Progettazione e modellazione di un ciclo supercritico a circuito chiuso per l'Impianto VLF

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

SCUOLA POLITECNICA

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica, Gestionale e dei Trasporti

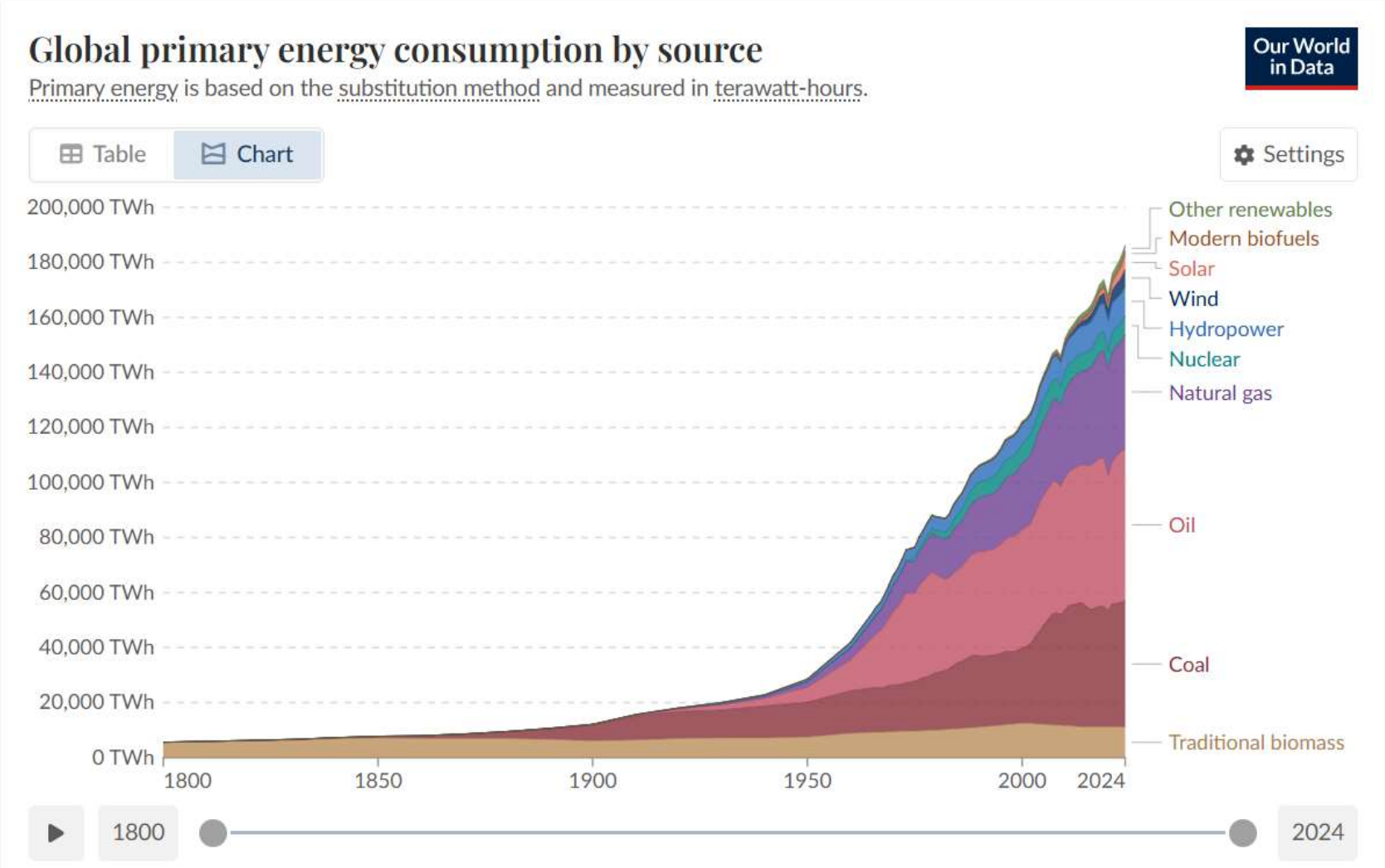
Relatori:
Prof. Ing. Guglielmo Lomonaco
Ing. Marco Caramello

Candidato:
Andrea Ortona

Studio condotto

- Studio dell'Impianto sperimentale Versatile Loop Facility, atto a testare i componenti del Reactor Coolant System del Westinghouse Electric Company Lead Fast Reactor (WEC-LFR)
- Analisi di letteratura delle caratteristiche dell'acqua supercritica
- Optioneering di differenti design
- Studio termoidraulico
- Analisi incidentale

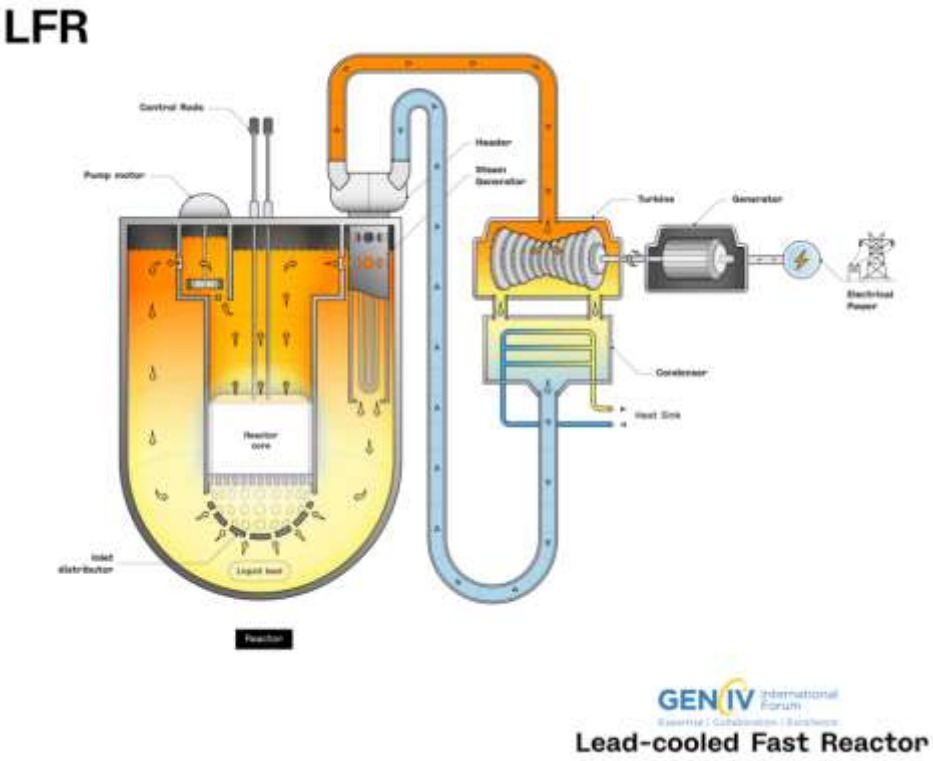
Contesto energetico



Quarta generazione e LFR

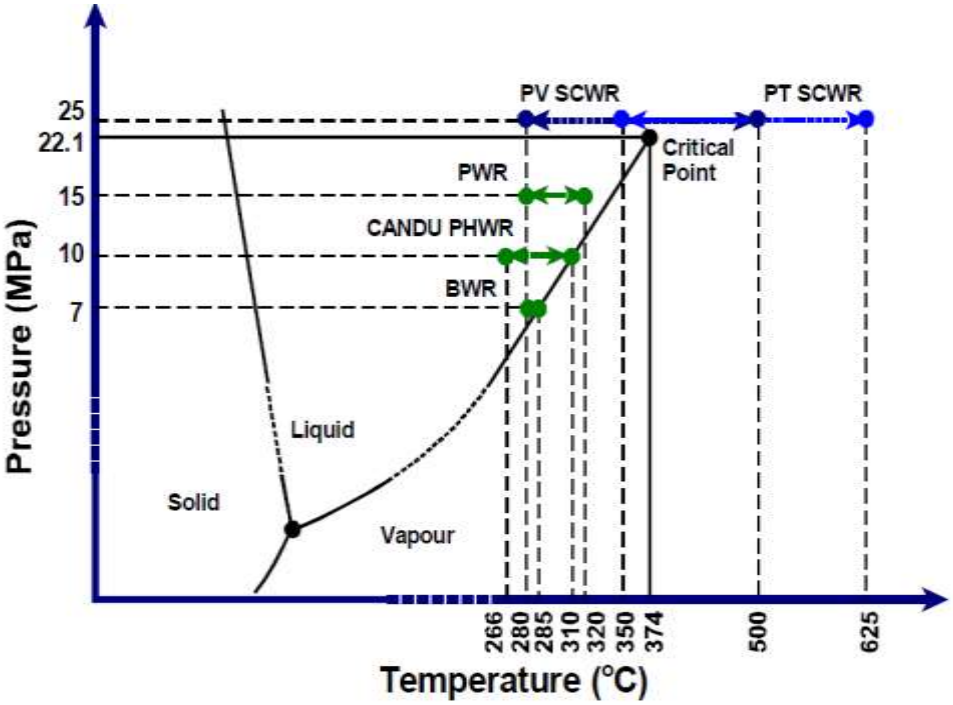
- I reattori nucleari di quarta generazione hanno l'obiettivo di:
  - migliorare la sicurezza
  - ottimizzare il rendimento
  - aumentare la sostenibilità rispetto alle generazioni precedenti
  - riutilizzare il combustibile esaurito

