



Ricerca di Sistema elettrico

Progetto definitivo del reattore a membrana prototipale per la produzione di idrogeno mediante conversione termocatalitica del biogas

L. Turchetti, G. Canneto

PROGETTO DEFINITIVO DEL REATTORE A MEMBRANA PROTOTIPALE PER LA PRODUZIONE DI IDROGENO
MEDIANTE CONVERSIONE TERMOCATALITICA DEL BIOGAS

L. Turchetti, G. Canneto (ENEA, Divisione STSN)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: 1.2 Sistemi di accumulo, compresi elettrochimico e power to gas, e relative interfacce con le reti

Work package: 3 Power to gas

Linea di attività: 3.47

Responsabile del Progetto: Giulia Monteleone, ENEA

Responsabile del Work package: Luca Turchetti, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DEFINIZIONE DELLA SEZIONE DI PROVA DA REALIZZARE.....	5
2.1 DESCRIZIONE GENERALE DEL SISTEMA.....	5
2.2 MODALITÀ E CONDIZIONI OPERATIVE.....	8
2.3 MATERIALI.....	9
2.4 SISTEMA DI RISCALDAMENTO.....	10
3 DISEGNI COSTRUTTIVI DEL REATTORE.....	10

Sommario

A partire dal progetto preliminare sviluppato nella LA 3.43 sulla base di un modello semplificato monodimensionale, è stato realizzato il progetto definitivo di una sezione di prova costituita da un reattore ad innovativa configurazione planare per il reforming del biogas a bassa temperatura.

Il documento rappresenta una sintesi dell'allegato tecnico sulla base della quale è stata affidata la realizzazione della sezione di prova tramite appalto esterno.

Dopo una breve descrizione del sistema nel suo insieme, dei componenti e delle specifiche richieste in termini di materiali e condizioni operative, vengono riportate le principali tavole dei disegni costruttivi elaborati per la realizzazione del reattore.

1 Introduzione

Nell'ambito della prima annualità del PTR 19-21 per la Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale, ENEA ha effettuato il dimensionamento di massima di un reattore ad innovativa configurazione planare per il reforming del biogas a bassa temperatura (LA 3.43). Tale progetto di massima è stato sviluppato sulla base di simulazioni effettuate con un modello matematico monodimensionale semplificato, che assumeva proprietà fisiche costanti all'interno del reattore. Partendo da questi risultati, il lavoro presentato in questo documento è stato finalizzato alla realizzazione di un progetto definitivo per la realizzazione del reattore. A tal fine, sono stati dapprima sviluppati due tipi di modelli caratterizzati da un maggior grado di dettaglio della descrizione:

- Un modello monodimensionale a proprietà fisiche variabili con temperatura e pressione, che include nella descrizione il meccanismo di trasporto diffusivo assiale sia per il calore che per la materia (implementato in ambiente MATLAB).
- Un modello tridimensionale analogo a quello descritto al punto precedente (implementato in ambiente COMSOL)

Il confronto delle simulazioni con quelle ottenute in precedenza, ha dimostrato che il modello semplificato consente di cogliere tutti gli aspetti salienti necessari alla descrizione del comportamento del reattore e, nei limiti della precisione richiesta per la progettazione, di ottenere risultati sufficientemente accurati.

Di conseguenza, il progetto definitivo qui presentato non si discosta in modo sostanziale da quello preliminare se non nella definizione delle due misure maggiori dei due canali, mentre le condizioni operative rilevanti selezionate nell'ambito della LA 3.43 restano invariate.

E' comunque opportuno sottolineare che tutti i modelli sviluppati, dal più semplice al più complesso, descrivono solo i fenomeni termofluidodinamici e di reazione chimica che avvengono all'interno dei due canali che costituiscono il reattore. Gli aspetti termomeccanici non sono invece presi in considerazione in questa sede.

Il documento rappresenta una sintesi dell'allegato tecnico sulla base della quale è stata affidata la realizzazione della sezione di prova tramite appalto esterno. Dopo una breve descrizione del sistema nel suo insieme, dei componenti e delle specifiche richieste in termini di materiali e condizioni operative, vengono riportate le principali tavole dei disegni costruttivi elaborati per la realizzazione del reattore.

2 Definizione delle caratteristiche della sezione di prova da realizzare

2.1 Descrizione generale del sistema

La sezione di prova da realizzare consiste in un prototipo di reattore planare a membrana per lo steam reforming del biogas. Tale componente sarà inserito in un circuito sperimentale e sarà sottoposto ad una campagna di prove al fine di determinarne la performance in corrispondenza di diverse condizioni operative. L'impianto permette di gestire le correnti in ingresso e in uscita dalla sezione di prova, di controllarne le condizioni operative e di acquisire le variabili di processo necessarie all'analisi della performance.

Il reattore è essenzialmente costituito da due canali piani sottili (fenditure a sezione rettangolare, aventi una dimensione significativamente più piccola delle altre due) adiacenti e attraversati, in verso opposto lungo la direzione della dimensione maggiore dei canali, da due correnti di gas. I due condotti sono separati da una piastra piana di spessore 5 mm che, a seconda delle modalità operative, può essere di due tipi:

- membrana: permeabile in modo selettivo ad alcuni componenti della miscela gassosa
- diaframma: impermeabile a tutti i componenti delle miscele gassose nei due canali

Lungo i bordi della membrana/diaframma, la tenuta tra i due canali è assicurata mediante l'uso di guarnizioni metalliche. L'eventuale passaggio dei gas tra i due canali deve avvenire solo con il meccanismo della permeazione selettiva attraverso la membrana.

