



Ricerca di Sistema elettrico

Esercizio dell'Impianto AGATUR in assetto EGR-STEP 1: test di stabilità

G. Messina, A. Assettati, E. Giuliotti, A. Grasso, G. Guidarelli, C. Stringola

ESERCIZIO DELL'IMPIANTO AGATUR IN ASSETTO EGR: TEST DI STABILITA'

G. Messina, A. Assettati, E. Giulietti, A. Grasso, G. Guidarelli, C. Stringola (ENEA)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Produzione di Energia Elettrica e Protezione dell'Ambiente

Progetto B.2: Cattura e Sequestro della CO₂ Prodotta da Combustibili Fossili

Obiettivo C: Cicli Turbogas a CO₂

Responsabile del Progetto: Stefano Giammartini, ENEA

Indice

| | |
|---|---|
| SOMMARIO..... | 4 |
| 1 INTRODUZIONE..... | 4 |
| 2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI..... | 5 |
| 2.1 PROVE DI STABILITÀ SUL SISTEMA DI ALIMENTAZIONE ARIA-CO2 DI AGATUR..... | 5 |
| 2.2 DEFINIZIONE DELLA MAPPA DI ESERCIZIO DI AGATUR IN ASSETTO EGR-STEP1..... | 7 |
| 2.2.1 <i>Descrizione e utilizzo della mappa di funzionamento di AGATUR.....</i> | 7 |
| 3 CONCLUSIONI..... | 9 |

Sommario

La necessità di definire il dominio di esercizio dell'impianto AGATUR in assetto EGR-STEP1 ha richiesto l'esecuzione di una campagna sperimentale per valutare i limiti operativi del sistema di alimentazione aria-CO₂. L'intersezione tra i rilievi sperimentali ottenuti e i risultati delle simulazioni a carattere previsionale della μ GT, ha consentito di costruire uno strumento efficace per la valutazione del punto di accoppiamento al variare della temperatura ambiente e del tenore di CO₂ richiesto, coerentemente con i limiti dimensionali di AGATUR.

1 Introduzione

Il contenuto del presente documento è strettamente connesso con le attività descritte nel report Rds/PAR2014/244, alla lettura del quale si rimanda per la definizione della "ratio" sottostante le attività di ricerca connesse con l'obiettivo C – "Cicli turbogas a CO₂" del Progetto B.2. Le attività descritte nel presente documento avevano un duplice obiettivo:

1. verificare il dominio di funzionamento stabile del sistema di alimentazione aria- CO₂ dell'impianto AGATUR;
2. determinare le curve di accoppiamento stabile tra il sistema di alimentazione sopra citato e la microturbina (μ GT).

Con riferimento al punto 1, l'obiettivo è stato raggiunto mediante prove sperimentali effettuate su AGATUR, "stressando" i sottosistemi coinvolti fino a portarli al limite di funzionamento, verificando la ripetibilità delle prove effettuate.

