

Università degli Studi di Perugia

ESAME DI STATO PER L'ABILITAZIONE ALLA PROFESSIONE DI INGEGNERE
SEZIONE A
PRIMA SESSIONE 2025 (LUGLIO)

**Quarta prova scritta del 3 settembre 2025 – Settore Industriale
Classe LM-30 – Ingegneria Energetica e Nucleare**

TERNA n. 3

TEMA 1.

Impianto di condizionamento a tutt'aria senza ricircolo in clima temperato-caldo

Si dimensiona un impianto di condizionamento a tutt'aria nel quale, per le particolari richieste igienico-sanitarie del locale, non sia presente portata d'aria di ricircolo. Si considerino le seguenti condizioni termigrometriche di progetto dell'aria esterna:

Inverno: $T_{aria} = 4^{\circ}\text{C}$; RH = 70%

Estate: $T_{aria} = 35^{\circ}\text{C}$; RH = 50%

La sala ha una pianta rettangolare di dimensioni pari a 5 x 6 m ed altezza pari a 3 m e può contenere fino ad un massimo di 10 persone.

Si consideri una portata necessaria a garantire la purezza dell'aria interna di 10 m³/h per persona ed una umidità prodotta da ciascun occupante di 50 g/h in inverno e 70 g/h in estate.

Il carico termico esterno dell'ambiente da condizionare risulta essere pari a 12'500 W in inverno e 6'500 W in estate.

Nell'ipotesi che le singole persone sviluppino un carico di 130 W, che i macchinari presenti apportino un carico di 6 W/m² e che l'impianto di illuminazione, avente un'efficienza specifica di 90 lumen/W, assicuri un illuminamento di 500 lux sul piano orizzontale, si richiede:

1. disegnare sul diagramma psicrometrico allegato i trattamenti dell'aria e fare uno schema di unità di trattamento aria (UTA) compatibile con i trattamenti stessi;
2. definire il carico termico invernale ed estivo totale del locale;
3. determinare la portata d'aria dell'impianto di condizionamento;
4. dimensionare le batterie dell'unità di trattamento dell'aria (UTA);
5. determinare la potenza termica della caldaia e la potenza frigorifera del gruppo di refrigerazione ipotizzando un rendimento di 0.8 e un fattore di sicurezza pari al 20% della potenza calcolata;
6. calcolare la portata d'acqua necessaria per realizzare la trasformazione nell'umidificatore.

Dato lo schema dell'impianto riportato in Figura 1, ipotizzando un funzionamento solo nel periodo invernale con una temperatura di progetto dell'ambiente pari a 20°C e la temperatura di immissione dell'aria pari a 31°C, e canali a sezione rettangolare o quadrata, si richiede inoltre di:

7. calcolare la portata totale dell'impianto di condizionamento ($\gamma_{p,aria}=1005 \text{ J/kgK}$, $\rho_{aria}=1.225 \text{ kg/m}^3$);
8. dimensionare la singola bocchetta, nell'ipotesi che la velocità di progetto di immissione sia pari a 4 m/s e assumendo un fattore di contrazione (k) pari a 0.92;
9. dimensionare la rete di canali in ogni suo tratto, adottando il metodo delle perdite di carico distribuite costanti, utilizzando il diagramma in Figura 2.
10. valutare le perdite di carico totali gravanti sul circuito più sfavorito tramite i dati riportati in Tabella 1.