Nello specifico, i canali presenti nel sistema sono:

- Canale di reazione: dove viene alimentata una miscela di metano, anidride carbonica e vapore e avviene la reazione di steam reforming e la produzione di idrogeno e piccole quantità di monossido di carbonio. In questo canale è alloggiato l'elemento catalitico necessario per far avvenire la reazione, che consiste in una schiuma monolitica in lega Fe-Ni, su cui è depositato il catalizzatore necessario per il processo; la schiuma è inserita in una cornice metallica di dimensioni 125 x 10 x 250 mm (125 x 10 mm: sezione trasversale, 250 mm lunghezza, rispetto al flusso dei gas) ne facilita l'alloggiamento (Figura 1). Il canale ha le stesse dimensioni dell'elemento catalitico incrementate di 0.4 mm per consentirne l'inserimento.
- Canale di permeazione: dove viene alimentato in controcorrente azoto e vengono raccolti i gas che permeano attraverso la membrana.

Dal punto di vista costruttivo, il reattore è costituito da due gusci che si accoppiano con la membrana/diaframma attraverso le guarnizioni.

In corrispondenza delle sezioni di ingresso e di uscita dei due canali, saranno presenti 22 fori distribuiti simmetricamente in modo da uniformare il flusso dei gas alimentati su tali superfici. Inoltre, a tutte e quattro le sezioni di ingresso e di uscita dei gas saranno saldati condotti a sezione variabile di forma prismatica trapezoidale, che serviranno da raccordo tra tali sezioni ed il corrispondente punto di allaccio con il circuito sperimentale. Tali condotti saranno riempiti con materiale granulare inerte per ridurre il grado di vuoto e migliorare la distribuzione del gas; inoltre, tali condotti termineranno con un raccordo filettato da $\frac{1}{4}$ " per l'allaccio alle tubazioni del circuito di prova.

Nel canale di reazione, sono previsti 3 pozzetti laterali per l'accesso di termocoppie (tipo K) da mettere in contatto con l'elemento catalitico in 3 punti collocati in diverse posizioni lungo la dimensione maggiore del canale di reazione, posti rispettivamente ad una distanza (misurata dall'asse del pozzetto) di 16,16 mm, 137,41 mm e 232,41 mm dalla sezione di ingresso dei gas nel condotto di reazione.

L'intero sistema deve poter essere aperto e chiuso per consentire l'ispezione interna a valle delle prove sperimentali e per consentire la sostituzione del catalizzatore e/o della membrana/diaframma tra una campagna di prove e l'altra.

In Figura 2 sono riportati dei rendering esplicativi dei vari componenti sopra descritti e del loro assemblaggio all'interno del reattore. I rendering sono stati prodotti a partire dai disegni CAD che fanno parte integrante di questo progetto. Inoltre, in coda al presente documento si riportano le principali tavole estratte da tali file che contengono i dettagli geometrici degli elementi sopra descritti.

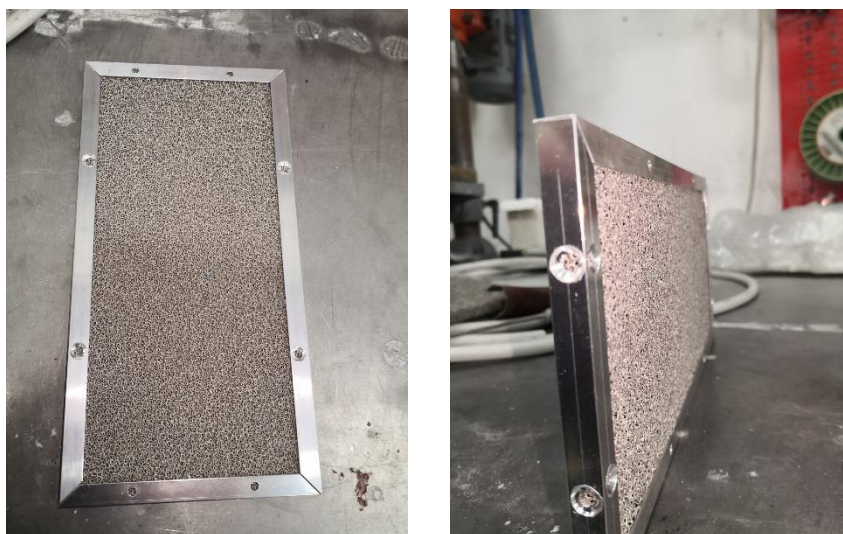


Figura 1 Elementi catalitici da inserire nel canale di reazione. Nella versione finale, la cornice sarà completamente aperta in corrispondenza delle sezioni di ingresso/uscita dei gas.