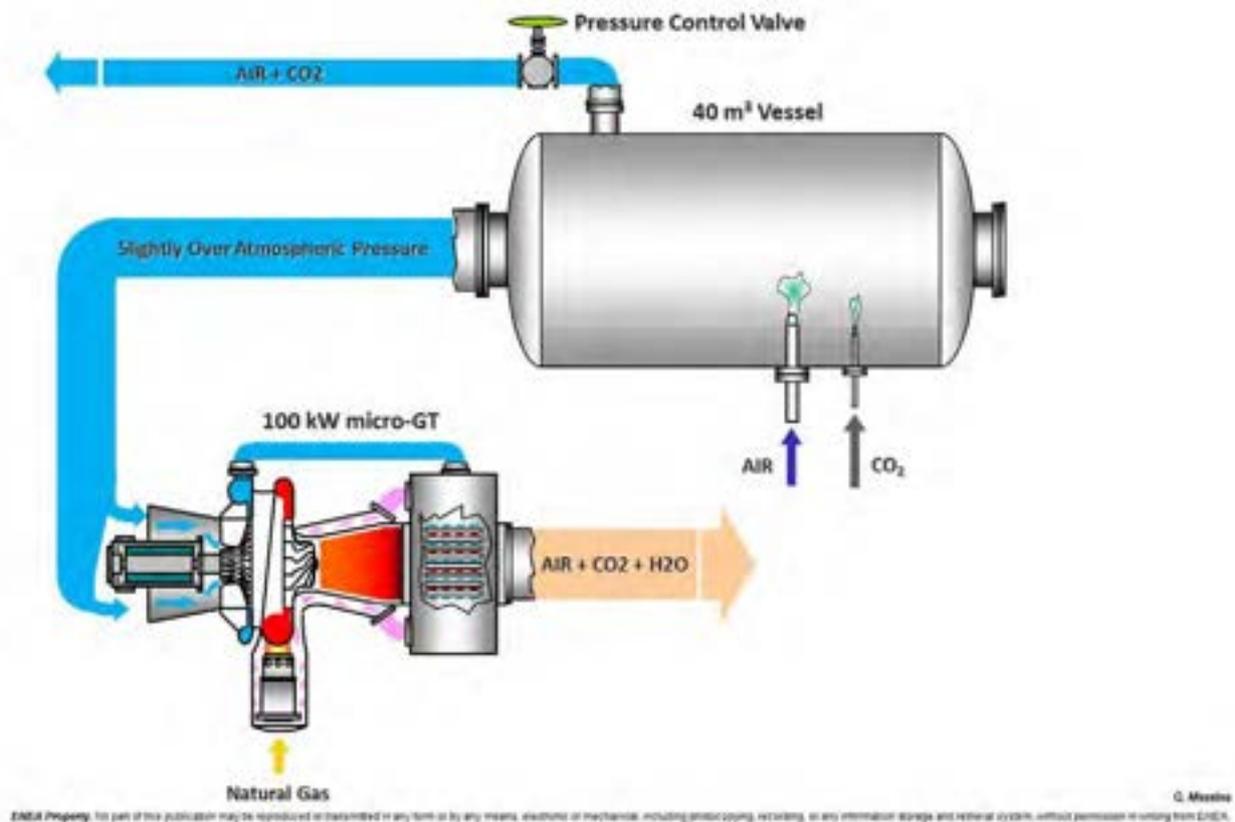


Figura 1. Schema dell'impianto AGATUR in assetto EGR-STEP1

Con riferimento al punto 2, i rilievi sperimentali ottenuti dai test di stabilità sono stati “incrociati” con i risultati delle simulazioni dell’esercizio della μ GT, in una gamma di condizioni operative sufficientemente ampia da coprire il dominio definito dai limiti dimensionali del sistema di alimentazione.

I risultati ottenuti consentono di definire quantitativamente i limiti operativi di AGATUR per l’esercizio in assetto EGR-STEP1. Maggiori dettagli sull’assetto operativo in questione vengono forniti nel report Rds/PAR2014/244.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Prove di stabilità sul sistema di alimentazione aria-CO₂ di AGATUR

I test di stabilità effettuati sul sistema di alimentazione aria-CO₂ dell’impianto AGATUR sono stati finalizzati alla valutazione del dominio di funzionamento stabile del sistema, con particolare riferimento alla erogazione controllata in termini di portate massiche e pressioni di esercizio. L’esercizio dell’impianto AGATUR in assetto EGR-STEP1 prevede l’accoppiamento fluidodinamico tra la sezione di aspirazione della μ GT e il vessel (figura 1), essendo quest’ultimo il plenum che garantisce l’erogazione costante del fluido di lavoro, di composizione predefinita, in condizioni di pressione leggermente superiori a quelle ambiente (0.1 bar_g). I sottosistemi simultaneamente in marcia per garantire il servizio di erogazione della miscela aria- CO₂ sono:

- l’impianto criogenico, ovvero il complesso formato dal serbatoio di stoccaggio della CO₂, in forma liquida, dall’evaporatore e dalla valvola di erogazione;
- l’impianto di erogazione dell’aria compressa, composto da una batteria di tre compressori in parallelo;
- il vessel, dove ha luogo il miscelamento;
- la valvola regolatrice della pressione all’interno del vessel (PCV);
- il sistema di controllo che gestisce la movimentazione delle valvole di alimentazione (aria e CO₂) e della PCV.

