410	3.5410	7.6572	1/240



	A (sm ³ /h)	ω (rad/s)	\dot{m}_{H_2-stz} (sm ³ /h)	\dot{m}_{H_2-min} (sm ³ /h)	\dot{m}_{H_2-max} (sm ³ /h)	f (Hz)
Test 6	4.1162	0.0349	3.5410	3.5410	7.6572	1/180

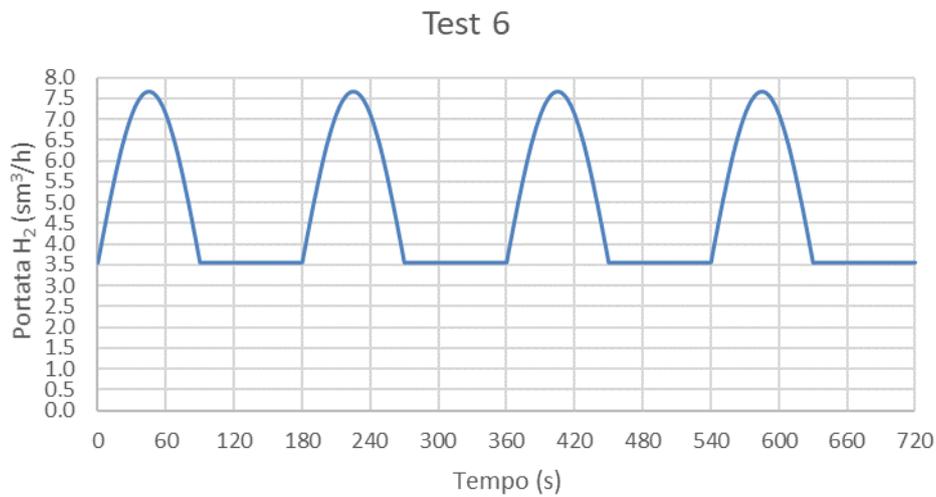


Figura 7. Forma d'onda caratteristica del Test 6: fluttuazioni del 10%_{vol} della portata di H₂ innescate da una portata stazionaria di 3.54 sm³/h di H₂ corrispondente al 10%_{vol} H₂ nella miscela combustibile GNH₂ e periodo T pari a 180 s.

	A (sm ³ /h)	ω (rad/s)	\dot{m}_{H_2-stz} (sm ³ /h)	\dot{m}_{H_2-min} (sm ³ /h)	\dot{m}_{H_2-max} (sm ³ /h)	f (Hz)
Test 7	3.5410	0.0262	3.5410	0.0000	3.5410	1/240

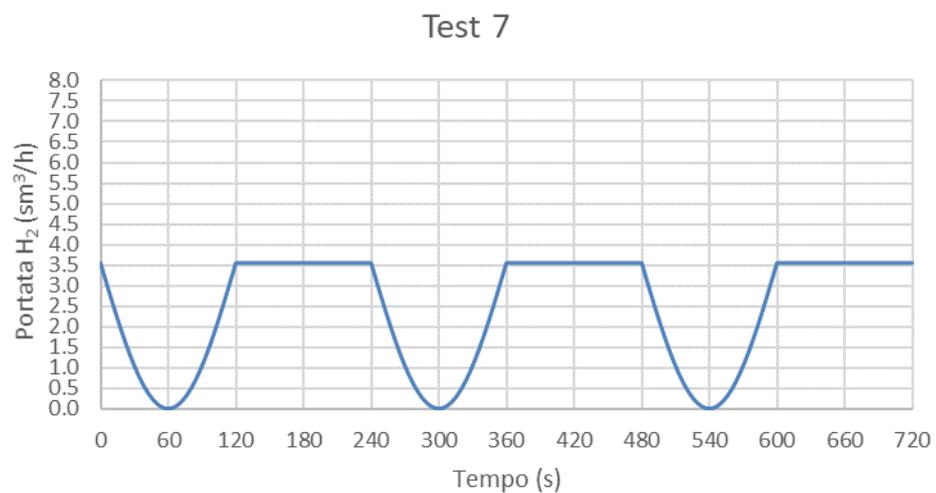
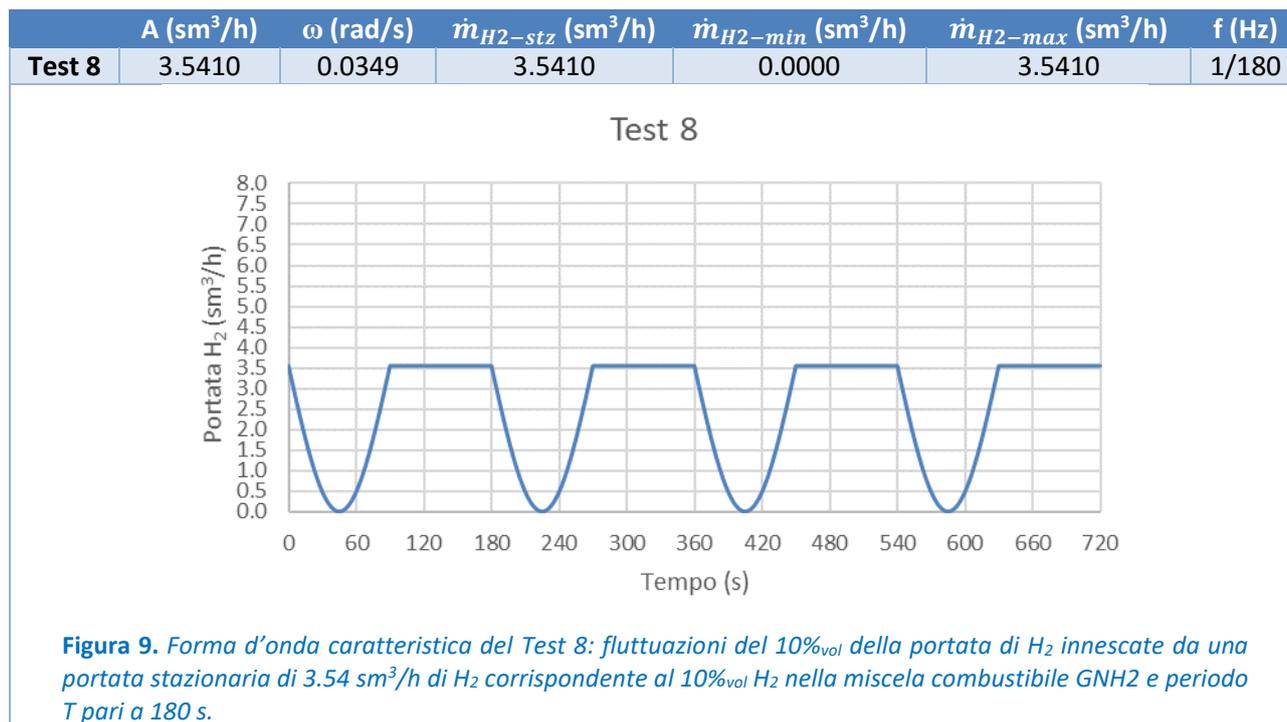