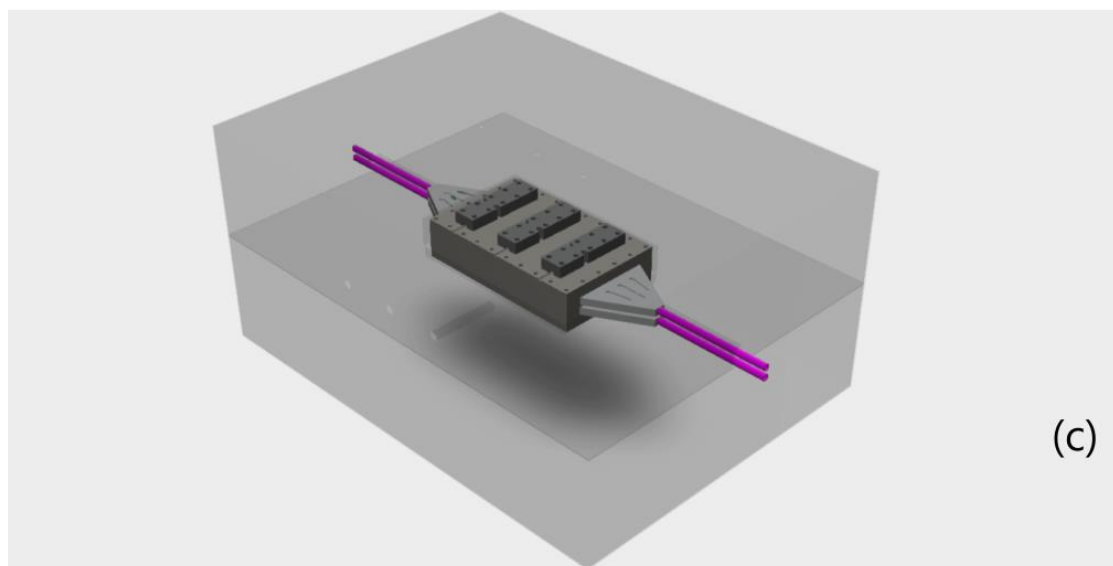
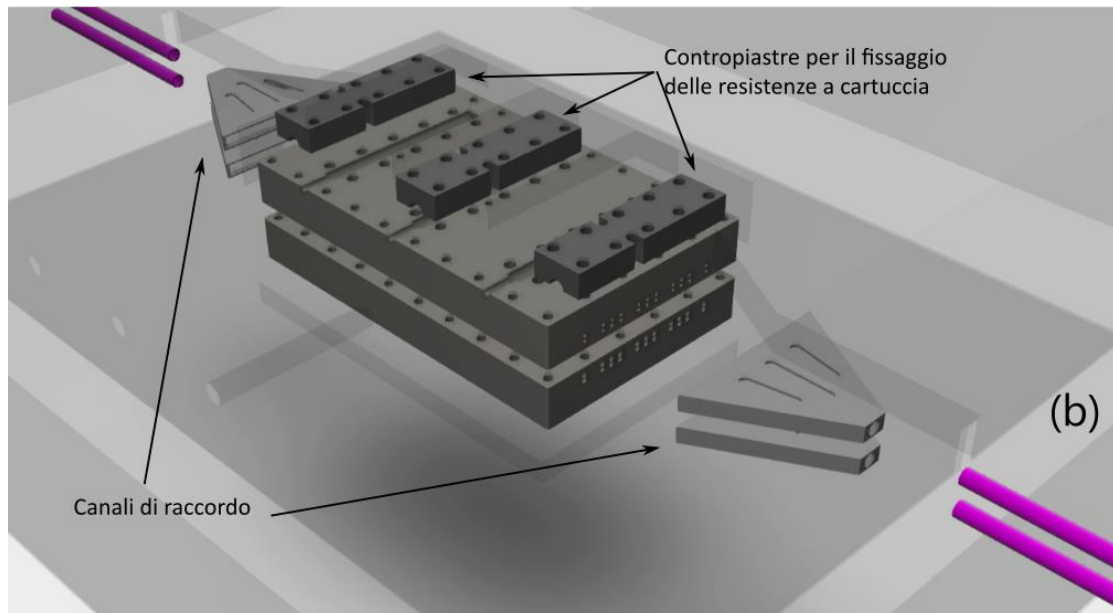
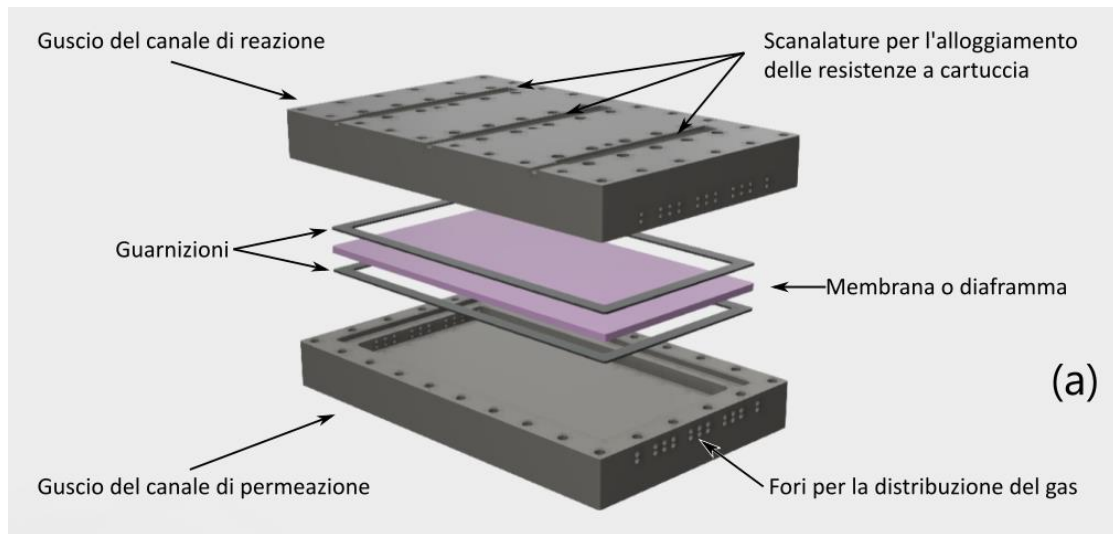


