

CAPITOLO 13

CENTRALI FRIGORIFERE

MACCHINE FRIGORIFERE

LE MACCHINE FRIGORIFERE SI UTILIZZANO PER SOTTRARRE ENERGIA TERMICA AD UN'UTENZA A BASSA TEMPERATURA E QUINDI PER REFRIGERARE L'UTENZA STESSA

BASSA TEMPERATURA SIGNIFICA: TEMPERATURA PIU' BASSA, RISPETTO ALL'AMBIENTE CHE LE CIRCONDA

FRIGORIFERO - TEMPERATURE DI FUNZIONAMENTO - 1

LE ESIGENZE DELL'UTENZA DETERMINANO LA TEMPERATURA DI MANDATA DEL FRIGORIFERO

PER IL CONDIZIONAMENTO AMBIENTALE (MANTENERE GLI AMBIENTI A 25°C CIRCA) SI USANO FRIGORIFERI CHE RAFFREDDANO (SULL'EVAPORATORE) ACQUA, DETTA GELIDA, CON TEMPERATURE DI INGRESSO/USCITA RISPETTIVAMENTE DI 12-13°C E 6-7°C

FRIGORIFERO - TEMPERATURE DI FUNZIONAMENTO - 2

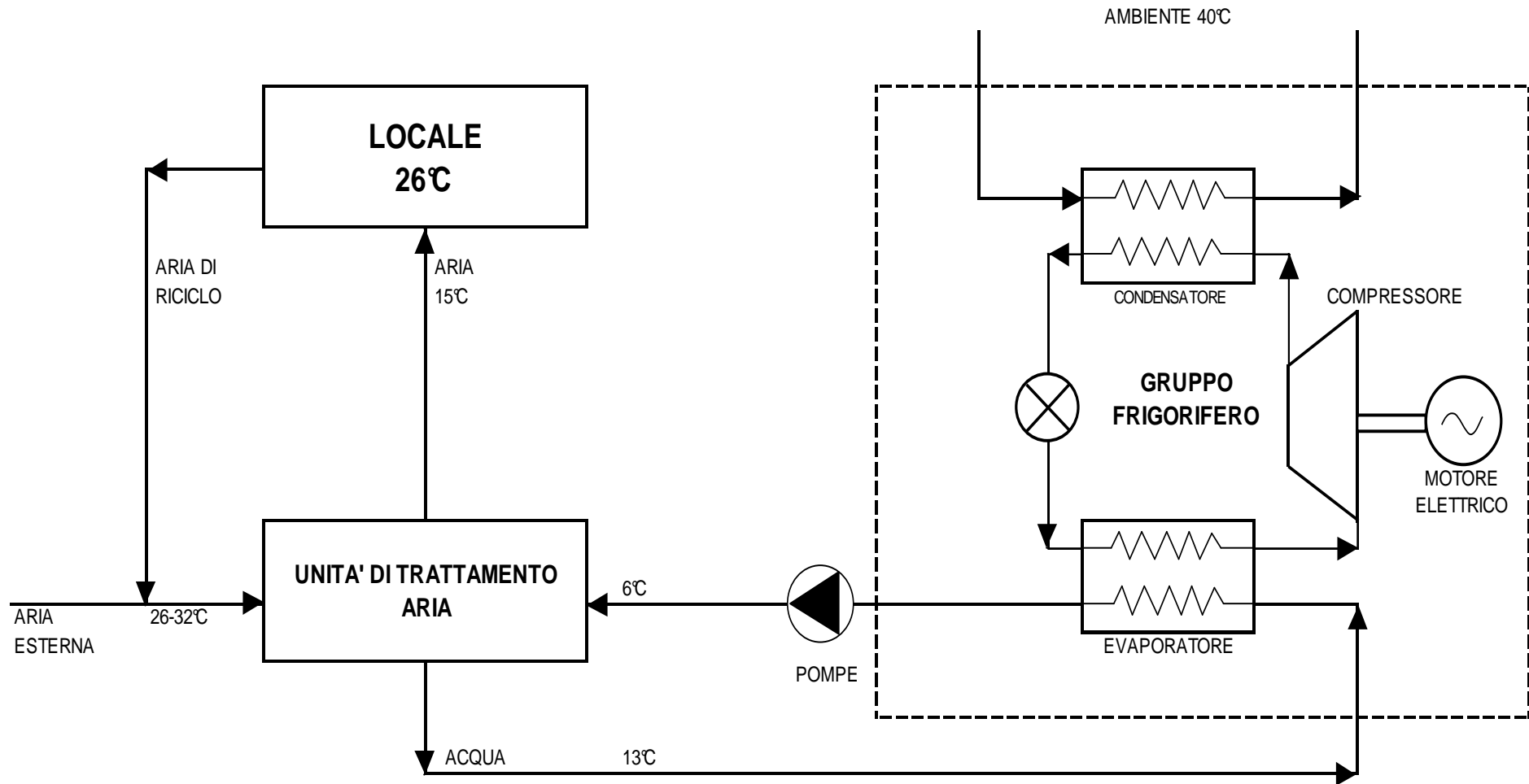
PER APPLICAZIONI SPECIALI SI UTILIZZANO MACCHINE CON TEMPERATURA DI MANDATA PIU' BASSA DI 0°C. ESEMPI:

- CONDIZIONAMENTO DI SALE OPERATORIE A 16°C (TEMPERATURA MANDATA FRIGO -1°C)
- PALAZZI DEL GHIACCIO (TENERE LA PISTA A POCO MENO DI 0°C – MANDATA E RITORNO FRIGO ENTRAMBI A MENO DI 0°C)
- CELLE FRIGORIFERE, -10 / -30°C

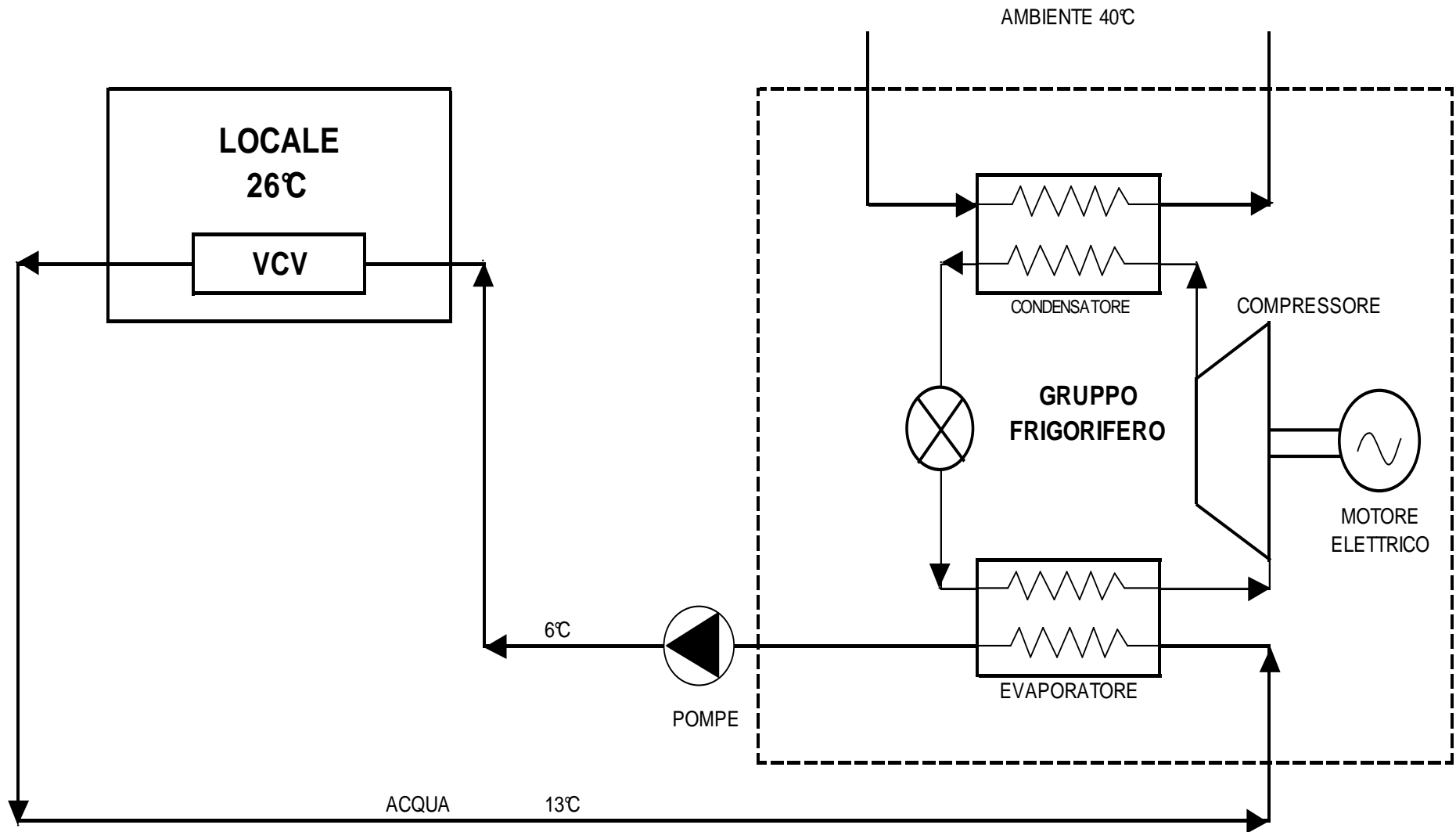
QUANDO LA TEMPERATURA DI MANDATA E' PIU' BASSA DI 0°C E SI USA ACQUA NEL CIRCUITO D'UTENZA, QUESTA DEVE ESSERE ADDIZIONATA CON GLICOLE ANTIGELO.