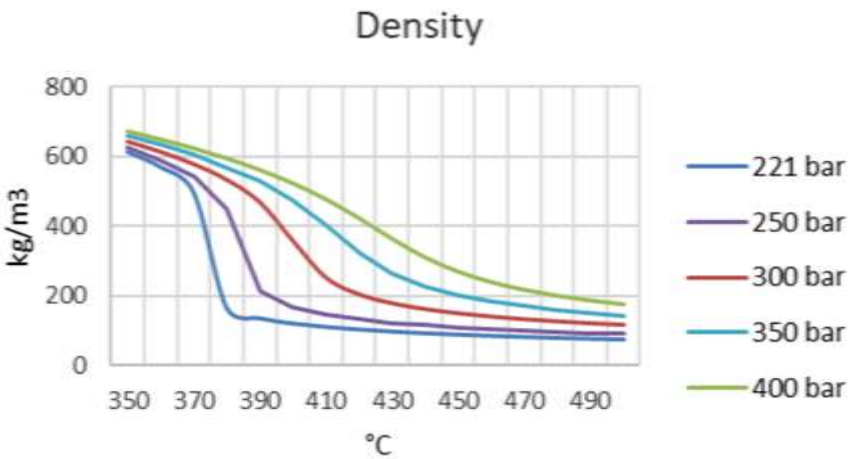
- Il Lead Fast Reactor presenta diverse peculiarità:
  - raffreddato a piombo liquido, funziona ad alte temperature
  - utilizza uno spettro di neutroni veloci per sostenere la reazione di fissione
  - maggior burnup del fuel
  - possibilità di chiusura del ciclo

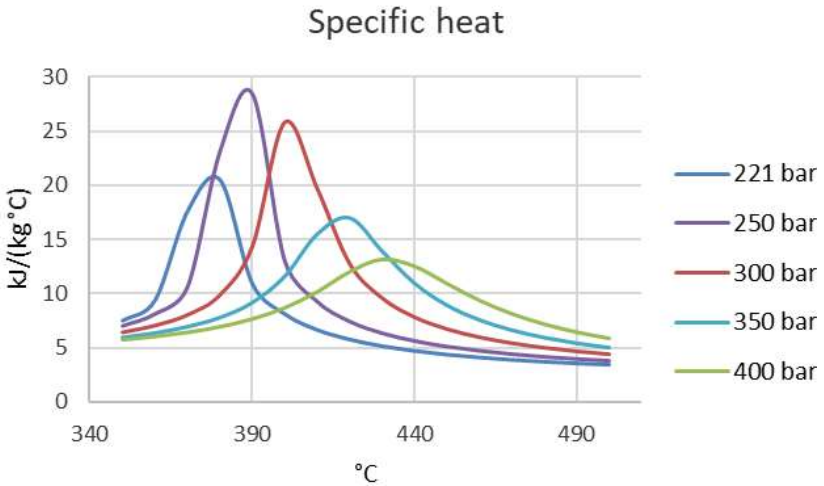


Acqua supercritica

- Sistema operante oltre il punto critico di 221 bar e 374 °C
- Non c'è una distinzione netta tra fase liquida e fase gassosa
- L'alta temperatura permette rendimenti termodinamici più alti