Figura 2 Rendering della sezione di prova: (a) Accoppiamento dei due semigusci con la membrana (vista esplosa); (b) Elementi esterni ai canali (vista esplosa); (c) l'intera sezione di prova alloggiata all'interno del sistema di isolamento termico.

2.2 Modalità e condizioni operative

La sezione di prova è concepita per essere una piattaforma flessibile per la validazione della tecnologia del reforming a membrana del biogas su scala di laboratorio. Pertanto, oltre ad essere configurata per riprodurre il modulo base di un reattore planare in piena scala (anche se l'interfaccia con il sistema di riscaldamento tramite fluido termovettore è simulato mediante resistenze elettriche), la sezione di prova può essere esercitata con diverse modalità operative che consentono di focalizzare lo studio sperimentale in modo individuale su uno dei componenti chiave del sistema. Nello specifico, sono previste 3 modalità di funzionamento:

- *Sola reazione*: la piastra che separa i due canali è costituita da un diaframma di acciaio impermeabile ai componenti delle miscele gas e la zona di permeazione non è utilizzata. Questa modalità operativa viene utilizzata per analizzare sperimentalmente la performance dell'elemento catalitico.
- *Sola permeazione*: la piastra che separa i due canali è costituita da una membrana permeabile in modo selettivo all'idrogeno. Al canale di permeazione viene alimentato un gas di sweep (nell'impianto sperimentale in oggetto è previsto l'uso di azoto). Nello spazio di reazione viene alloggiata una schiuma solida monolitica a cui non è stato applicato il washcoat catalitico, in modo da riprodurre le condizioni termofluidodinamiche determinate dal carrier del catalizzatore, senza far avvenire la reazione. Questa modalità operativa viene utilizzata per analizzare sperimentalmente la performance della membrana.
- *Reazione-permeazione*: vengono installati nel reattore sia la membrana che la schiuma catalitica ed entrambi i canali vengono utilizzati. Questa modalità operativa è quella corrispondente al reattore reale.

In Tabella 1 si riportano le principali condizioni operative a cui sarà sottoposta la sezione di prova durante la campagna sperimentale:

Tabella 1 Condizioni operative della sezione di prova

Descrizione	Unità	Valore
Temperatura del gas in ingresso al canale di alimentazione	°C	450-560
Temperatura della parete riscaldata	°C	450-560
Pressione assoluta massima nel canale di reazione	bar	11
Pressione assoluta nel canale di permeazione	bar	1
Portata di metano alimentata	NmL/min	300-600
Rapporto CO ₂ /CH ₄ (mol/mol) nell'alimentazione	-	1
Rapporto H ₂ O/ CH ₄ (mol/mol) nell'alimentazione	-	2,5 – 3

La composizione indicativa del gas e la temperatura nella zona di reazione lungo la direzione di moto del gas sono riportate in Figura 3 e Figura 4.