NELLE CELLE FRIGORIFERE (A -10 / -30°C) SI USA DIRETTAMENTE IL FREON NELLO SCAMBIATORE POSTO NELL'AMBIENTE

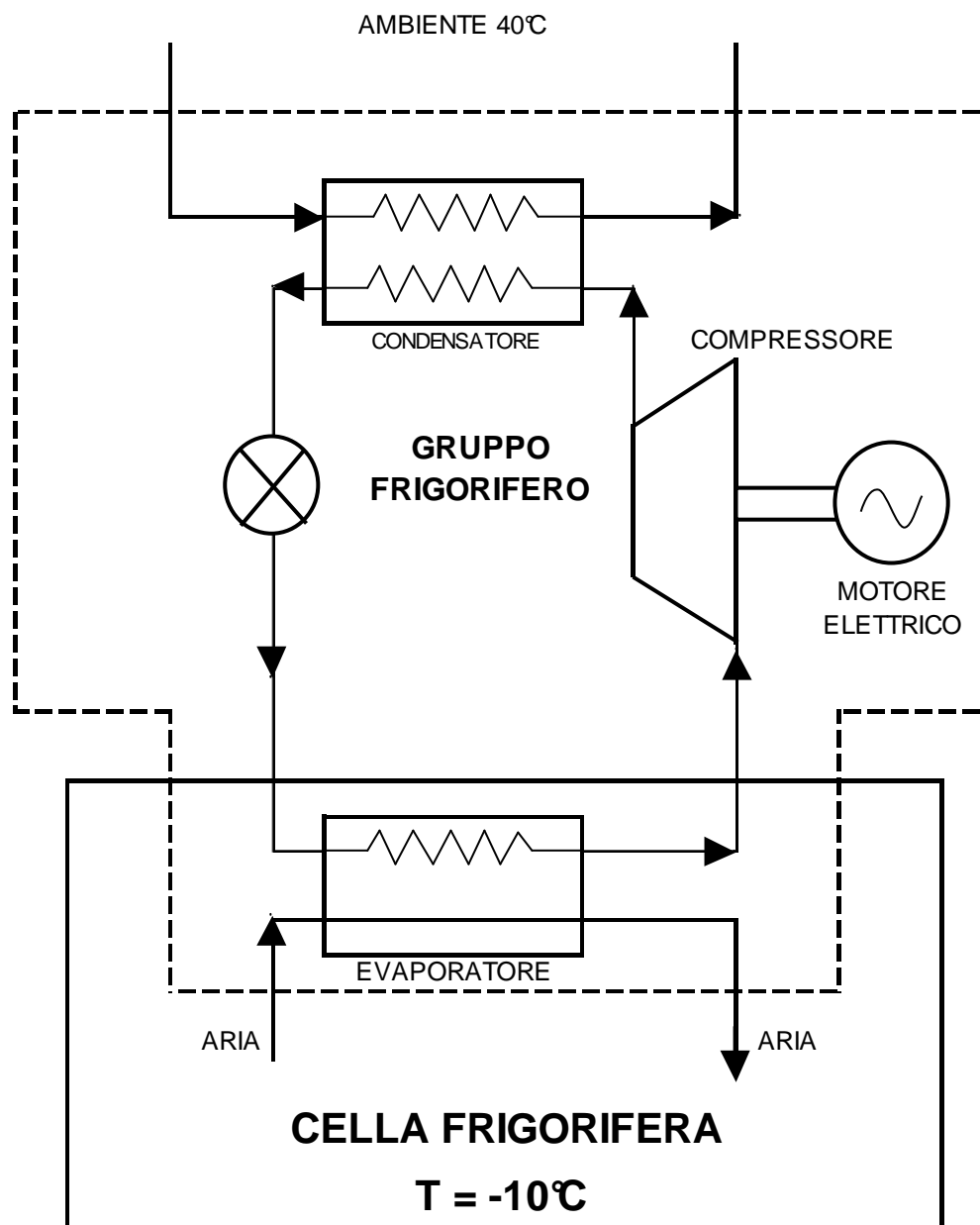
FRIGORIFERO - TEMPERATURE DI FUNZIONAMENTO - 3