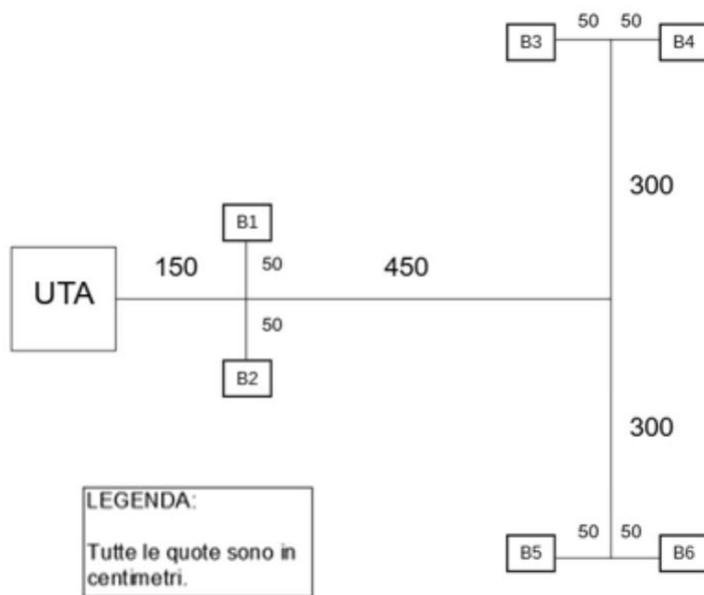


Figura 1. Schema d'impianto

Tabella 1. Coefficienti di perdita di carico concentrata.

TIPO	CARATTERISTICHE	ξ
ALLARGAMENTO DI SEZIONE	lenta variazione a mezzo divergente	0
	brusca variazione di A1 e A2	*
RESTRINGIMENTO DI SEZIONE	restringimento	0.2
	angolo=90°, canale circolare o quadrato	1.5
CURVE	angolo=90°, canale rettangolare	2
	angolo=90° arrotondato	1
	angolo=135°	0.5
	angolo=90°, $r/D < 5$ (r=raggio del raccordo, D=diametro equivalente)	0.3
	angolo=90°, $r/D > 5$ (r=raggio del raccordo, D=diametro equivalente)	0
CONFLUENZA O DIRAMAZIONE	confluenza o diramazione a T	3
	confluenza o diramazione a \perp	2.5
BOCCHETTA	Sezione rettangolare o quadrata	2.2
	Sezione circolare	1.8