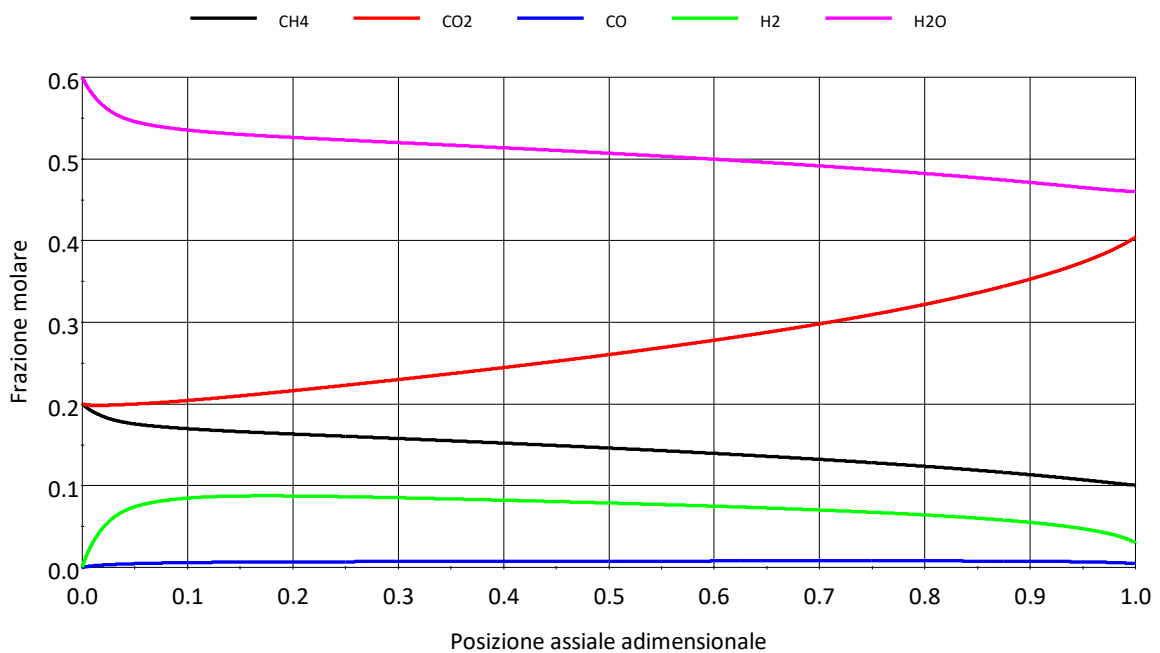


Figura 3: Profili di composizione all'interno del canale di reazione previsti per le prove con temperatura di parete pari a 500 °C, portata di metano alimentata di 300 NmL/min e pressione operative di 9 bara nella zona di reazione.

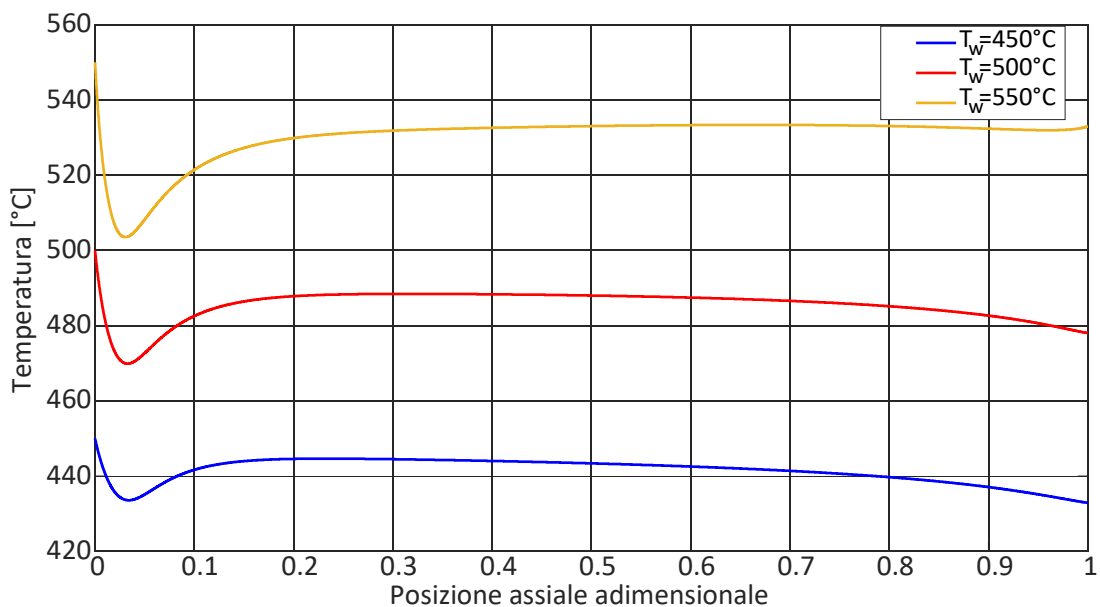


Figura 4 Profili di temperatura previsti per le prove condotte alla pressione di 9 bara nella zona di reazione, 300 NmL/min di portata alimentata di metano e diverse temperature di parete.

2.3 Materiali

Tutti i componenti strutturali della sezione di prova, inclusi viti e bulloni, saranno realizzati in acciaio AISI 316L.

Le guarnizioni che assicurano la tenuta tra i due canali saranno realizzate in rame.

2.4 Sistema di riscaldamento

La sezione di prova sarà dotata di un sistema di riscaldamento necessario per portare il reattore alla temperatura di esercizio e fornire il calore di reazione durante l'esecuzione delle prove sperimentali.

Il sistema di riscaldamento consisterà in 3 resistenze a cartuccia (diametro 12,5mm; lunghezza 130 mm; 220 V; 800 W; 24 W/cm²; temperatura massima almeno 750°C) alloggiare in prossimità del canale di reazione in apposite scanalature. Per ognuna delle resistenze, una termocoppia collocata in prossimità della resistenza stessa (tipo K, diametro 3 mm, lunghezza 500 mm) ed un termoregolatore con 1 ingresso (termocoppia K) e 3 uscite (SSR, relè allarme, 485) permetteranno il controllo indipendente della temperatura di ognuna delle resistenze e l'interfacciamento del sistema di riscaldamento con quello di acquisizione e controllo dell'intero impianto.

L'intero sistema di riscaldamento è quindi finalizzato al controllo indipendente della temperatura della parete in prossimità del canale di reazione in 3 zone diverse lungo la dimensione maggiore del canale stesso, permettendo sia di lavorare mantenendo la temperatura uniforme su tutta la parete, sia di riprodurre un profilo assiale di temperatura che simuli le condizioni in cui il calore di reazione è fornito da un fluido termovettore che scorre in un canale adiacente a quello di reazione.

3 Disegni costruttivi del reattore

Nelle pagine seguenti si riportano alcune tavole estratte dai file CAD del progetto del reattore dove sono rappresentate le viste principali dei componenti del reattore e alcune misure di riferimento.