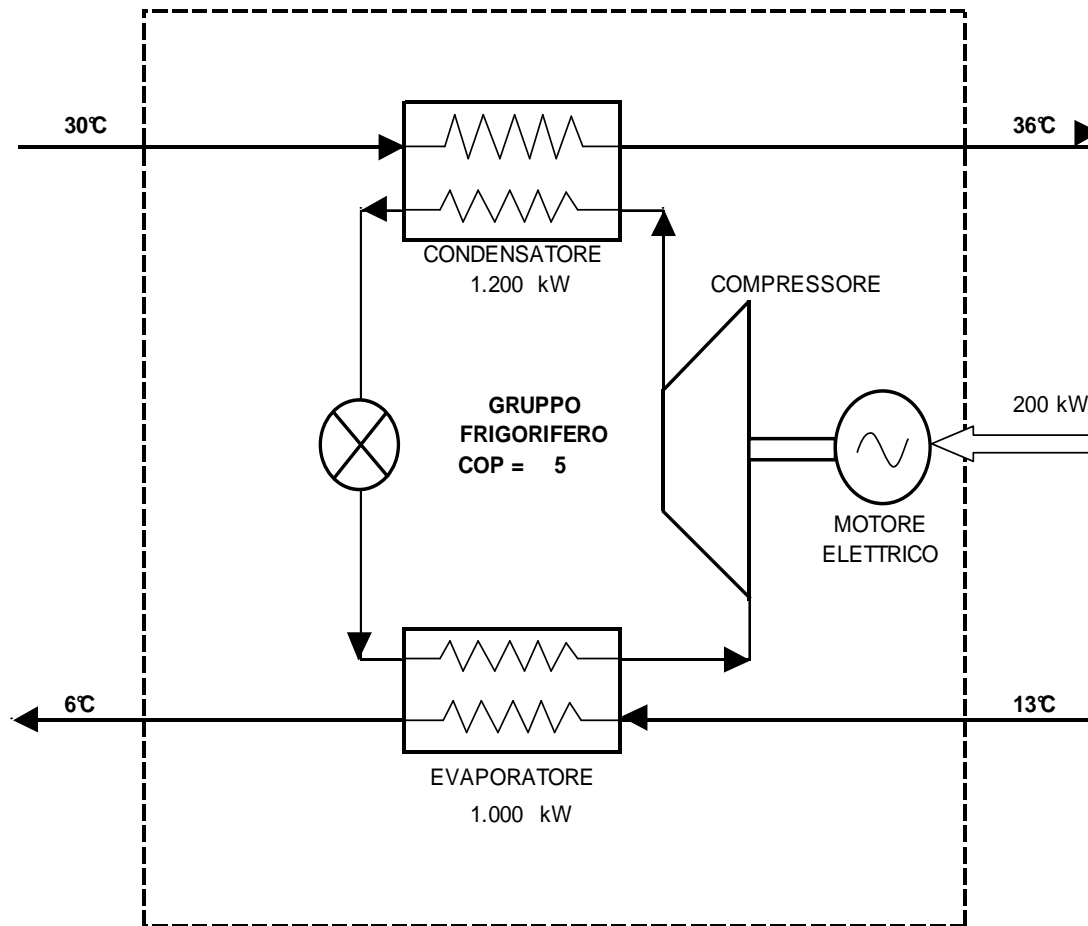
FRIGORIFERO - TEMPERATURE DI FUNZIONAMENTO - 4