La batteria di compressione è in grado di erogare fino a 2580 kg/h a 6 bar_g. L’aria compressa viene quindi laminata mediante valvola riduttrice fino alle condizioni di pressione vigenti nel vessel, all’interno del quale avviene il mescolamento con la CO₂. Il vessel, oltre a fungere da mixer per la formazione della miscela, ha l’importante compito di compensare le fluttuazioni di portata e di pressione sia dal lato turbina, sia dal lato batteria di compressione e, non meno importante, di fornire inerzia fluidodinamica necessaria durante le variazioni di assetto. Oltre alla notevole capacità del vessel (circa 40 m³), una valvola regolatrice di pressione comandata da un PID provvede a mantenere le condizioni di pressione richieste. L’obiettivo ultimo della catena di regolazione consiste nell’inseguire le condizioni richieste dalla turbina sia in termini di portata massica sia di pressione di alimentazione.

I test effettuati hanno consentito di valutare la corretta riproduzione di queste condizioni, con diverse composizioni della miscela aria-CO₂, controllando stabilmente la pressione di erogazione. Le prove di stabilità hanno evidenziato le condizioni limite di esercizio del sistema, corrispondenti, in estrema sintesi, alla massima portata d’aria e alle portate massima e minima di CO₂. Con riferimento alla portata massica di CO₂ si riscontra il limite dimensionale massimo del sistema corrispondente a 300 kg/h, al di sopra del quale si incorre nel congelamento della linea proveniente dallo stoccaggio criogenico. Si riscontra parimenti un limite minimo nell’erogazione stabile della CO₂, coincidente con 40 kg/h, al di sotto del quale si instaura il pendolamento non controllabile della valvola di alimentazione.

Complessivamente sono state riprodotte 25 condizioni di esercizio, in due sessioni distinte (tabella 1). Nei test da 1 a 10, è stata mantenuta la portata d’aria sostanzialmente costante, riproducendo composizioni del fluido di lavoro con tenori di CO₂ variabili da 1% a 10%. La portata d’aria è stata impostata a circa 2000 kg/h,

indicativa di una condizione di marcia della μ GT a basso regime, tipicamente 80-85% del numero di giri nominale, quando la temperatura ambiente è intorno ai 15 °C. Nella seconda sessione (test da 11 a 25) si è voluto sfruttare al massimo la capacità del sistema, cercando di raggiungere le massime portate di fluido, con i maggiori tenori di CO₂ nella miscela. In questa seconda sessione emergono i limiti dimensionali, si nota infatti che con la massima portata d’aria è possibile ottenere tenori di CO₂ nella miscela non superiori al 10% (test 20) a causa del raggiungimento del limite superiore di erogazione dell’impianto criogenico.

Tabella 1. Sintesi dei test di stabilità effettuati sul sistema di erogazione aria-CO₂ di AGATUR.

| TEST | WORKING FLUID | | | | | | | |
|------|----------------|-------|--------|---------|---------|--------|-----------------|---------|
| | Carbon Dioxide | | | Air | | | Total Mass Rate | |
| | kg/h | kg/s | mass % | kg/h | kg/s | mass % | kg/h | kg/s |
| 1 | 20 | 0,006 | 0,99 | 2000 | 0,556 | 99,01 | 2020 | 0,561 |
| 2 | 40 | 0,011 | 1,96 | 2000 | 0,556 | 98,04 | 2040 | 0,567 |
| 3 | 62 | 0,017 | 3,01 | 2000 | 0,556 | 96,99 | 2062 | 0,573 |
| 4 | 83 | 0,023 | 3,98 | 2000 | 0,556 | 96,02 | 2083 | 0,579 |
| 5 | 105 | 0,029 | 4,99 | 2000 | 0,556 | 95,01 | 2105 | 0,585 |
| 6 | 127 | 0,035 | 5,97 | 2000 | 0,556 | 94,03 | 2127 | 0,591 |
| 7 | 150 | 0,042 | 6,98 | 2000 | 0,556 | 93,02 | 2150 | 0,597 |
| 8 | 173 | 0,048 | 7,96 | 2000 | 0,556 | 92,04 | 2173 | 0,604 |
| 9 | 197 | 0,055 | 8,97 | 2000 | 0,556 | 91,03 | 2197 | 0,610 |
| 10 | 220 | 0,061 | 9,91 | 2000 | 0,556 | 90,09 | 2220 | 0,617 |
| TEST | Carbon Dioxide | | | Air | | | Total Mass Rate | |
| | kg/h | kg/s | mass % | kg/h | kg/s | mass % | kg/h | kg/s |
| | 11 | 26,00 | 0,007 | 1,00 | 2580,00 | 0,72 | 99,00 | 2606,00 |
| 12 | 52,65 | 0,015 | 2,00 | 2580,00 | 0,72 | 98,00 | 2632,65 | 0,73 |
| 13 | 79,80 | 0,022 | 3,00 | 2580,00 | 0,72 | 97,00 | 2659,80 | 0,74 |
| 14 | 107,50 | 0,030 | 4,00 | 2580,00 | 0,72 | 96,00 | 2687,50 | 0,75 |
| 15 | 135,80 | 0,038 | 5,00 | 2580,00 | 0,72 | 95,00 | 2715,80 | 0,75 |
| 16 | 164,70 | 0,046 | 6,00 | 2580,00 | 0,72 | 94,00 | 2744,70 | 0,76 |
| 17 | 194,20 | 0,054 | 7,00 | 2580,00 | 0,72 | 93,00 | 2774,20 | 0,77 |
| 18 | 224,30 | 0,062 | 8,00 | 2580,00 | 0,72 | 92,00 | 2804,30 | 0,78 |
| 19 | 252,20 | 0,070 | 8,90 | 2580,00 | 0,72 | 91,10 | 2832,20 | 0,79 |
| 20 | 286,70 | 0,080 | 10,00 | 2580,00 | 0,72 | 90,00 | 2866,70 | 0,80 |
| 21 | 318,90 | 0,089 | 11,00 | 2580,00 | 0,72 | 89,00 | 2898,90 | 0,81 |
| 22 | 300,00 | 0,083 | 11,00 | 2427,00 | 0,67 | 89,00 | 2727,00 | 0,76 |
| 23 | 300,00 | 0,083 | 12,00 | 2200,00 | 0,61 | 88,00 | 2500,00 | 0,69 |
| 24 | 300,00 | 0,083 | 13,04 | 2000,00 | 0,56 | 86,96 | 2300,00 | 0,64 |
| 25 | 300,00 | 0,083 | 14,00 | 1843,00 | 0,51 | 86,00 | 2143,00 | 0,60 |