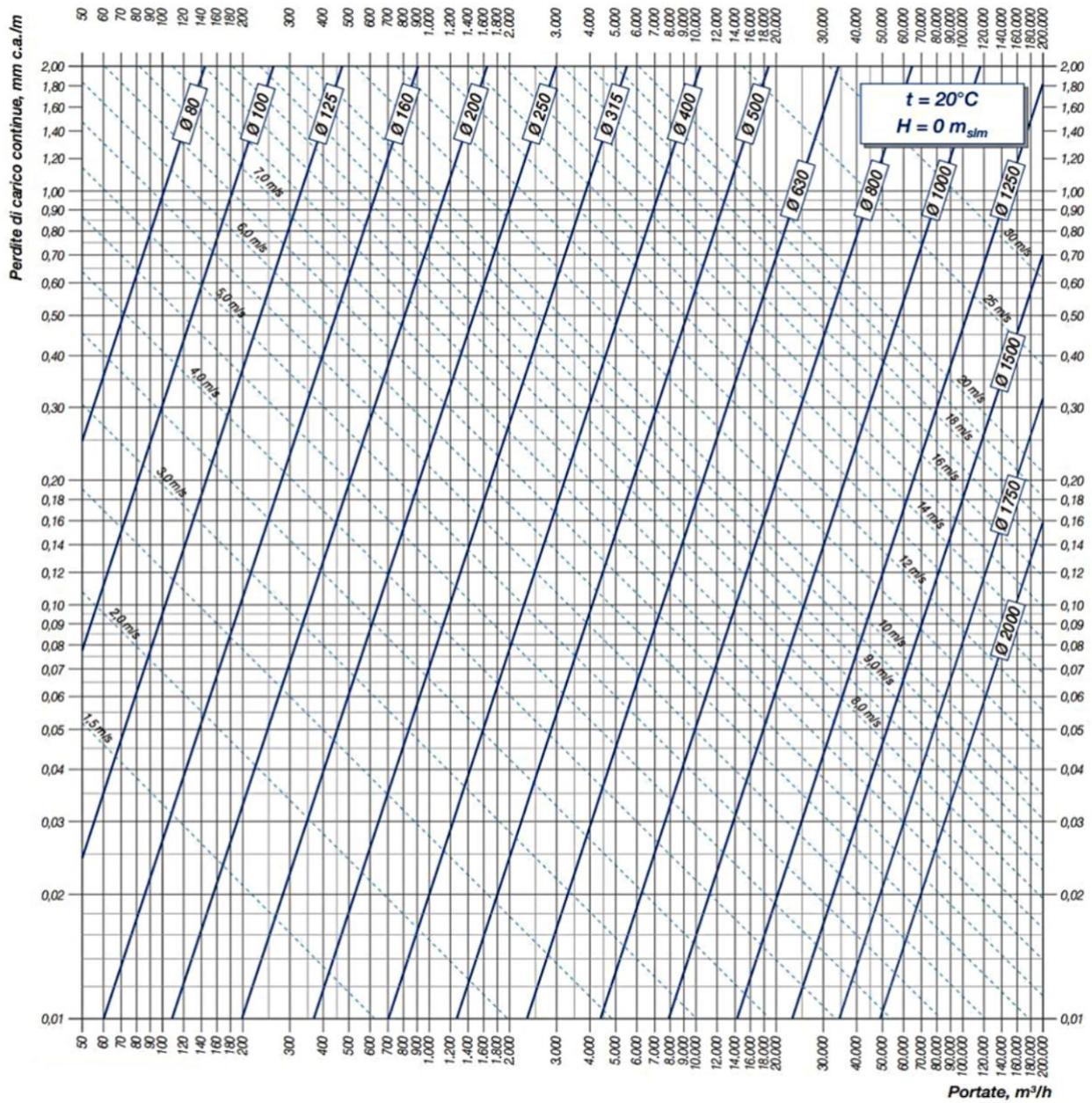


Figura 2. Diagramma portata/ perdita di carico

Canali rettangolari: diametri equivalenti per la determinazione delle perdite di carico continue