FRIGORIFERO - TEMPERATURE DI FUNZIONAMENTO - 5



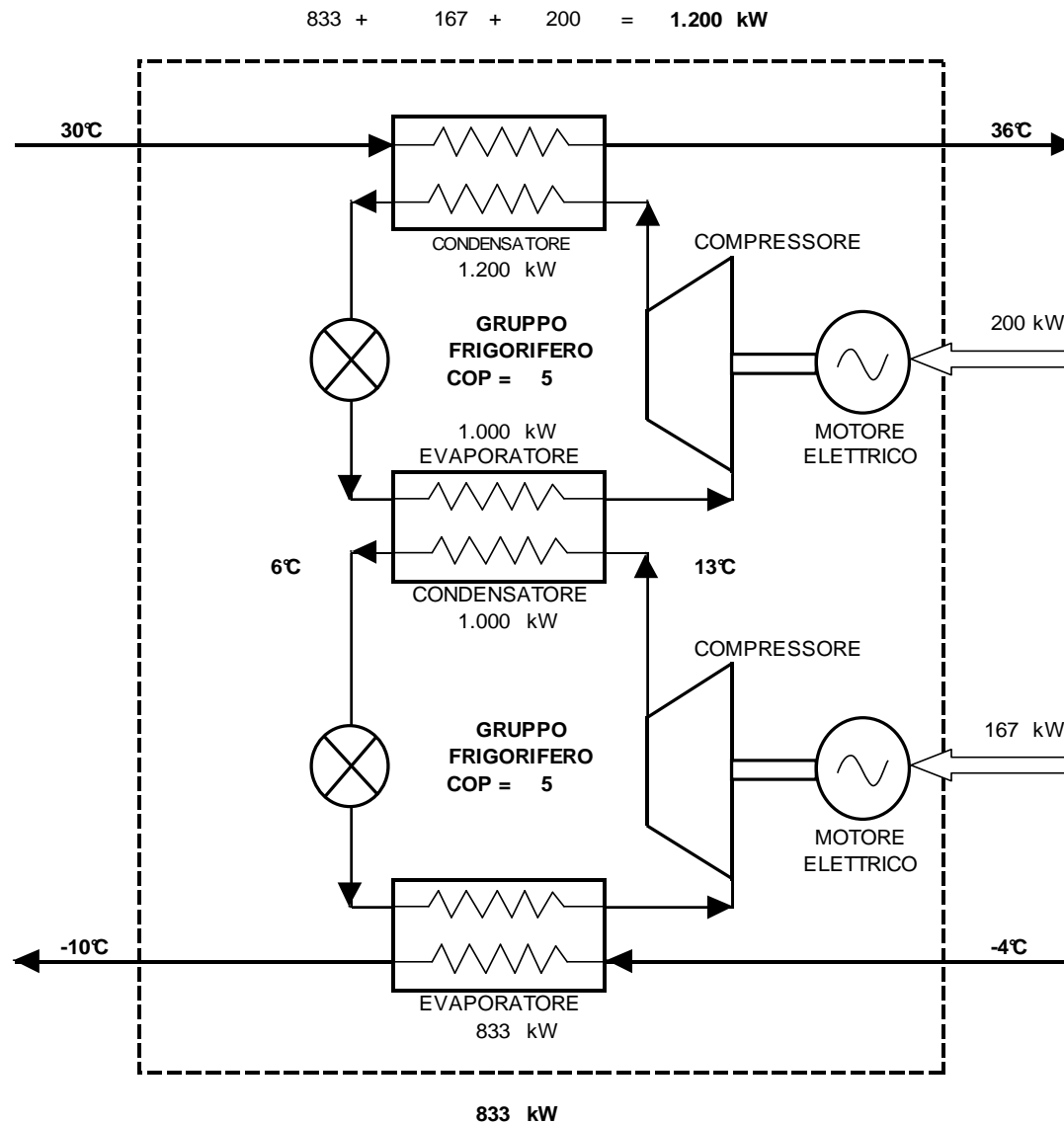
FRIGORIFERO - TEMPERATURE DI FUNZIONAMENTO - 6



UNA MACCHINA NORMALMENTE
UTILIZZATA PER LA PRODUZIONE DI
ACQUA GELIDA A 6°C PER IL
CONDIZIONAMENTO AMBIENTALE HA
UN COP ≥ 5 .

PER TEMPERATURE PIU' BASSE
VEDERE ESEMPIO SUCCESSIVO

FRIGORIFERO - TEMPERATURE DI FUNZIONAMENTO 7



UNA MACCHINA CHE LAVORA
FRA -10°C E 36°C PUO'
ESSERE IMMAGINATA COME
COMPOSTA DA DUE
MACCHINE IN SERIE, UNA
UGUALE A QUELLA
DELL'ESEMPIO PRECEDENTE E
L'ALTRA CHE ABBATTE LA
TEMPERATURA A -10°C .