Valori più elevati sono stati raggiunti nel test 21, ma l’erogazione non si è dimostrata stabile a causa del rapido congelamento della linea di alimentazione della CO₂. Nei test da 22 a 30 si sono ottenuti tenori di CO₂ nella miscela fino al 14% in condizioni stabili, ma con valori della portata d’aria inferiori al massimo erogabile, modulati in maniera tale da non superare il tetto dei 300 kg/h imposto dall’impianto criogenico.

In figura 2 viene proposta una sintesi grafica dei test effettuati, tenendo conto dei limiti dimensionali riscontrati sul sistema reale. Sui due assi vengono riportate le portate d’aria (ascisse) e CO₂ (ordinate), coerentemente con la massima portata d’aria erogabile e la massima e minima portata di CO₂, contenuta nell’intervallo 40-300 kg/h. Le miscele aria-CO₂ vengono riportate come curve parametriche a passi dell’1%. Si nota facilmente che il sistema può erogare stabilmente miscele con tenore di CO₂ non inferiore al 2% e, in un ristretto campo operativo, fino al 14%. La curva del 10% “taglia” trasversalmente il grafico ed è pertanto il tenore di CO₂ massimo ottenibile in tutto il range operativo del sistema.

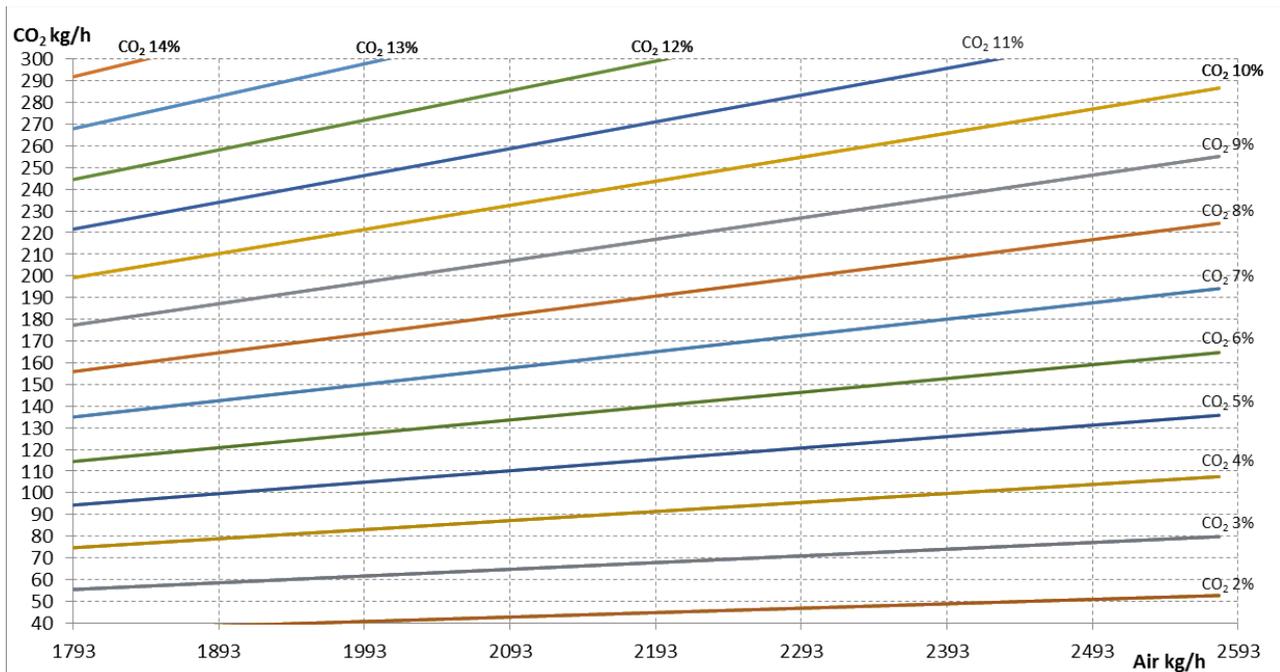


Figura 2. Dominio di funzionamento del sistema di erogazione della miscela aria/CO₂ dell'impianto AGATUR in assetto EGR - STEP 1

2.2 Definizione della mappa di esercizio di AGATUR in assetto EGR-STEP1.

Come già accennato, lo scopo ultimo dei test di stabilità, non si limita alla verifica prestazionale del sistema di erogazione aria-CO₂, ma alla definizione di un dominio di accoppiamento con la μ GT. Con riferimento a quest'ultima, nel caso in questione la sua performance è pesantemente influenzata da tre variabili: la composizione del fluido, la velocità angolare (RPM) e la temperatura ambiente. Accertato che è possibile controllare le prime due, si è certamente costretti a subire la terza che, come si vedrà in seguito, influenza notevolmente il dominio di accoppiamento. Per valutarne l'effetto sono state effettuate