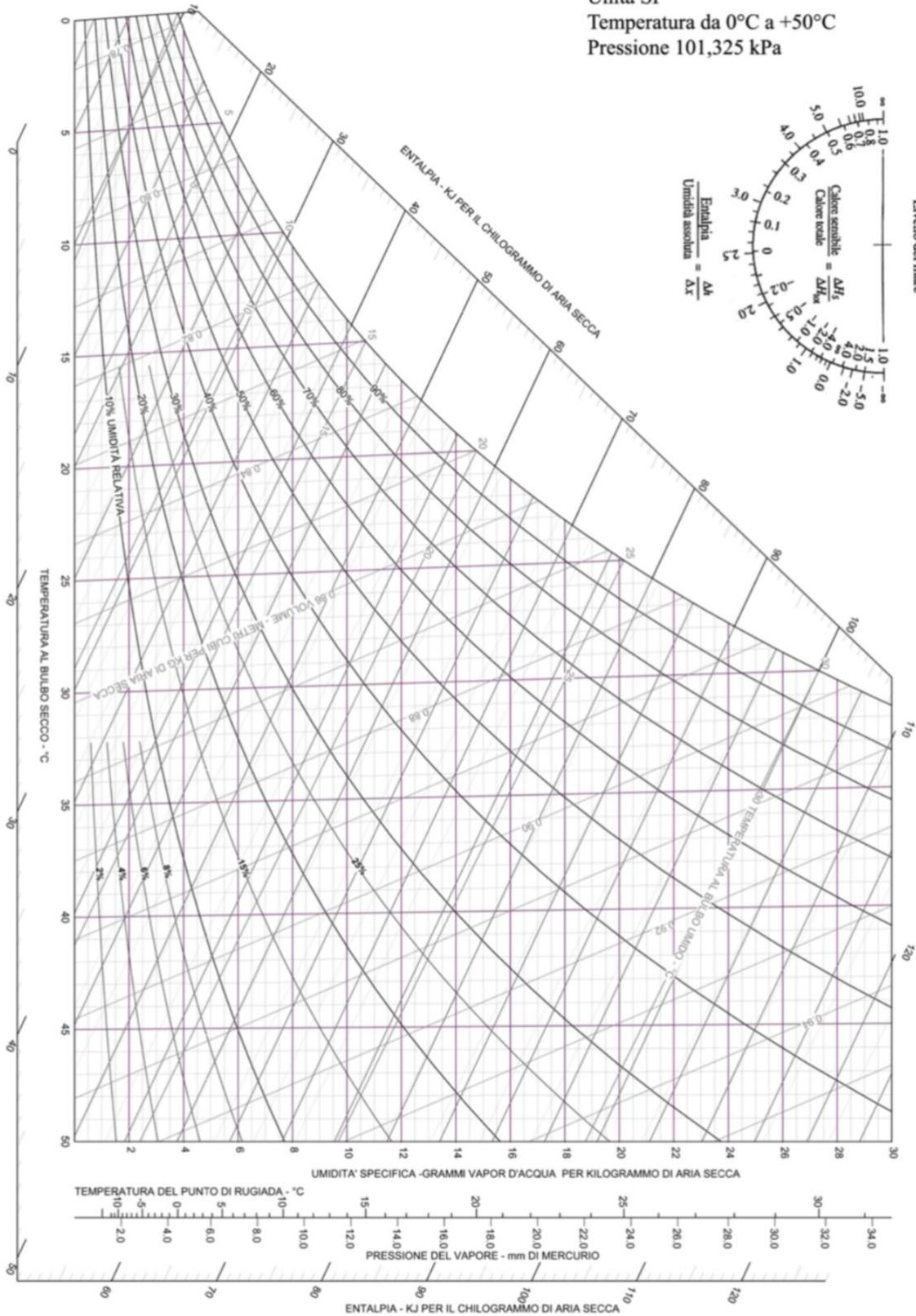
<i>a, b = dimensioni rettangolo/quadrato, mm</i>		<i>Ø_e = diametro equivalente, mm</i>																<i>f = fattore correttivo velocità</i>	
<i>b</i>	<i>a</i>	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	<i>a</i>	<i>b</i>	
100	Ø _e	109	133	152	169	183	195	207	217	227	236	245	253	261	268	275	Ø _e	100	
	f	0,94	0,93	0,91	0,89	0,87	0,86	0,84	0,82	0,81	0,80	0,79	0,77	0,76	0,75	0,74	f		
150	Ø _e	133	164	189	210	229	245	260	274	287	299	310	321	331	341	350	Ø _e	150	
	f	0,93	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81	0,80	f		
200	Ø _e	152	189	219	244	266	286	305	321	337	352	365	378	391	402	414	Ø _e	200	
	f	0,91	0,93	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,84	f		
250	Ø _e	169	210	244	273	299	322	343	363	381	398	414	429	443	457	470	Ø _e	250	
	f	0,89	0,92	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,90	0,89	0,88	0,87	0,87	0,87	f		
300	Ø _e	183	229	266	299	328	354	376	400	420	439	457	474	490	506	520	Ø _e	300	
	f	0,87	0,91	0,93	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,90	0,89	0,88	0,88	0,89	f		
350	Ø _e	195	245	286	322	354	383	409	433	455	477	496	515	533	550	567	Ø _e	350	
	f	0,86	0,90	0,92	0,93	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,90	0,89	0,89	0,90	f		
400	Ø _e	207	260	305	343	378	409	437	464	488	511	533	553	573	592	609	Ø _e	400	
	f	0,84	0,89	0,91	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92	0,92	0,92	0,92	0,91	f		
450	Ø _e	217	274	321	363	400	433	464	492	518	543	567	589	610	630	649	Ø _e	450	
	f	0,82	0,87	0,90	0,92	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92	0,92	0,92	0,92	f		
500	Ø _e	227	287	337	381	420	455	488	518	547	573	598	622	644	666	687	Ø _e	500	
	f	0,81	0,86	0,89	0,91	0,92	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92	0,92	0,92	0,93	f		
550	Ø _e	236	299	352	398	439	477	511	543	573	601	628	653	677	700	722	Ø _e	550	
	f	0,80	0,85	0,88	0,90	0,92	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	f		
600	Ø _e	245	310	365	414	457	496	533	567	598	628	656	683	708	732	755	Ø _e	600	
	f	0,79	0,84	0,87	0,90	0,91	0,92	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	f		
650	Ø _e	253	321	378	429	474	515	553	589	622	653	683	711	737	763	787	Ø _e	650	
	f	0,77	0,83	0,86	0,89	0,90	0,92	0,92	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	f		
700	Ø _e	261	331	391	443	490	533	573	610	644	677	708	737	765	792	818	Ø _e	700	
	f	0,76	0,82	0,86	0,88	0,90	0,91	0,92	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	f		
750	Ø _e	268	341	402	457	506	550	592	630	666	700	732	763	792	820	847	Ø _e	750	
	f	0,75	0,81	0,85	0,87	0,89	0,91	0,92	0,92	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	f		
800	Ø _e	275	350	414	470	520	567	609	649	687	722	755	787	818	847	875	Ø _e	800	