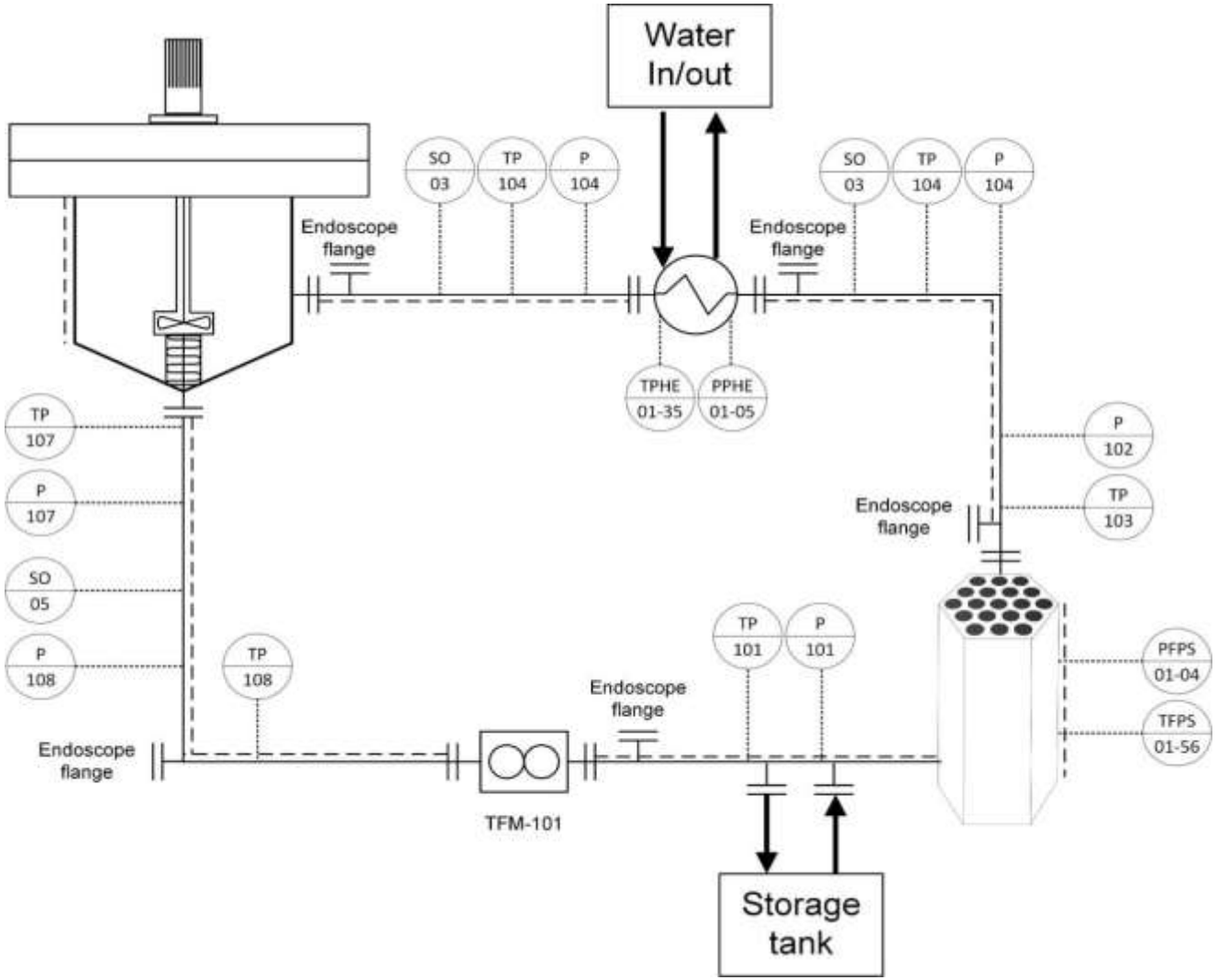




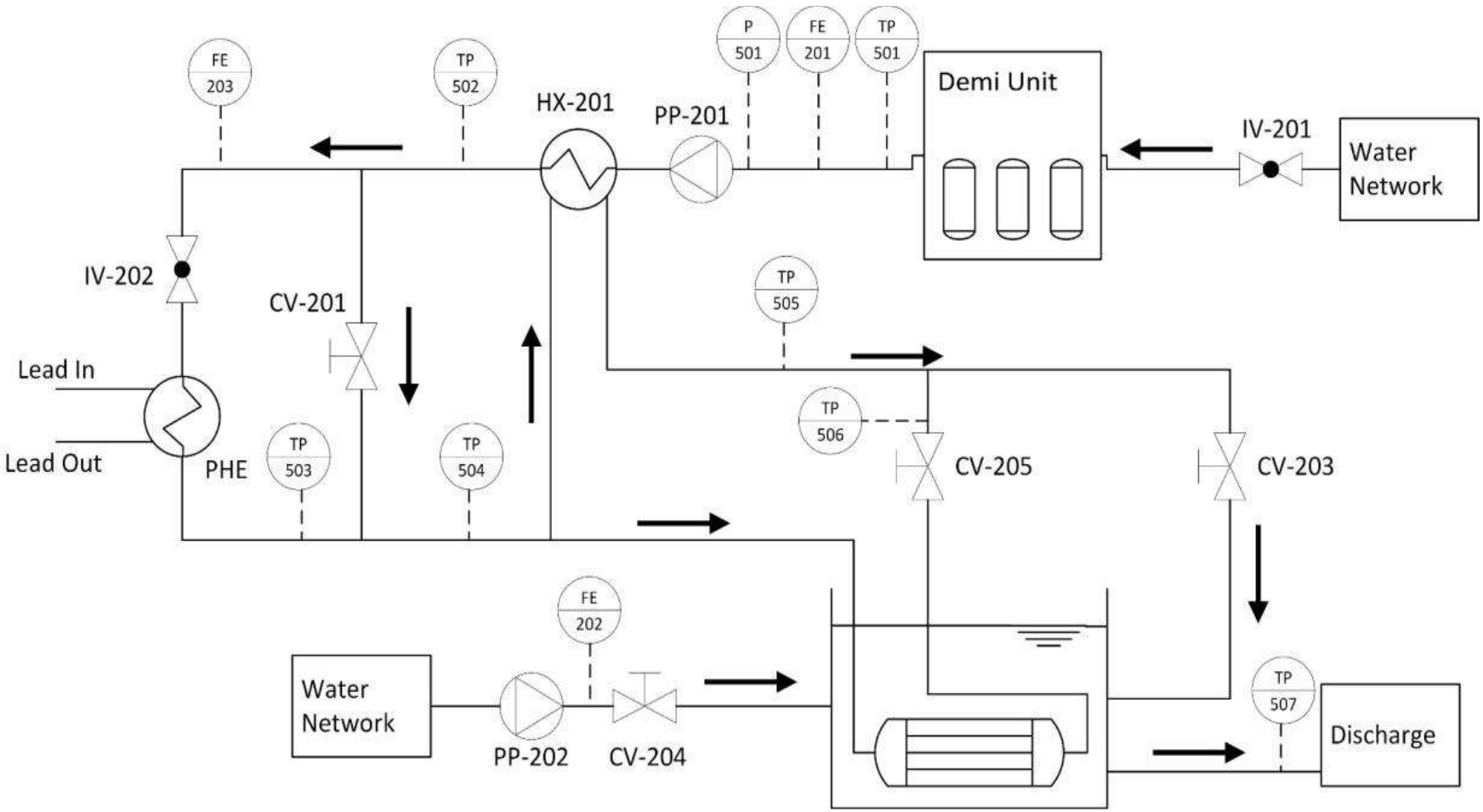
Correlazioni per acqua supercritica

- $Nu_b = 0.023 Re_b^{0.8} Pr_b^{0.4}$
- $Nu_{t,x} = C_1 Re_{t,x}^{m_1} Pr_{t,x}^{m_2} \left(\frac{\rho_t}{\rho_t}\right)_x^{m_3} \left(\frac{\mu_t}{\mu_t}\right)_x^{m_4} \left(\frac{\lambda_t}{\lambda_t}\right)_x^{m_5} \left(1 + C_2 \frac{D_{hy}}{L_h}\right)^{m_7}$
- $Nu_b = 0.023\, Re_b^{0.8}\, Pr_b^{0.4} \left(\frac{\rho_w}{\rho_b}\right)^{0.3} \left(\frac{c_p}{c_{p_b}}\right)^{n_2}$