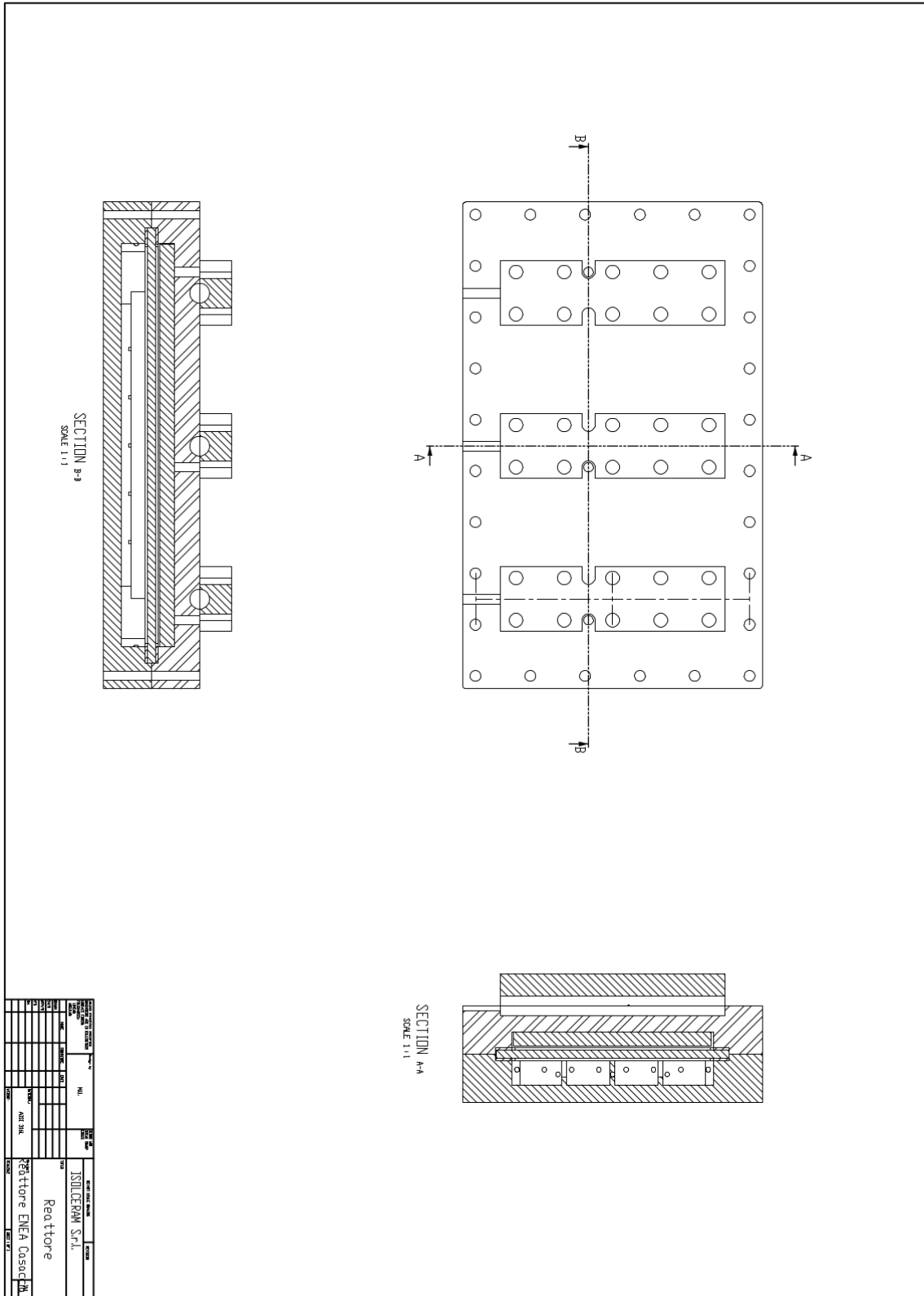


Figura 5 Sezioni longitudinali e trasversali del reattore.