una serie di simulazioni di esercizio della μ GT a RPM costanti, facendo variare lentamente ma con continuità la temperatura di aspirazione della macchina. Nello specifico, ciascuna sessione di simulazione è stata impostata in due tempi, una prima fase di regimazione a RPM costanti e temperatura costante pari a 15 °C, della durata di 30 minuti. Successivamente la temperatura di aspirazione è stata aumentata con una rampa di 0.333 °C/min fino al raggiungimento dei 35 °C, corrispondenti a 60 min a RPM costanti e temperatura di aspirazione variabile. La composizione del fluido di lavoro, aria ambiente alla pressione corrispondente all'altitudine del C.R. Casaccia, è stata mantenuta costante. Con questa procedura si è ottenuta una famiglia di curve che riproducono l'andamento della portata massica d'aria aspirata dalla μ GT al variare della temperatura ambiente. Dalle curve così ottenute, mediante interpolazione ai minimi quadrati, si è ricavata la funzione inversa, ovvero la temperatura ambiente in funzione della portata in massa a RPM costanti. La famiglia di curve ottenute è stata inserita nel dominio di funzionamento del sistema di alimentazione aria-CO₂ (figura 2), ottenendo, in sintesi, l'obiettivo atteso, ovvero il dominio di accoppiamento tra il sistema di alimentazione di AGATUR e μ GT (figura 3).

2.2.1 Descrizione e utilizzo della mappa di funzionamento di AGATUR

La mappa è composta da tre assi e due famiglie di curve parametriche. L'asse delle ascisse copre il dominio relativo all'alimentazione dell'aria compressa, l'asse delle ordinate a sinistra il dominio relativo all'alimentazione della CO₂ da criogenico, l'asse delle ordinate a destra si riferisce all'intervallo operativo della temperatura di aspirazione. Le curve inclinate colorate in nero indicano una composizione costante del fluido di lavoro, ottenuta con portate variabili di aria e CO₂, le curve colorate in rosso indicano la "richiesta" di portata massica d'aria della μ GT a RPM costanti, al variare della temperatura ambiente.