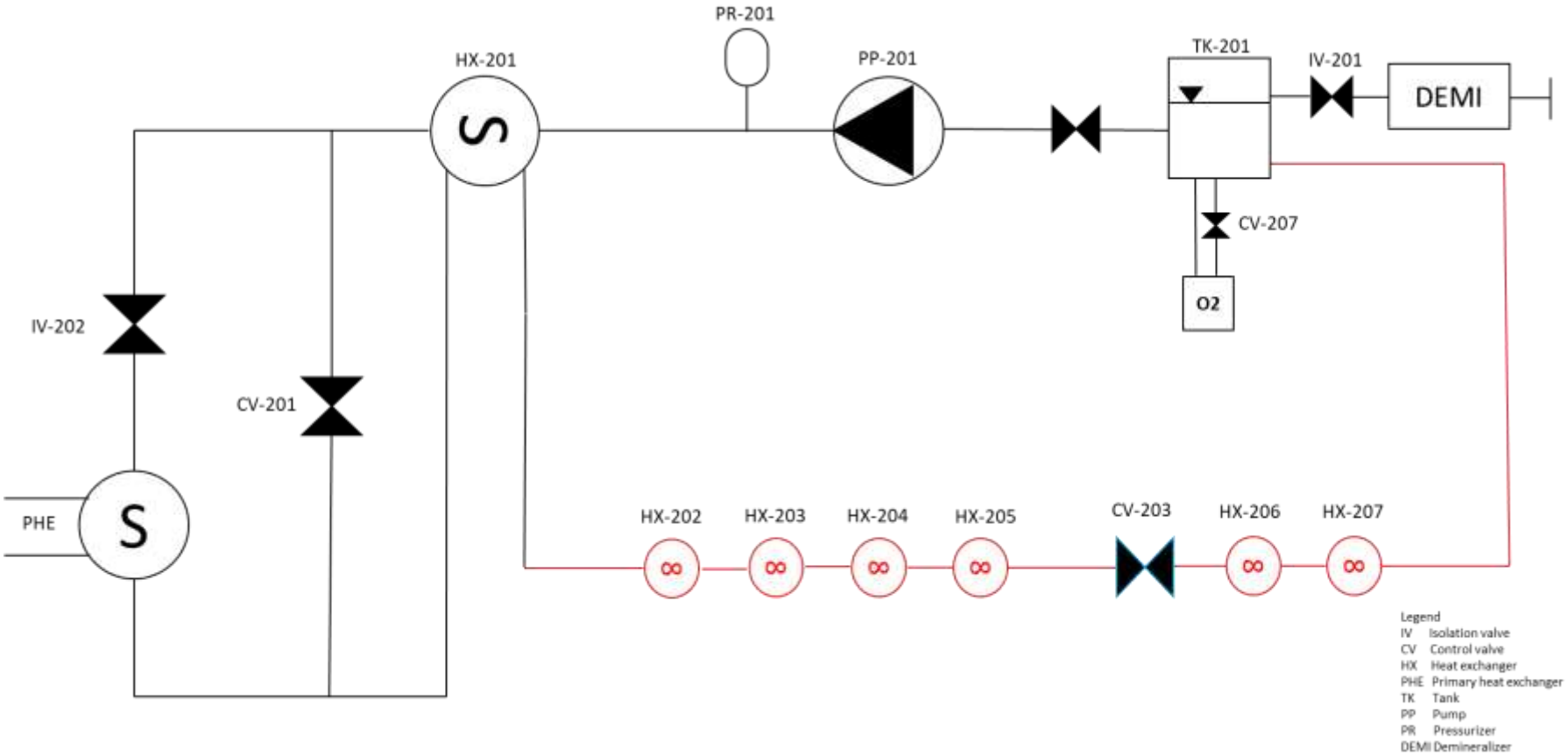
Primary loop



Secondary loop



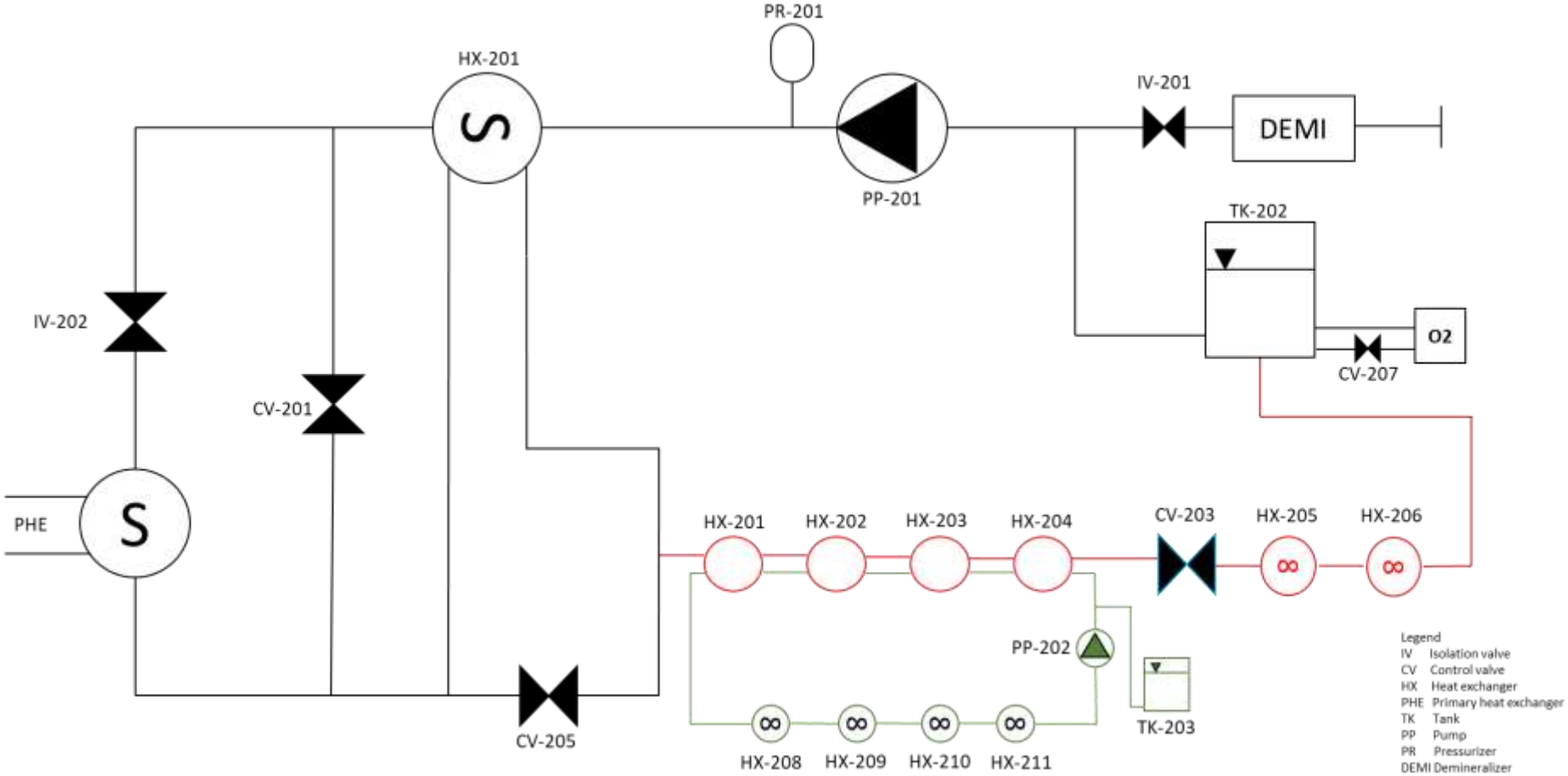
Design 1



Pro
- Eliminazione ingombro tank (2,3 x 1,15 x 1,77 m)