	f	0,74	0,80	0,84	0,87	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	f		
850	Ø _e	282	359	424	482	534	582	626	668	706	743	778	811	842	872	901	Ø _e	850	
	f	0,74	0,79	0,83	0,86	0,88	0,89	0,91	0,92	0,92	0,93	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	f		
900	Ø _e	289	367	435	494	548	597	643	686	726	763	799	833	866	897	927	Ø _e	900	
	f	0,73	0,79	0,82	0,85	0,87	0,89	0,90	0,91	0,92	0,92	0,93	0,93	0,93	0,94	0,94	f		
950	Ø _e	295	376	445	506	561	612	659	703	744	783	820	855	889	921	952	Ø _e	950	
	f	0,72	0,78	0,82	0,85	0,87	0,88	0,90	0,91	0,92	0,92	0,93	0,93	0,93	0,94	0,94	f		
1000	Ø _e	301	384	454	517	574	626	674	719	762	802	840	876	911	944	976	Ø _e	1000	
	f	0,71	0,77	0,81	0,84	0,86	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,92	0,93	0,93	0,93	0,94	f		
1100	Ø _e	313	399	473	538	598	652	703	751	795	838	878	916	953	988	1.022	Ø _e	1100	
	f	0,70	0,76	0,80	0,83	0,85	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,92	0,93	0,93	0,93	f		
1200	Ø _e	324	413	490	558	620	677	731	780	827	872	914	954	993	1.030	1.066	Ø _e	1200	
	f	0,69	0,74	0,79	0,82	0,84	0,86	0,87	0,89	0,90	0,90	0,91	0,92	0,92	0,93	0,93	f		
1300	Ø _e	334	426	506	577	642	701	757	808	857	904	948	990	1.031	1.069	1.107	Ø _e	1300	
	f	0,67	0,73	0,77	0,80	0,83	0,85	0,86	0,88	0,89	0,90	0,90	0,91	0,92	0,92	0,92	f		
1400	Ø _e	344	439	522	595	662	724	781	835	886	934	980	1.024	1.066	1.107	1.146	Ø _e	1400	
	f	0,66	0,72	0,76	0,79	0,82	0,84	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,91	0,92	0,92	f		
1500	Ø _e	353	452	536	612	681	745	805	860	913	963	1.011	1.057	1.100	1.143	1.183	Ø _e	1500	
	f	0,65	0,71	0,75	0,79	0,81	0,83	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,91	0,92	f		
1600	Ø _e	362	463	551	629	700	766	827	885	939	991	1.041	1.088	1.133	1.177	1.219	Ø _e	1600	
	f	0,64	0,70	0,74	0,78	0,80	0,82	0,84	0,85	0,87	0,88	0,89	0,89	0,90	0,91	0,91	f		
1700	Ø _e	371	475	564	644	718	785	849	908	964	1.018	1.069	1.118	1.164	1.209	1.253	Ø _e	1700	
	f	0,64	0,69	0,74	0,77	0,79	0,81	0,83	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,89	0,90	0,91	f		
1800	Ø _e	379	485	577	660	735	804	869	930	988	1.043	1.096	1.146	1.195	1.241	1.285	Ø _e	1800	
	f	0,63	0,69	0,73	0,76	0,79	0,81	0,82	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,90	f		
1900	Ø _e	387	496	590	674	751	823	889	952	1.012	1.068	1.122	1.174	1.224	1.271	1.318	Ø _e	1900	
	f	0,62	0,68	0,72	0,75	0,78	0,80	0,82	0,83	0,85	0,86	0,87	0,88	0,88	0,89	0,90	f		
2000	Ø _e	395	506	602	688	767	840	908	973	1.034	1.092	1.147	1.200	1.252	1.301	1.348	Ø _e	2000	
	f	0,61	0,67	0,71	0,74	0,77	0,79	0,8	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,89	f		
2200	Ø _e	410	525	625	715	797	874	945	1.013	1.076	1.137	1.195	1.251	1.305	1.356	1.406	Ø _e	2200	
	f	0,60	0,66	0,70	0,73	0,76	0,78	0,80	0,81	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,88	f		