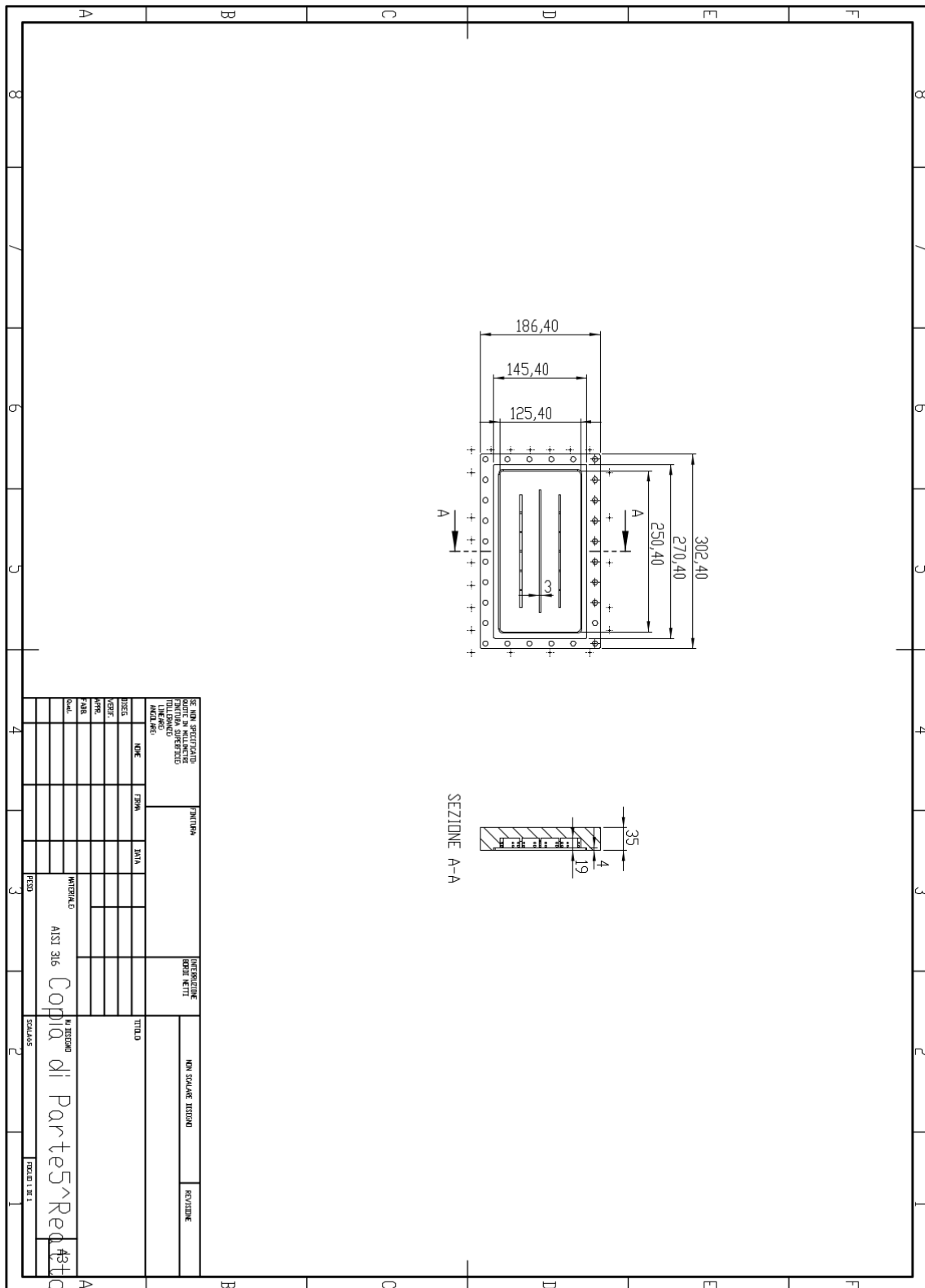


Figura 7 Guscio del canale di permeazione.