Contro
- Numerosi ventilatori
- Perdita bypass HX-201
- Flessibilità

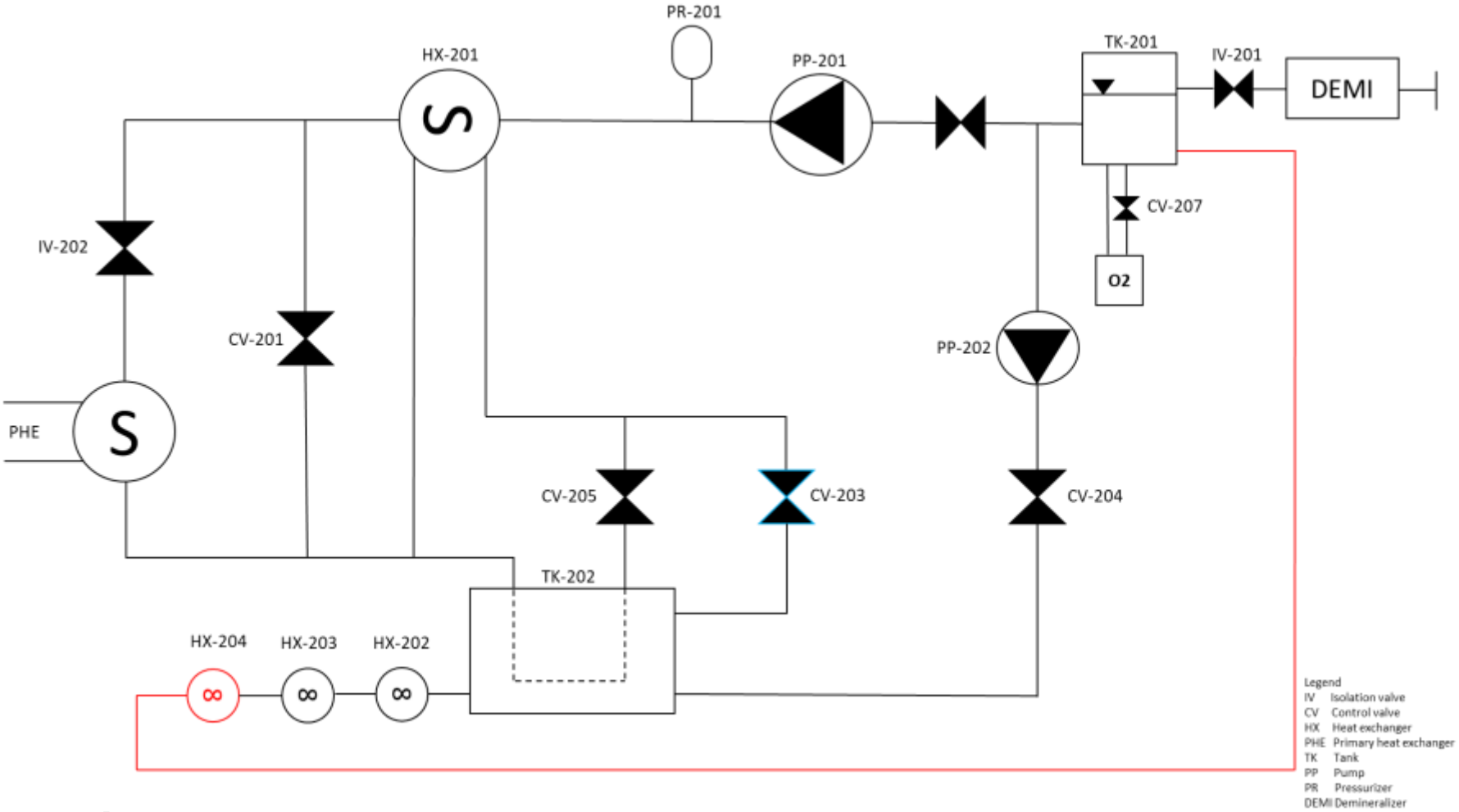
Design 2



Pro
- Stessa flessibilità del design originale

Contro
- 4 scambiatori ad olio
- 4 ventilatori

Design 3



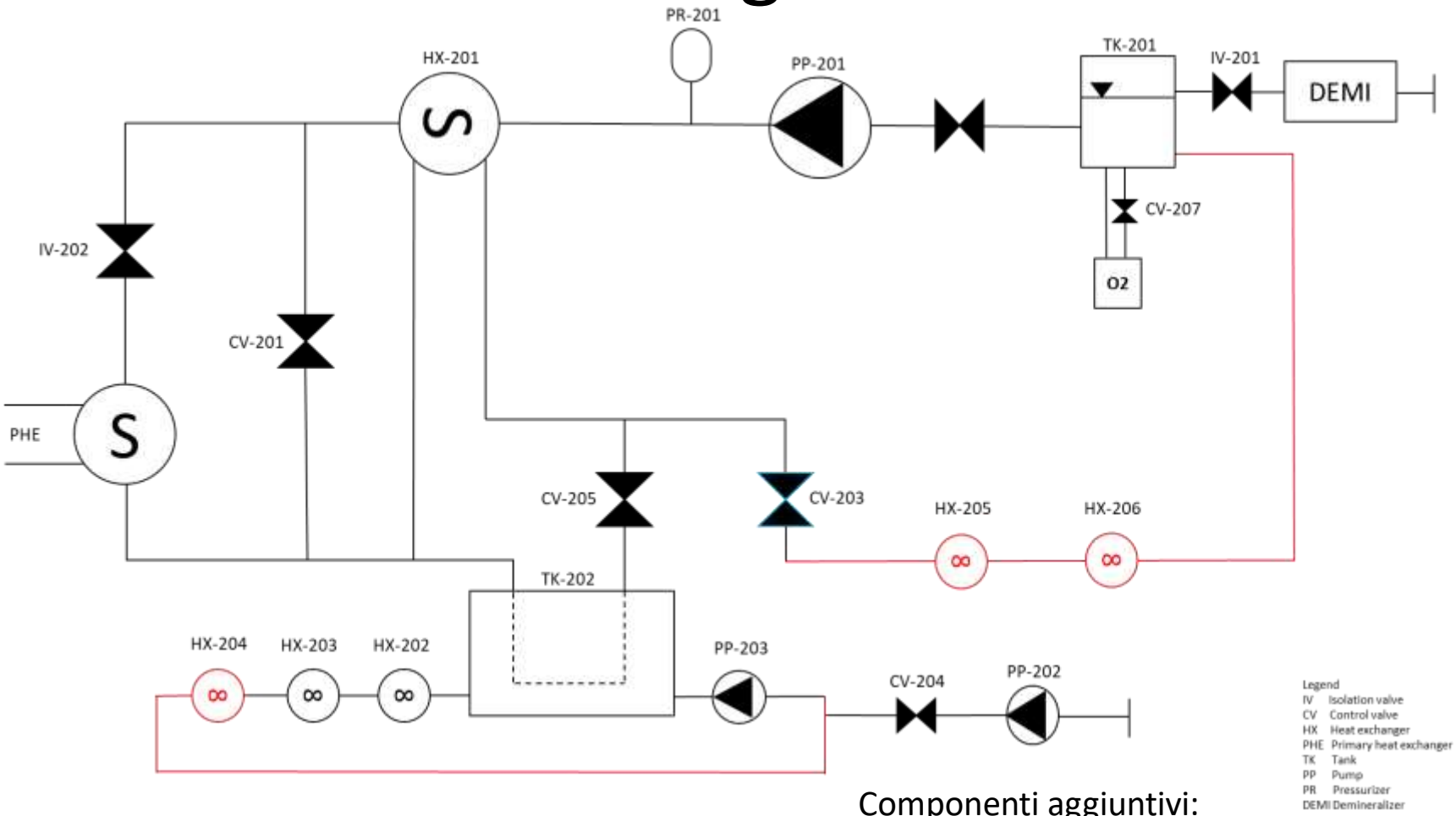
Pro

- Uguale al design originale

Contro

- Necessità di pressurizzare il tank

Design 4



Pro

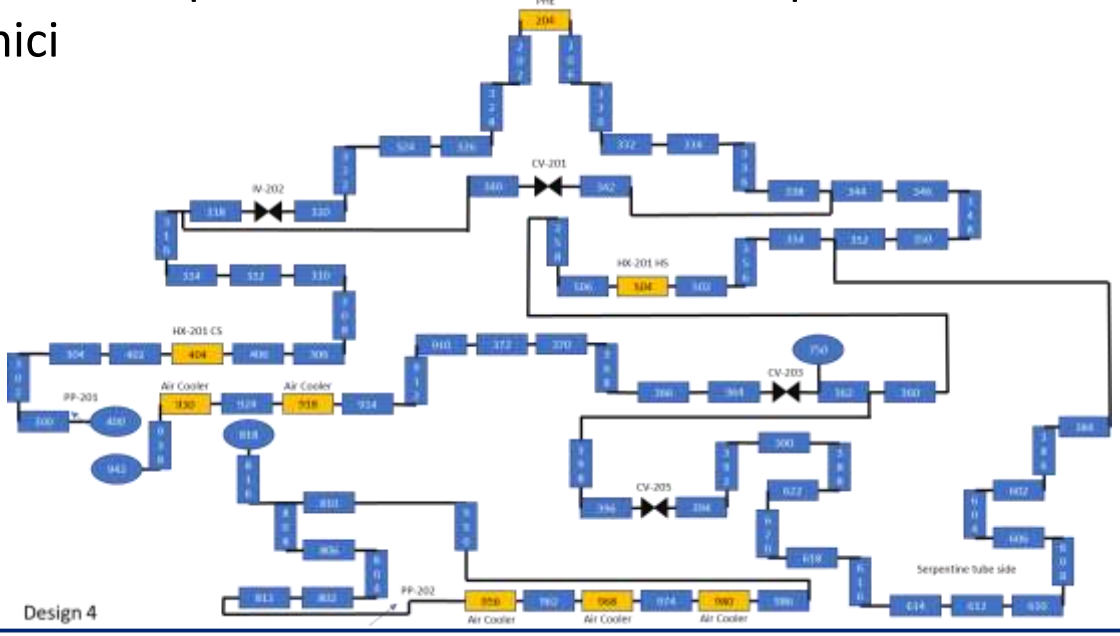
- Similitudine col design originale
- Separazione due anelli ad acqua

Componenti aggiuntivi:

- 1 air-cooler da 300 m^2
- 2 air-cooler da 39 m^2
- Vaso di espansione da 0,77 m^3
- Sistema controllo chimica

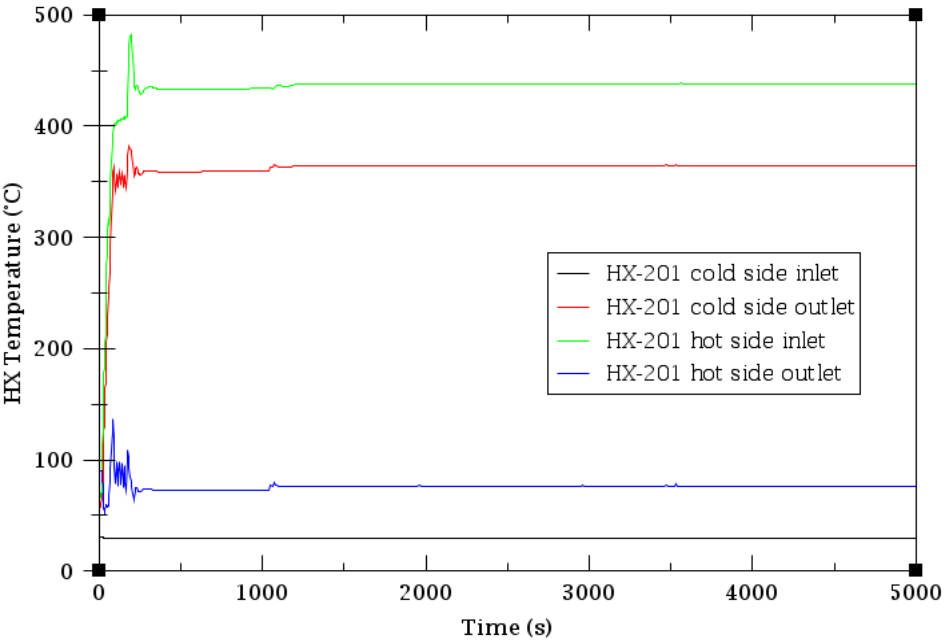
RELAP5

- Il codice informatico RELAP5 (Reactor Excursion and Leak Analysis Program) è un codice di analisi di transitori per reattori ad acqua come base per l'analisi di impianti nucleari
- La sua semplicità permette di simulare impianti di grande taglia con relative basse potenze di calcolo e ottenere risultati in meno tempo rispetto ad analisi CFD
- RELAP5 è un codice di sistema a parametri concentrati che calcola il comportamento del sistema di raffreddamento di un reattore durante un transitorio e può essere utilizzato per la simulazione di un'ampia varietà di fenomeni transitori idraulici e termici