Diagramma Psicrometrico

Unità SI

Temperatura da 0°C a +50°C

Pressione 101,325 kPa



TEMA 2.

Progettazione di un impianto di digestione anaerobica per la produzione di biogas a partire da biomasse agricole in un contesto rurale.

Si richiede la progettazione preliminare di un impianto di digestione anaerobica da realizzarsi in ambito agricolo, con l'obiettivo di valorizzare residui organici e sottoprodotti agro-zootecnici per la produzione di energia elettrica e termica da biogas.

Considerando i valori di resa in biogas e composizione del digestato riportati in Figura 3a e 3b, il candidato ipotizzi di dover progettare un impianto da realizzarsi in un'azienda agricola situata in pianura, con le seguenti caratteristiche:

- Superficie coltivata: 100 ettari, principalmente a mais da insilato e sorgo.
- Produzione annua di reflui zootecnici: 8.000 m³ (bovini da latte).
- Possibilità di conferire anche sottoprodotti agroindustriali (es. scarti di frutta, siero di latte, sanse).
- Destinazione del biogas: cogenerazione elettrica e termica (CHP), con potenza elettrica prevista intorno a 300 kW.
- L'energia termica sarà in parte utilizzata per il riscaldamento dell'impianto e in parte ceduta ad utenze vicine (es. serre o edifici agricoli).

Si richiede al candidato di produrre i seguenti elaborati:

1. Relazione tecnica generale, contenente:
 - Descrizione del processo di digestione anaerobica e scelta della tecnologia (es. fermentatore mesofilo/termofilo, tipo di digestore, sistema di miscelazione).
 - Dimensionamento del digestore sulla base dei substrati disponibili e delle rese attese.
 - Quantificazione della produzione di biogas e stima dell'output energetico.
 - Descrizione del sistema di cogenerazione e degli impieghi energetici.
2. Analisi ambientale e normativa:
 - Inquadramento normativo (Autorizzazione Unica, AIA, PAS, ecc.).
 - Gestione del digestato: separazione solido/liquido, utilizzo agronomico, stoccaggio.
 - Valutazione di impatto ambientale (odori, emissioni, traffico veicolare, rumore).
 - Strategie per l'integrazione paesaggistica e la sicurezza dell'impianto.
3. Bilancio energetico ed economico:
 - Rendimento elettrico e termico del sistema.
 - Autoconsumo e immissione in rete dell'energia elettrica.
 - Analisi costi/benefici e valutazione del tempo di ritorno dell'investimento (payback period).
 - Eventuali incentivi applicabili (es. Tariffa Omnicomprensiva, FER, PNRR, ecc.).
4. Elaborati grafici:
 - Layout planimetrico dell'impianto (digestore, cogeneratore, vasche, stoccaggi).
 - Schema a blocchi o di processo dell'impianto di digestione anaerobica.

Note. È possibile utilizzare dati bibliografici e assunti standard giustificandone l'uso. Si suggerisce di fare riferimento alle normative tecniche di settore (D.Lgs. 152/2006, D.Lgs. 387/2003, Linee guida GSE, Regolamento UE 2018/848 per il digestato, ecc.).