Figura 8. Forma d'onda caratteristica del Test 7: fluttuazioni del 10%_{vol} della portata di H₂ innescate da una portata stazionaria di 3.54 sm³/h di H₂ corrispondente al 10%_{vol} H₂ nella miscela combustibile GNH₂ e periodo T pari a 240 s.



2.3 Linee guida alla progettazione

Il sistema di storage dell'H₂, per il quale è prevista una capacità pari 120 sm³, sarà costituito da due pacchi bombole situati in un'area, già individuata per lo scopo, all'esterno della Hall tecnologica in cui è installata la micro-turbina a gas dell'impianto AGATUR.

La linea di adduzione dell'idrogeno dal sistema di storage al limite di batteria della micro-turbina a gas dovrà preferibilmente essere realizzata mediante giunzioni saldate, riducendo al minimo l'utilizzo delle giunzioni filettate, che saranno riservate solo a specifiche sezioni per le quali si prevede la manutenzione o l'upgrade degli organi di misura, regolazione e controllo.

Il sistema di accumulo e alimentazione sarà dotato di organi riduzione della pressione di numero e caratteristiche tali da garantire un'erogazione stabile delle portate richieste ad una pressione compresa tra 5 e 10 bar assoluti, con capacità di regolazione in questo intervallo non inferiore a 0.1 bar. La regolazione della pressione nell'intervallo 5-10 bar dovrà essere automatizzata e gestita in remoto.

Considerato il profilo operativo del sistema di accumulo e alimentazione dell'idrogeno, si ritiene opportuno valutare l'introduzione di due valvole di regolazione con i corrispondenti organi di misura, ciascuna assegnata rispettivamente alla regolazione statica e fluttuante della portata; ciò in considerazione delle sensibili differenze in termini di portata erogata e dinamica di regolazione e controllo. Il sistema dovrà in ogni caso garantire un'erogazione stabile e sicura della portata massima di idrogeno pari a 110 sm³/h.

Fatta salva la gestione della sicurezza intrinseca del sistema, la regolazione della portata di H₂ e la gestione degli stati (start, stop, blocco, allarmi, etc.) dovranno essere gestiti in remoto mediante trasmissione MODBUS o Ethernet e/o segnali 4-20 mA.

3 Conclusioni

Il documento fornisce le caratteristiche statica e dinamica e le linee guida per la progettazione del sistema di accumulo e alimentazione dell'idrogeno per la micro-turbina a gas dell'impianto AGATUR dell'ENEA. La capacità stimata del sistema di accumulo è pari a 120 sm³, con una portata massima di H₂ erogata pari a 110 sm³/h. Le caratteristiche statica e dinamica definiscono la prestazione del sistema che, nelle condizioni definite dalla matrice sperimentale, prevede l'erogazione di portate di H₂ nell'intervallo 0-8 sm³/h accoppiate con fluttuazioni della portata comprese nell'intervallo 0-5 sm³/h e periodi di 180 s e 240 s.