Risultati Simulazione Stazionario

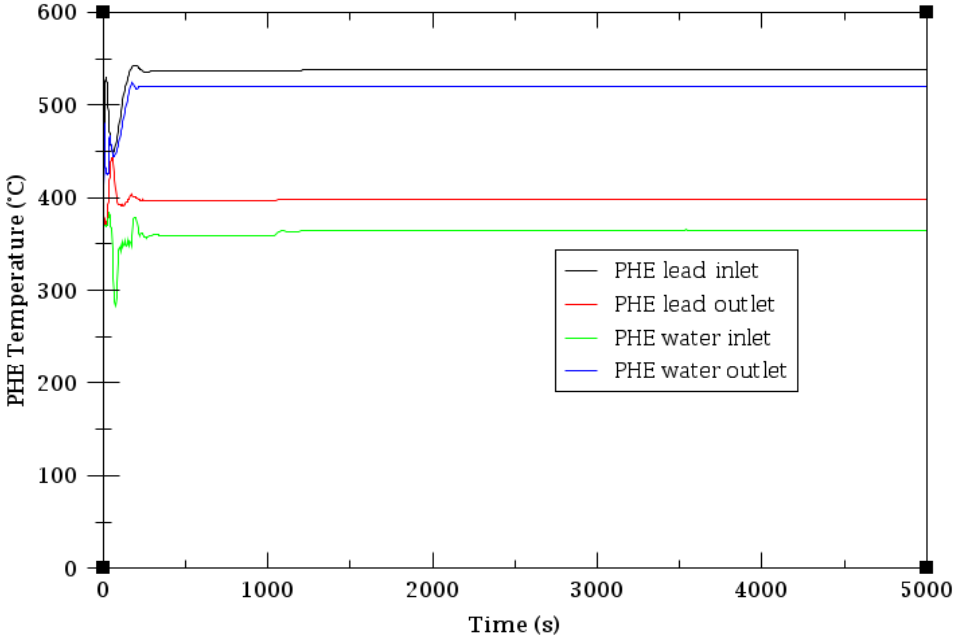
Temperature HX-201



364 °C ← 30 °C

438 °C → 76 °C

Temperature PHE

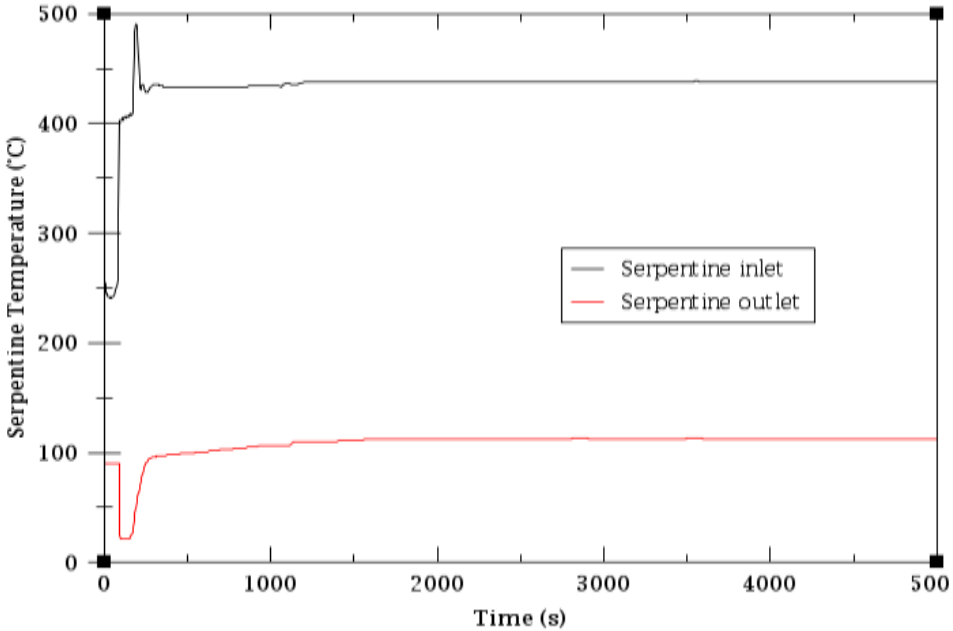


520 °C ← 364 °C

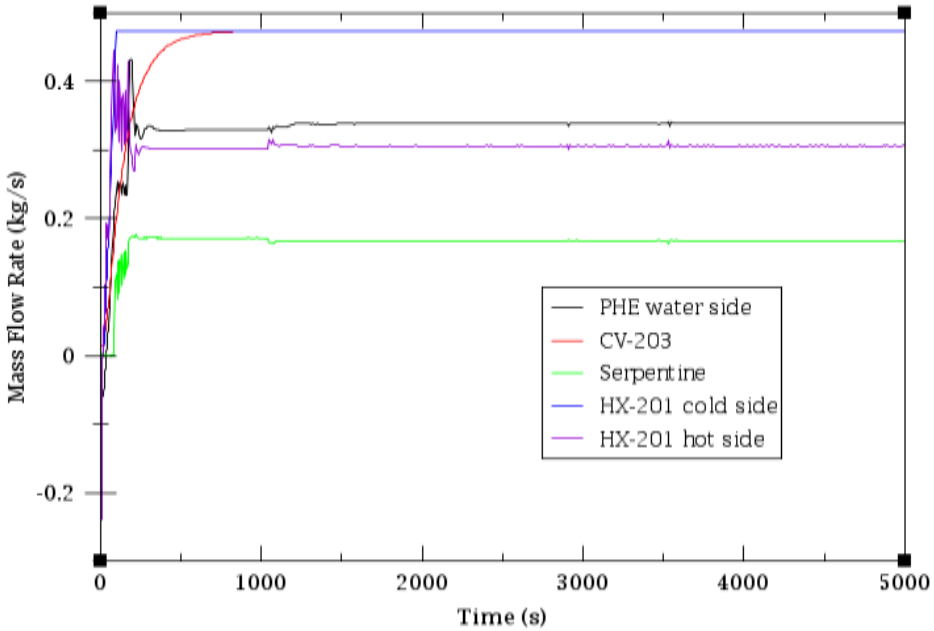
538 °C → 398 °C

Risultati Simulazione Stazionario

Temperature serpentina



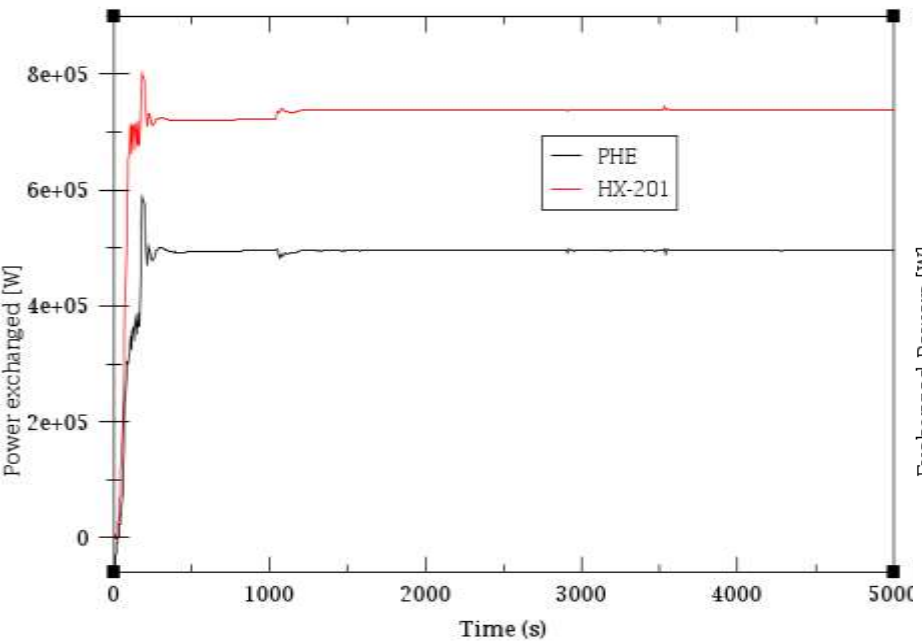
Portate negli scambiatori



438 °C → 112 °C

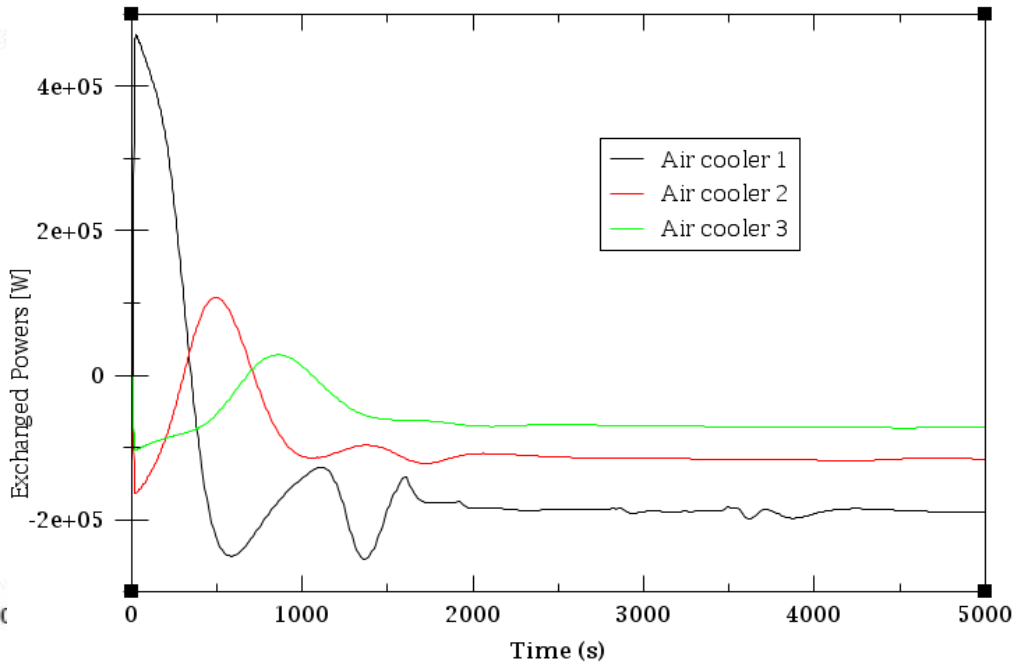
Risultati Simulazione Stazionario

Potenze degli scambiatori



PHE: 495 kW
HX-201: 738 kW

Potenze degli air-cooler



Air Cooler 1: 189,3 kW
Air Cooler 2: 116,0 kW
Air Cooler 3: 71,4 kW

Differenze tra circuito aperto e chiuso

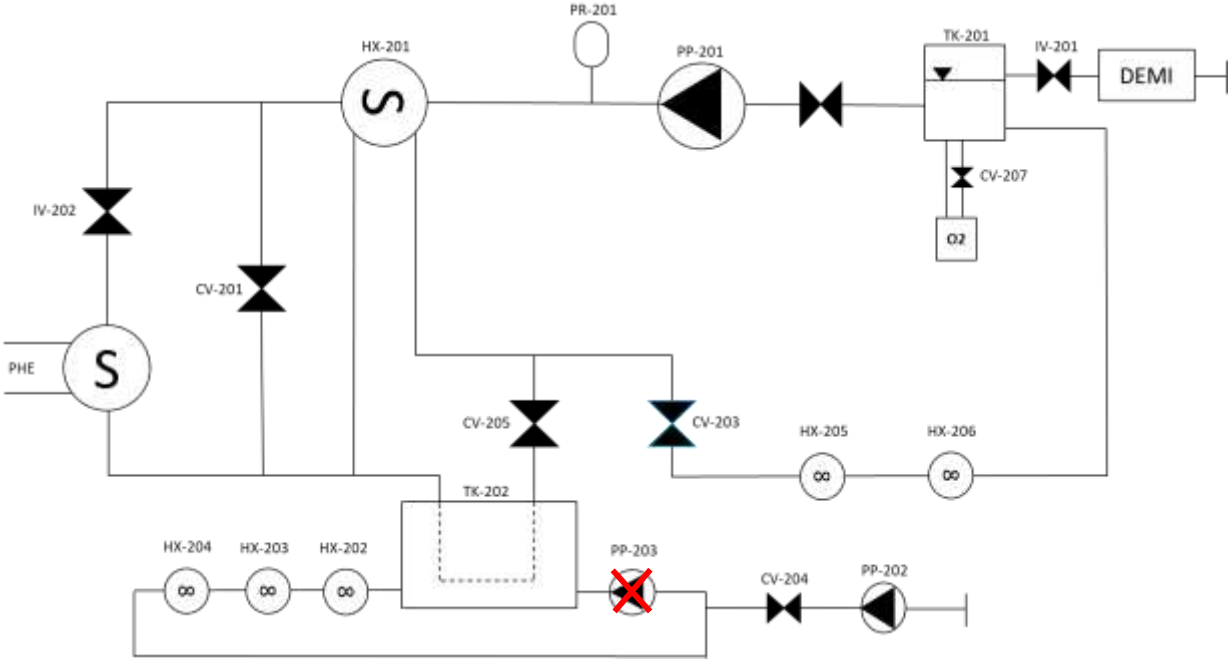
Parameter	Unit	Open cycle	Closed cycle	% Difference
HX-201 cold side inlet temperature	°C	20	30	50
HX-201 cold side outlet temperature	°C	350	364	4,0
HX-201 hot side inlet temperature	°C	430	438	1,86
HX-201 hot side outlet temperature	°C	90	76	-15,6
PHE lead side inlet temperature	°C	530	538	1,51
PHE lead side outlet temperature	°C	390	398	2,05
PHE water side inlet temperature	°C	350	364	4,0
PHE water side outlet temperature	°C	520	520	/
Serpentine inlet temperature	°C	430	438	1,86
Serpentine outlet temperature	°C	90	112	24,4
Temperature before CV-203	°C	90	89	-1,11