IL COP COMPLESSIVO DELLE
DUE UNITA' VALE:

$$\text{COP} = \frac{833}{200 + 167} = 2,27$$

MACCHINE FRIGORIFERE

CICLI FRIGORIFERI

- A COMPRESSIONE: CONSUMA ENERGIA ELETTRICA
- AD ASSORBIMENTO: CONSUMA CALORE

CICLO FRIGORIFERO A COMPRESSIONE

E' UN CICLO CHIUSO OPERATORE, PERCORSO IN SENSO ANTIORARIO: HA ESSENZIALMENTE UNA CONFIGURAZIONE SIMILE A QUELLA DI UN CICLO RANKINE PERCORSO IN SENSO INVERSO

POICHE' IL PROCESSO DI SOTTRAZIONE DI ENERGIA TERMICA (Q_L) AD UNA SORGENTE FREDDA DA RIVERSARE AD UNA SORGENTE CALDA NON E' UN PROCESSO SPONTANEO, PER IL FUNZIONAMENTO DEL CICLO SI RENDE NECESSARIA L'INTRODUZIONE DI UN LAVORO L NEL CICLO.

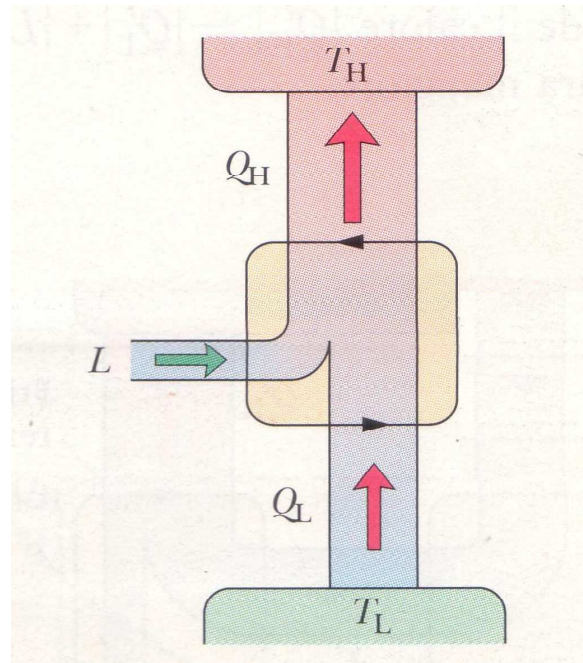
L'ENERGIA TERMICA Q_H RIVERSATA ALLA SORGENTE CALDA E':