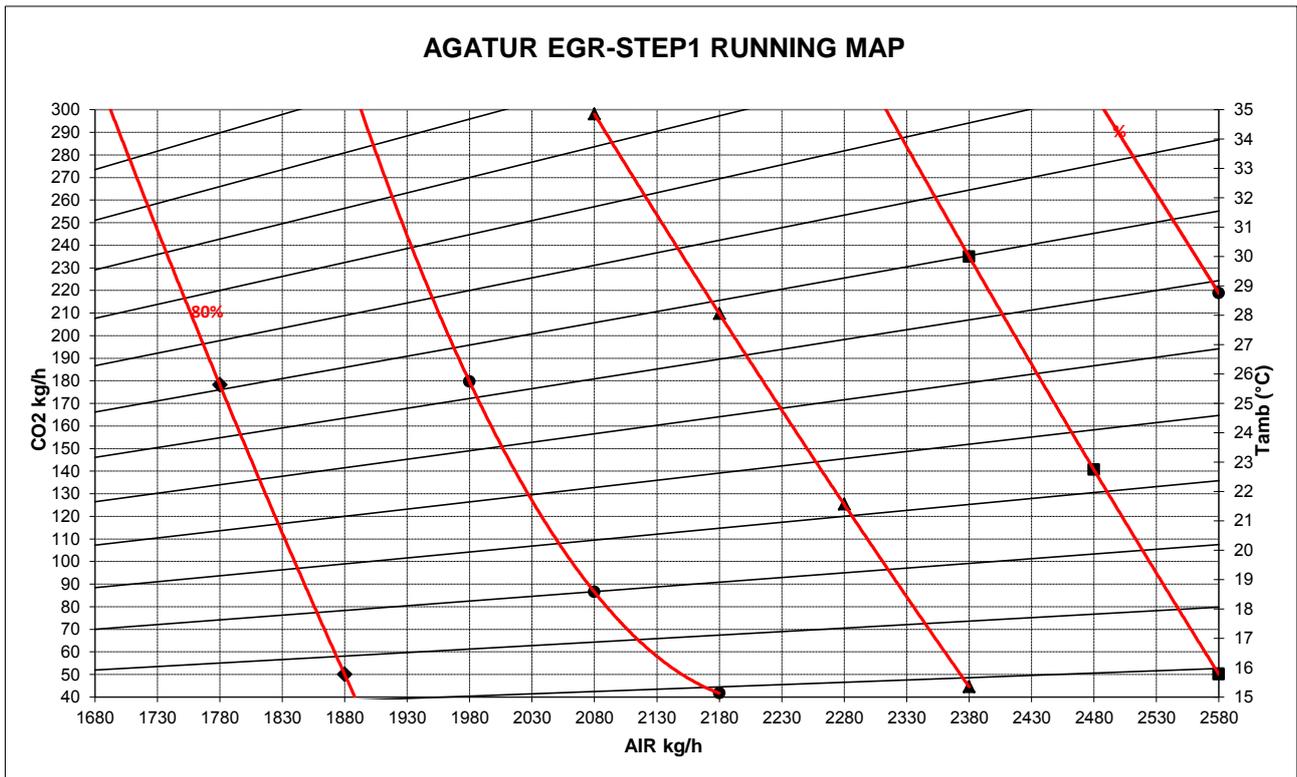


Figura 3. Mappa di funzionamento di AGATUR in assetto EGR-STEP1

Per non compromettere la chiarezza della mappa, che viene qui riportata a titolo di esempio, le curve a RPM costanti sono state riportate a passi del 5%, tuttavia l'efficacia della mappa aumenta notevolmente se le stesse curve vengono tracciate a passi dell'1%.