Potenze e temperature di uscita scambiatori ad aria

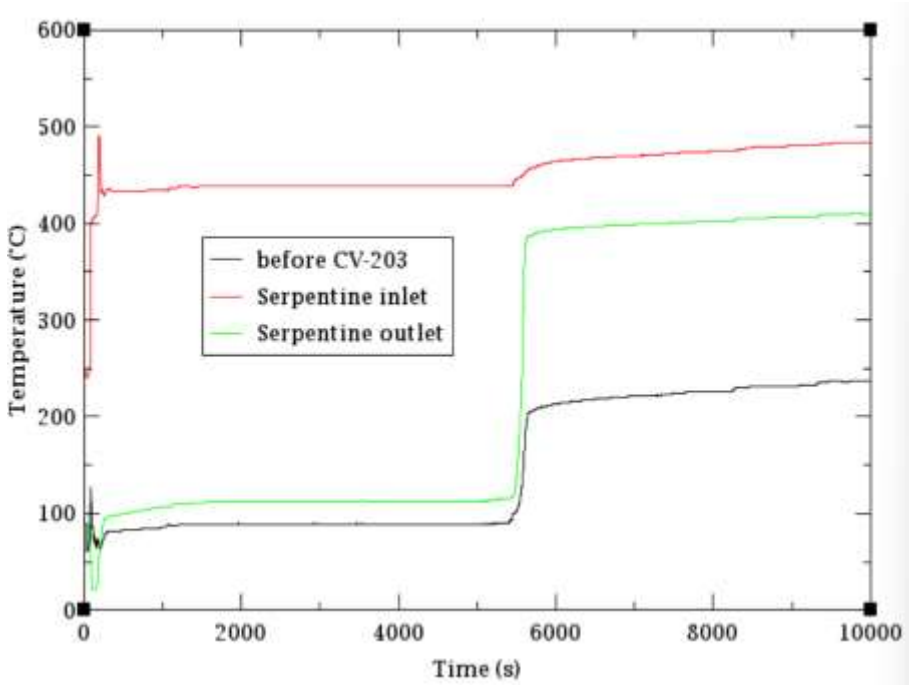
	Exit temperature [°C]	Exchanged Power [kW]
Air Cooler depressurized water 1	44	84,6
Air Cooler depressurized water 2	29	30,9
Air Cooler tank side 1	49	189,3
Air Cooler tank side 2	38	116,0
Air Cooler tank side 3	30	71,4

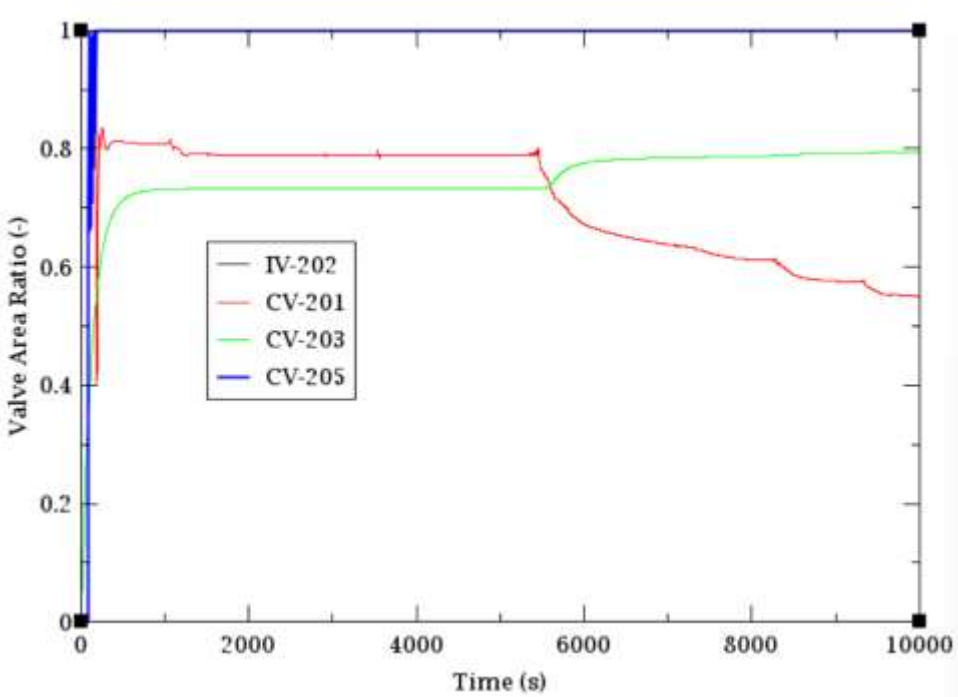
Analisi di transitorio

- Analisi condotta per studiare la risposta del sistema ad un caso incidentale: quanto tempo ho prima che la temperatura del fluido alla valvola di depressurizzazione vada in condizione di saturazione?
- Caso analizzato: blocco della pompa di ricircolo del pozzo freddo
- Valvole mantenute libere di modulare