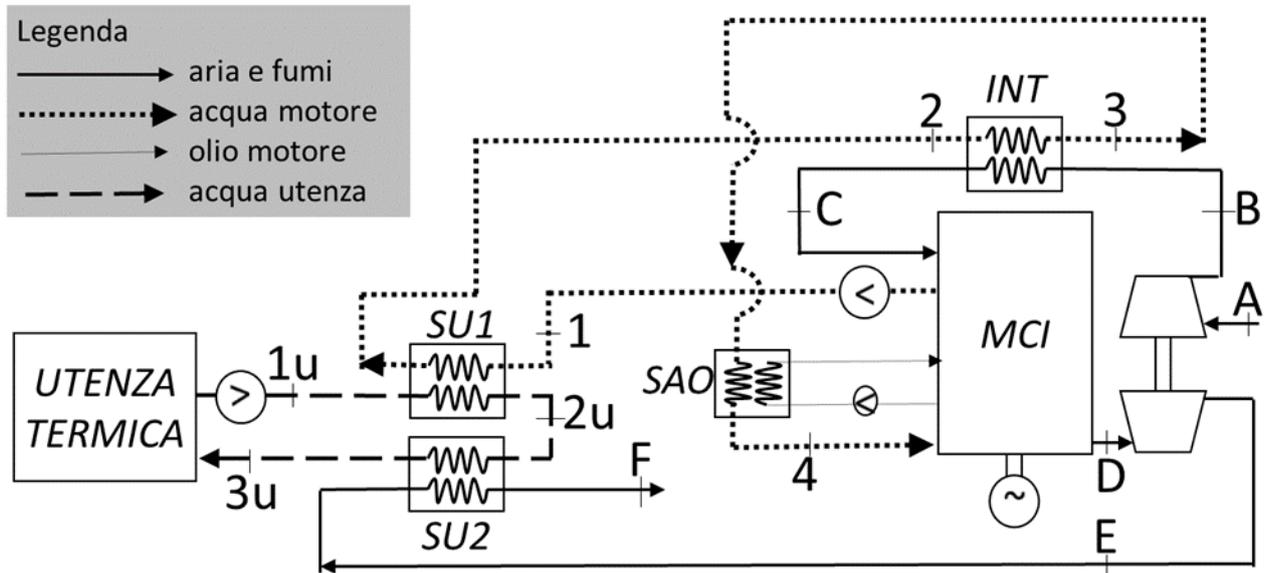
SUBSTRATO	Resa biogas Nm ³ /t sostanza organica (SV)	Resa biogas Nm ³ /t tal quale	Contenuto in metano %
ALLEVAMENTO			
liquame bovino	250-400	20-30	55-60
letame bovino	350-450	60-75	55-60
liquame suino	400-450	15-20	60-65
AGRICOLTURA			
insilato di mais	600-680	190-210	52
insilato di sorgo	500-560	140-160	52
insilato di triticale	550-650	170-200	53
insilato di erba	500-550	130-140	52
AGROINDUSTRIA			
siero di latte	670	30	58
bucchette di pomodoro	350	80	55
polpa di patate	580	100	52

SUBSTRATO	AZOTO [% sostanza secca]	AZOTO [kg/ t di fresco]
Liquame bovino	2,6-6,7	4,42
Liquame suino	6-18	8,40
Pollina	5,4	17,28
Silomais	1,1-2	4,26
Colletto e foglie barbabietola	0,2-0,4	0,48
Marcomela	1,1	3,85
Sfalci d'erba	2-3	3,00

Figura 3. (a) Rese in biogas e contenuto di metano in diverse matrici; **(b)** contenuto di azoto nel digestato. (fonte. Autori vari)

TEMA 3.

Impianto di produzione congiunta di energia elettrica e acqua calda.