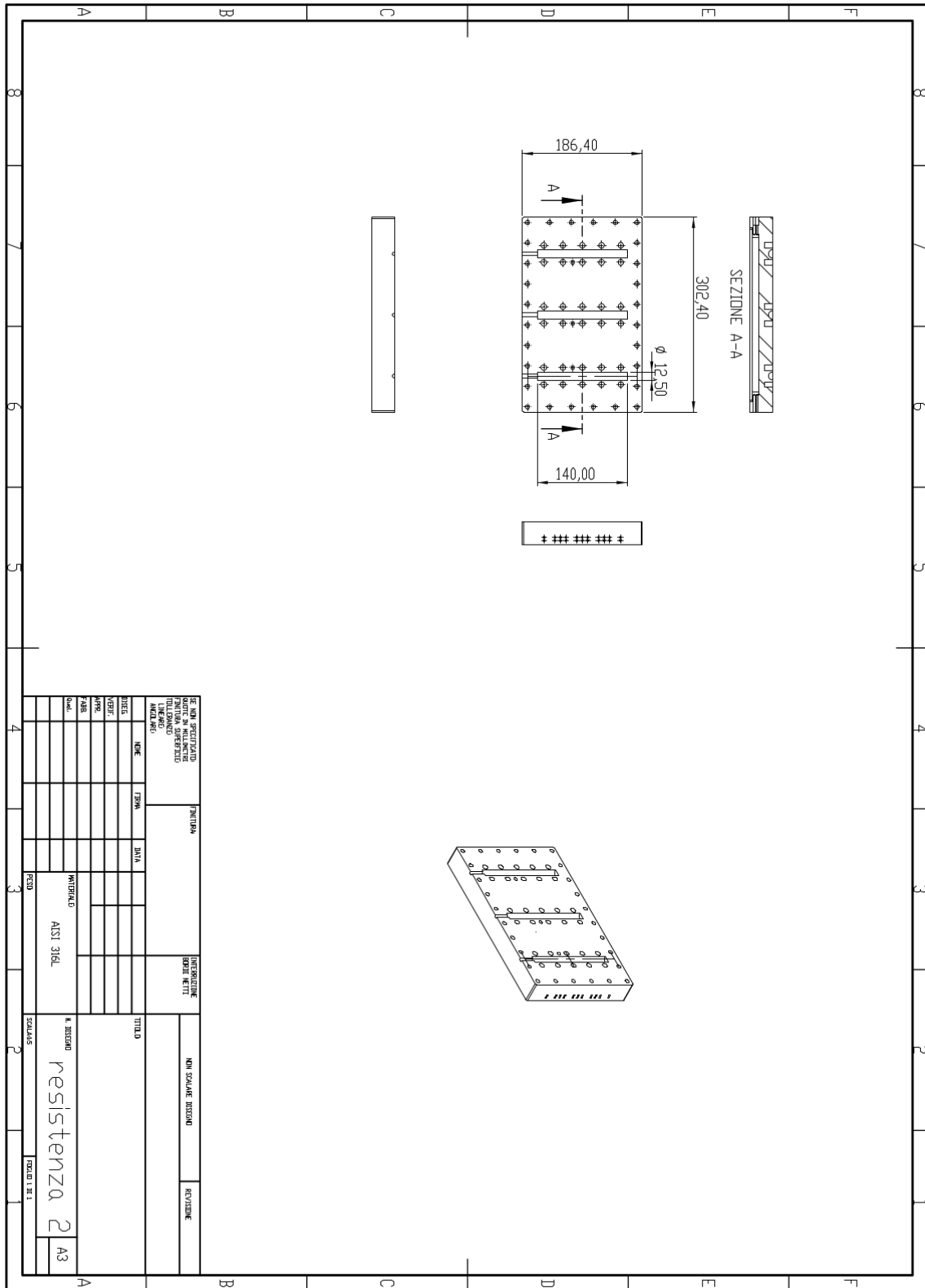


Figura 8 Guscio del canale di reazione (vista esterna con gli alloggiamenti per le resistenze a cartuccia).

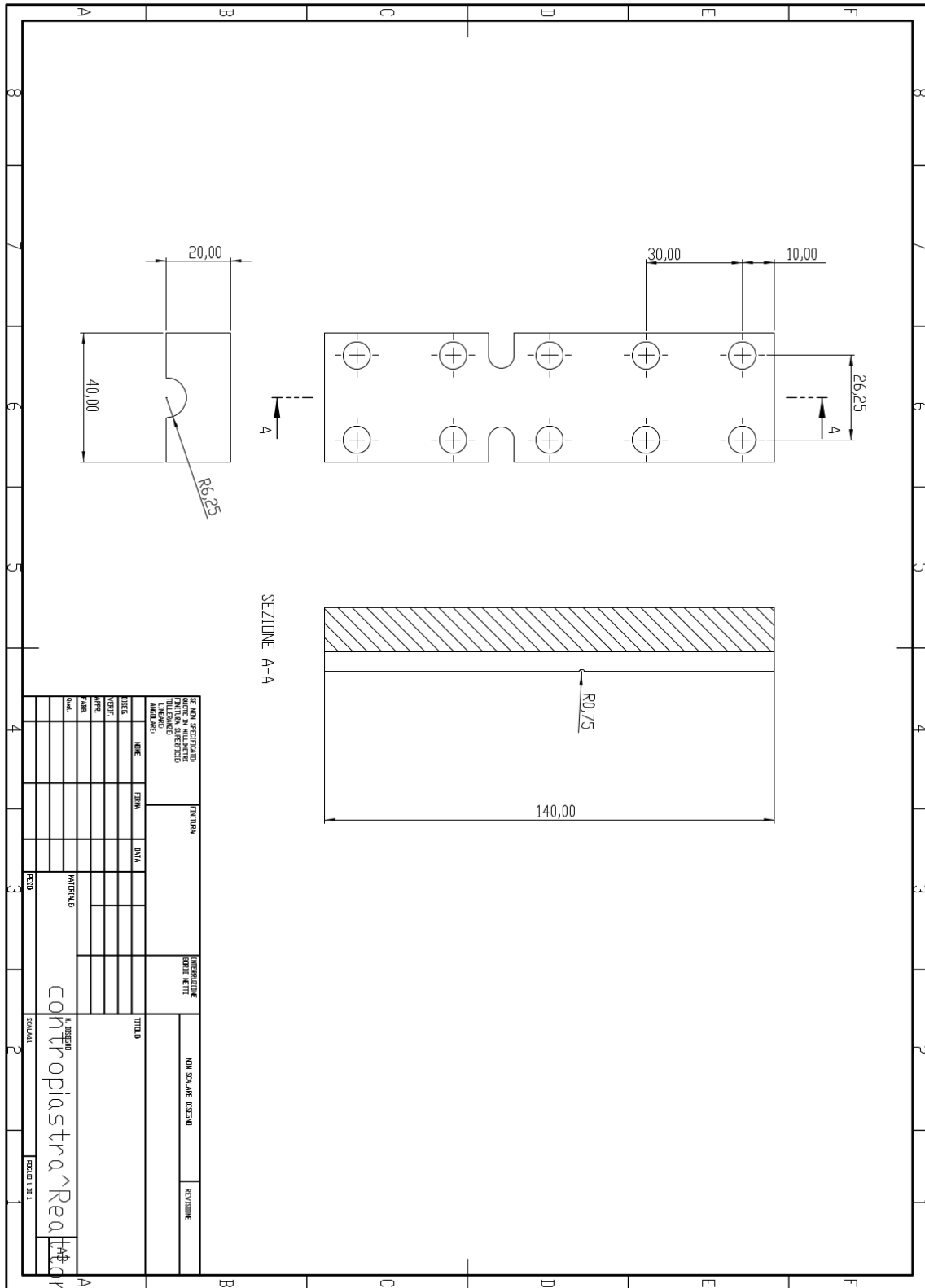


Figura 9 Contropiastre per il fissaggio delle resistenze per il riscaldamento del reattore.