Analisi di transitorio

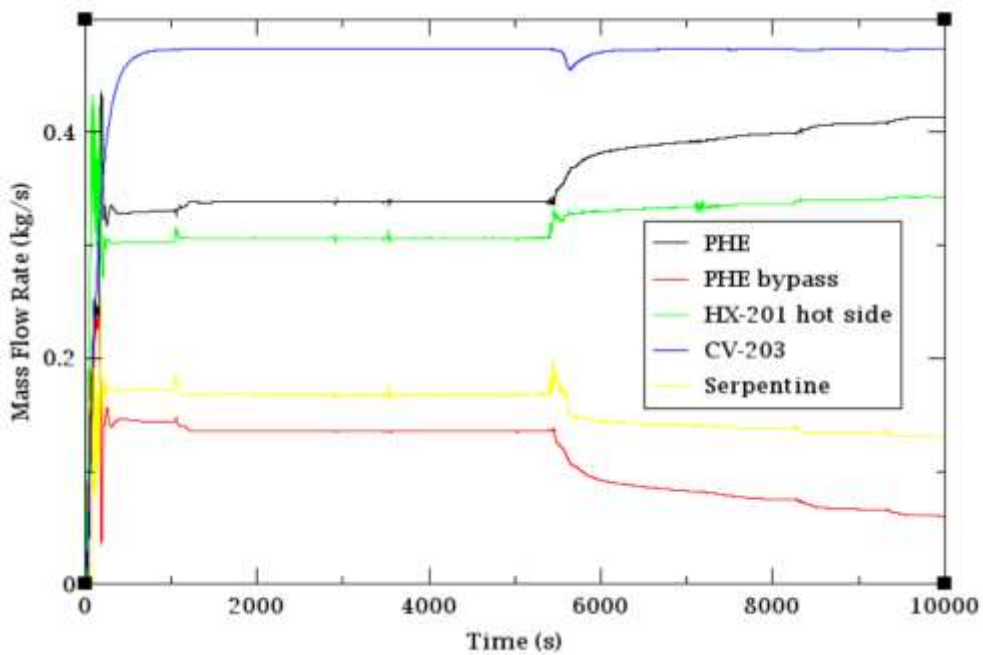




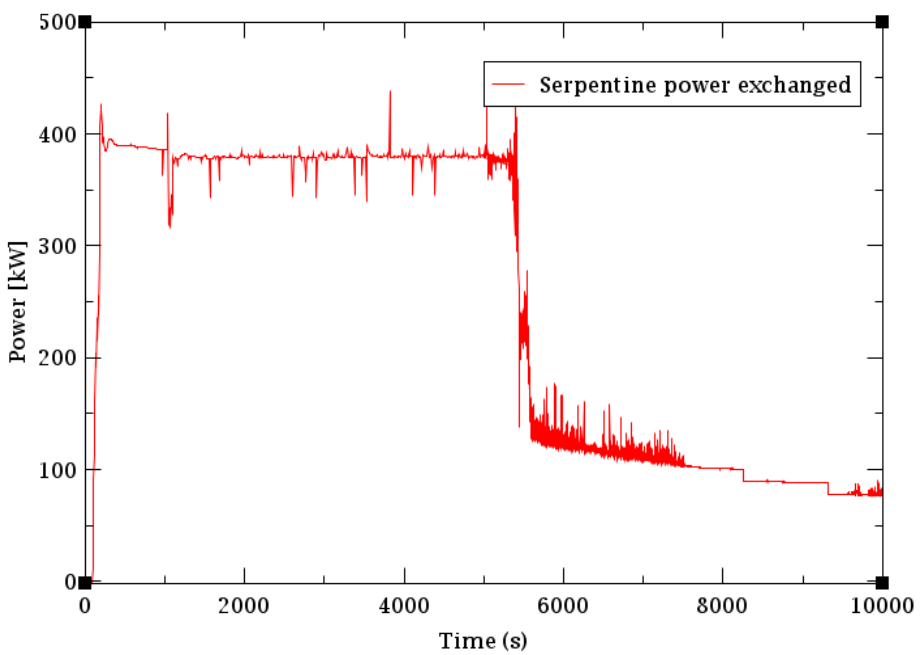
	Prima	Dopo
CV-203	89 °C	236 °C
Uscita serpentina	112°C	410 °C

CV-201 modula in chiusura
CV-203 modula in apertura

Analisi di transitorio

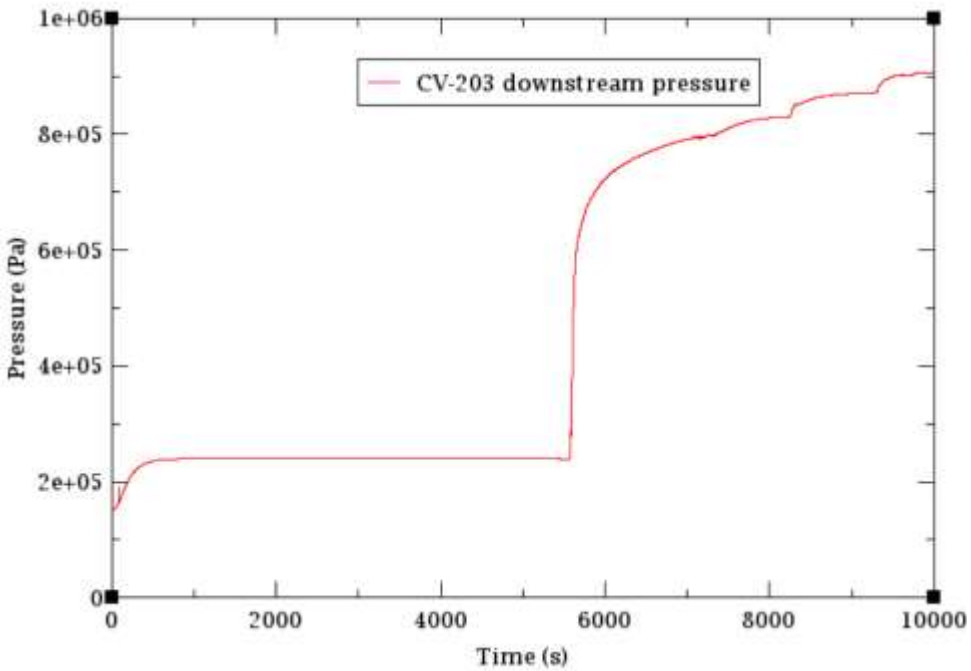


Flusso deviato nel PHE
e nel HX-201

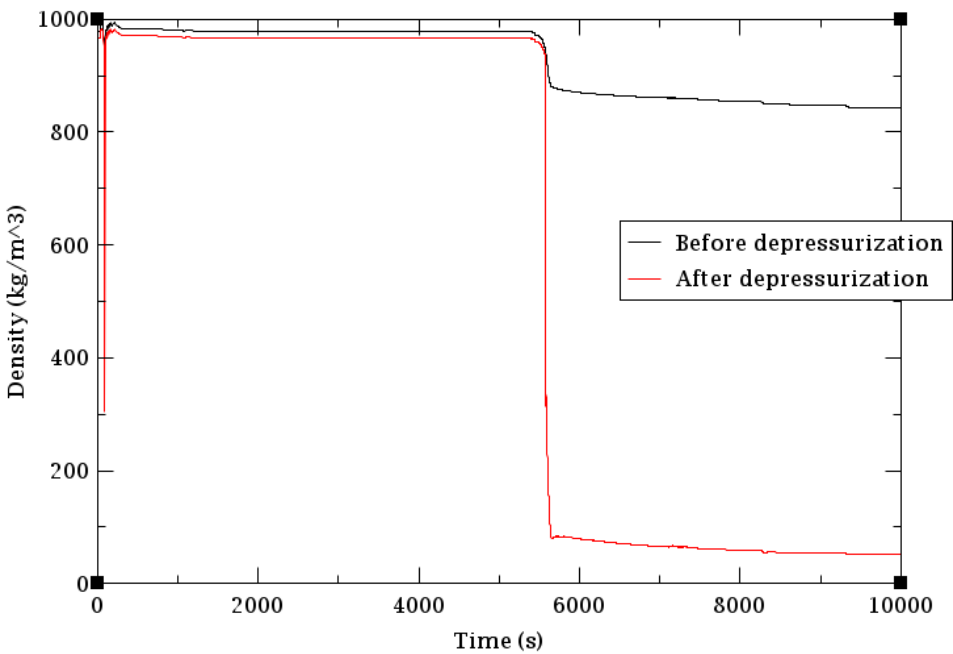


Calo potenza scambiata dalla
serpentina

Analisi di transitorio

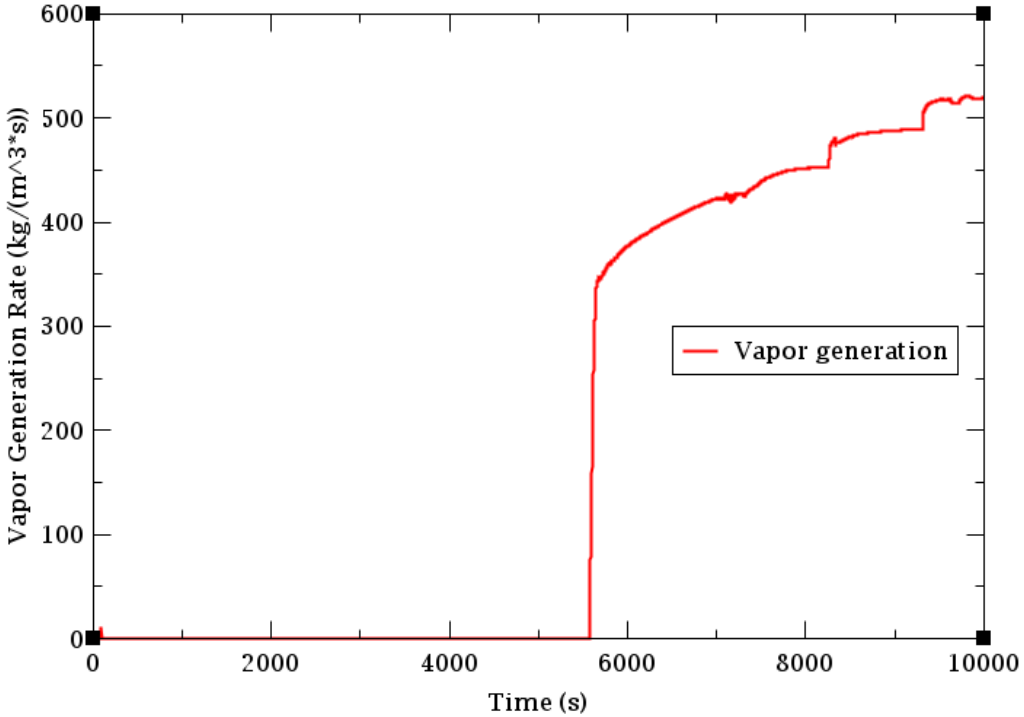


CV-203 modula la depressurizzazione per tentare di mantenere acqua liquida



Densità prima e dopo la valvola depressurizzatrice

Analisi di transitorio



Dopo 9 minuti e 31 secondi ho inizio di produzione di vapore

Conclusioni

- L'impianto sperimentale analizzato può essere chiuso apportando poche modifiche, implementando:
  - 3 air-cooler
  - un pressurizzatore
  - un sistema di controllo della chimica

- I cambiamenti permettono:
  - Risparmio di acqua
  - Indipendenza da rete idrica esterna

- L'analisi di stazionario mi conferma la funzionalità del ciclo chiuso, mentre l'analisi di transitorio conferma la stabilità di controllo e fornisce un tempo massimo di intervento in caso di perdita del pozzo freddo

Grazie per l'attenzione!

- Taglia WEC-LFR: 450 Mw_e

- Componenti:
  - Loop primario: AISI 321H
  - Loop secondario: Inconel e AISI 306