È dato un impianto per produzione congiunta di energia elettrica e acqua calda. L'alternatore è mosso da un motore a combustione interna turbocompresso e interrefrigerato. L'aria ambiente viene compressa partendo dalle condizioni $P_A = 1 \text{ bar}$ e $T_A = 20^\circ\text{C}$; dopo la compressione viene raffreddata attraverso lo scambiatore aria-acqua *INT* ed entra nel motore, facendo da comburente. I fumi di uscita espandono in turbina e, dopo essere passati attraverso lo scambiatore ad alta temperatura *SU2*, escono dal camino a pressione atmosferica ($P_F = 1 \text{ bar}$). L'acqua di refrigerazione, una volta uscita dal motore, passa prima attraverso lo scambiatore a bassa temperatura *SU1*, poi attraverso l'intercooler *INT* e infine attraverso lo scambiatore acqua-olio *SAO*, dove raffredda l'olio, per tornare di nuovo all'interno del motore. L'acqua dell'utenza termica passa in serie per gli scambiatori *SU1* (acqua-acqua) e *SU2* (acqua-fumi).

Si trascurino le perdite di carico nei condotti e le variazioni di temperatura dei fluidi in uscita dai circolatori; si considerino inoltre uguali i calori specifici dell'acqua motore e dell'acqua dell'utenza termica.

Il candidato determini, in base ai dati sotto riportati e giustificando eventuali ipotesi di lavoro, quanto segue:

- Temperatura e pressione di ciascun punto del circuito aria-fumi (A, B, C, D, E, F)
- Rendimento elettrico (considerando sia l'efficienza del motore, sia quella di conversione meccanico-elettrica), rendimento termico, rendimento globale di cogenerazione
- Portata di combustibile, portata di aria e consumo specifico di combustibile
- Portata di acqua motore
- Portata di acqua calda che alimenta l'utenza termica
- Potenze termiche lato acqua utenza allo scambiatore *SU1* e allo scambiatore *SU2*
- Temperatura di ciascun punto del circuito acqua motore (1, 2, 3, 4)
- Temperatura del circuito utenza termica tra i due scambiatori *T2u*
- Velocità di rotazione del turbocompressore

Dati

- o Potenza elettrica ottenuta $W_{El} = 1200 \text{ kW}$
- o Rapporto di compressione $\beta_C = 2.5$
- o Rapporto di espansione $\beta_T = 3.5$
- o Combustibile: gasolio
- o Combustione in eccesso d'aria: $\lambda = 1.1$
- o Gas combusti con costante $R_{Exh} = 293 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ e rapporto fra calori specifici $k_{Exh} = 1.3$ (si assumano R_F e K_F costanti con la temperatura)
- o Rendimento isoentropico di compressione $\eta_{is,C} = 0.82$
- o Rendimento isoentropico di espansione $\eta_{is,T} = 0.78$
- o Rendimento dell'alternatore $\eta_{Alt} = 0.97$
- o Rendimento di trasmissione motore - alternatore $\eta_T = 0.87$
- o Rendimento del motore a combustione interna $\eta_{MCI} = 0.34$
- o Indice elettrico E.I. = 85%
- o Temperatura fumi uscita turbina $T_E = 630^\circ\text{C}$
- o Temperatura fumi al camino $T_F = 120^\circ\text{C}$
- o Temperatura aria uscita intercooler $T_C = 70^\circ\text{C}$
- o Portata olio $\dot{m}_O = 1 \text{ kg/s}$
- o Salto termico dell'olio allo scambiatore $\Delta T_O = 12^\circ\text{C}$
- o Rendimento di scambio termico agli scambiatori delle utenze: $\eta_{SU1} = 85\%$, $\eta_{SU2} = 70\%$
- o Si considerino unitari i rendimenti di scambio termico all'intercooler e allo scambiatore acqua-olio
- o Temperatura acqua uscita motore $T_1 = 85^\circ\text{C}$
- o Temperatura acqua motore ingresso intercooler $T_2 = 65^\circ\text{C}$
- o Temperatura acqua utenza ingresso scambiatore *SU1* $T_{1u} = 60^\circ\text{C}$
- o Temperatura acqua utenza uscita scambiatore *SU2* $T_{3u} = 80^\circ\text{C}$
- o Turbina costituita da un unico stadio con grado di reazione $R = 0.5$ e angolo di attacco rispetto alla direzione assiale $\alpha_1 = 45^\circ$