$$Q_H = Q_L + L$$

SI DEFINISCE COEFFICIENTE DI PRESTAZIONE COP IL RAPPORTO FRA L'EFFETTO UTILE E LA SPESA ENERGETICA

$$COP = Q_L / L$$

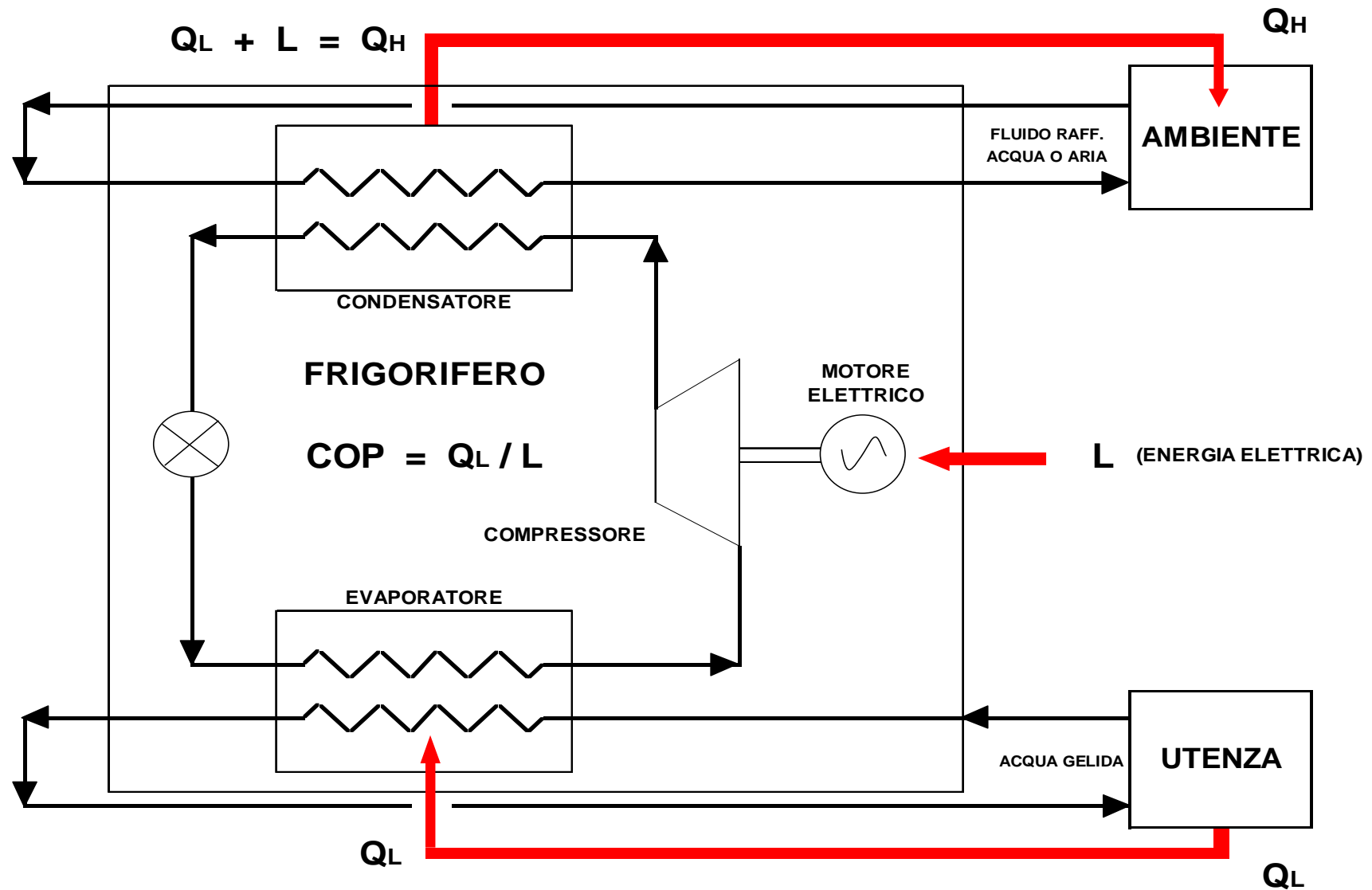
CICLO FRIGORIFERO A COMPRESSIONE



$$Q_H = Q_L + L$$

$$\text{COP} = Q_L / L$$

CICLO FRIGORIFERO A COMPRESSIONE



CICLO FRIGORIFERO A COMPRESSIONE

LE CARATTERISTICHE TECNICO/REALIZZATIVE DELLE MACCHINE FRIGORIFERE A COMPRESSIONE SI DISTINGUONO IN RELAZIONE A:

- POTENZIALITA' FRIGORIFERA RICHIESTA
- TEMPERATURA DI EVAPORAZIONE
- FLUIDO (E QUINDI TEMPERATURA) DI CONDENSAZIONE

LA POTENZIALITA' RICHIESTA DETERMINA IL TIPO DI COMPRESSORE

LA TEMPERATURA DI EVAPORAZIONE DIPENDE DALLE ESIGENZE DELL'UTENZA E DETERMINA LA SCELTA DEL FLUIDO FRIGORIGENO (FREON) E LA CONFIGURAZIONE DEL CICLO FRIGORIFERO

LA TEMPERATURA DI CONDENSAZIONE E LE CARATTERISTICHE REALIZZATIVE DEL CONDENSATORE DIPENDONO INNANZITUTTO DAL FLUIDO DISPONIBILE PER LA CONDENSAZIONE STESSA (ACQUA, ARIA), E POI DALLE CONDIZIONI AMBIENTALI ESTERNE

FRIGORIFERI A COMPRESSIONE

TIPI DI COMPRESSORE

- ALTERNATIVO (FINO A 500 kW)
- A VITE (FINO A 1300 kW)
- CENTRIFUGO (DA 1000 kW IN SU)

SISTEMI DI RAFFREDDAMENTO

- AD ARIA
- AD ACQUA

PROBLEMI DI RUMORE:

- IN TUTTI I CASI: DOVUTI AL COMPRESSORE
- COL RAFFREDDAMENTO AD ARIA: DOVUTI AL CONDENSATORE DEL FRIGO
- COL RAFFREDDAMENTO AD ACQUA: DOVUTI ALLA TORRE DI RAFFREDDAMENTO