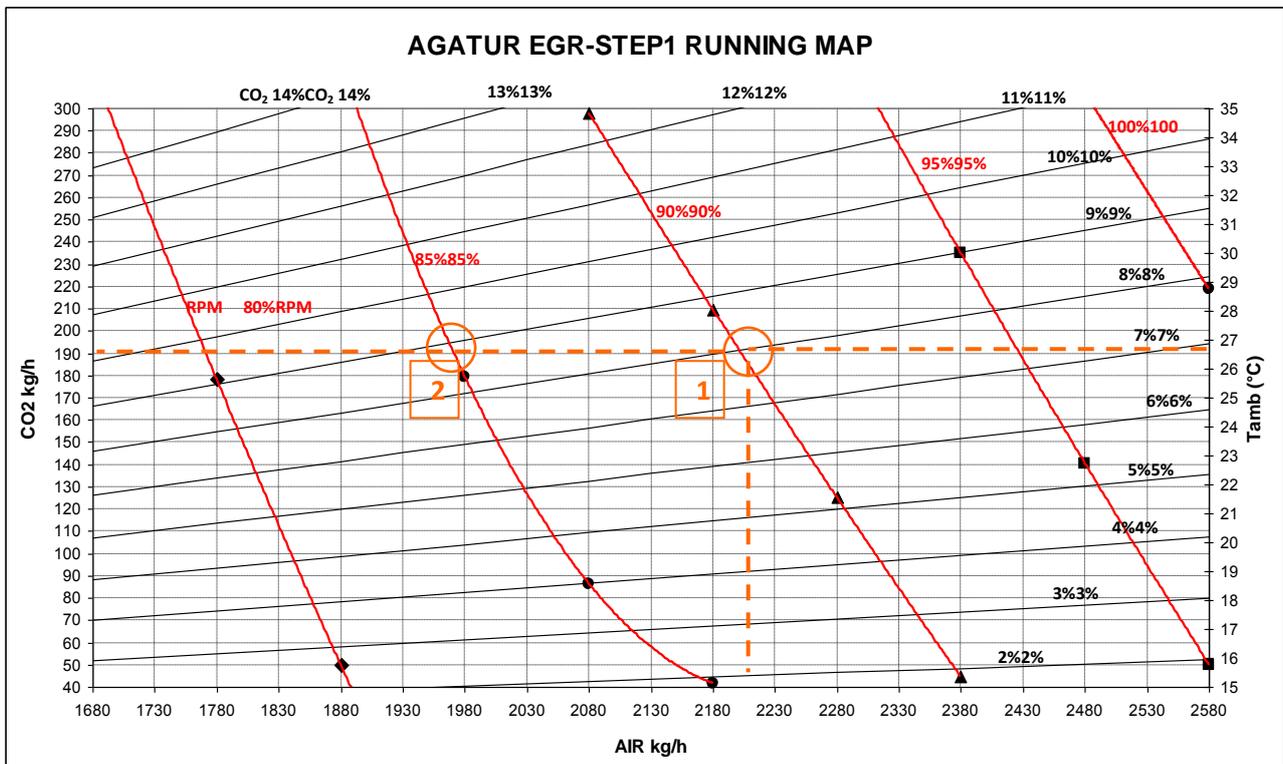


Figura 4. Utilizzo della mappa di funzionamento di AGATUR

La mappa consente di stimare molto rapidamente le portate e il regime di funzionamento della μ GT quando, data una certa temperatura ambiente, si voglia riprodurre una definita composizione del fluido di lavoro da avviare alla macchina. Si ipotizzi una temperatura ambiente di 27 °C e si voglia un tenore di CO₂ nel fluido di lavoro pari all'8%, "entrando" nel grafico da destra e tracciando una parallela all'asse delle ascisse all'altezza dei 27°C, si ottiene l'accoppiamento con la μ GT per RPM = 90%; in queste condizioni, la portata massica d'aria da avviare al vessel sarà pari a 2200 kg/h, mentre la portata massica di CO₂ sarà pari a 190 kg/h. Supponiamo adesso di voler aumentare il tenore di CO₂ al 9%, la temperatura ambiente non è cambiata, pertanto, l'unica manovra che consente di ottenere la soluzione voluta consiste nel diminuire la velocità angolare della μ GT all'85% e contestualmente diminuire la portata d'aria da inviare al vessel al valore di 1980 kg/h, ovvero spostando il punto di accoppiamento da 1 a 2 (figura 4).

3 Conclusioni

La definizione della "AGATUR EGR-STEP1 RUNNING MAP" centra l'obiettivo che ci si era posti con l'intraprendere le attività qui descritte. La mappa rappresenta uno strumento rapido ed efficace per definire il dominio di accoppiamento della μ GT con il sistema di alimentazione aria-CO₂. La precisione del risultato dipende senz'altro dall'accuratezza del simulatore utilizzato e dalla bontà delle curve interpolanti, fattori che suggeriscono di consolidare con una validazione "sul campo" lo strumento costruito.