FRIGORIFERO A COMPRESSIONE

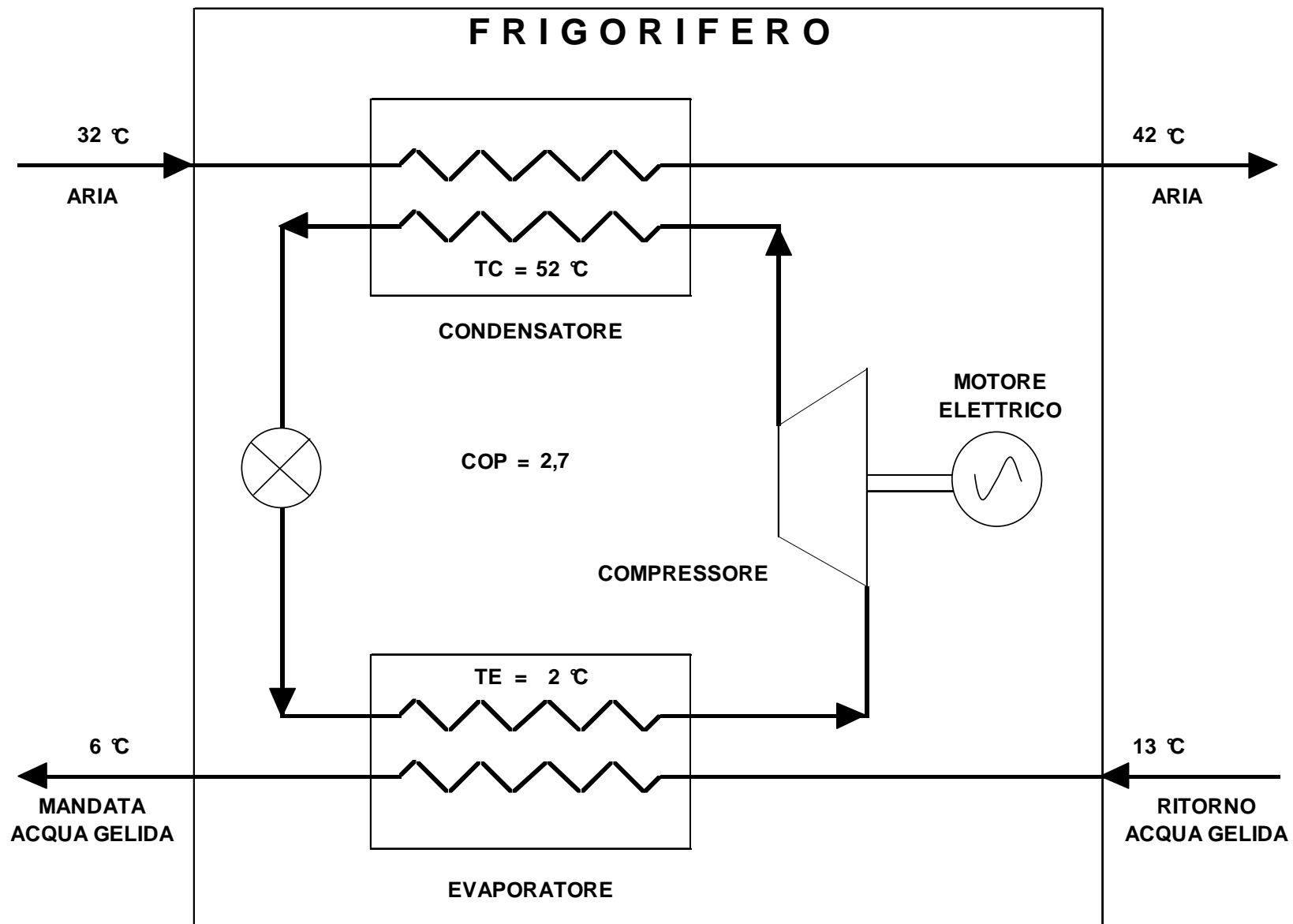
SISTEMI DI RAFFREDDAMENTO AD ARIA

IL CONDENSATORE E' RAFFREDDATO MEDIANTE RILEVANTI PORTATE D'ARIA ESTERNA, SOFFIATE DA VENTILATORI

LA TEMPERATURA DI CONDENSAZIONE E' NOTEVOLMENTE PIU' ELEVATA, RISPETTO ALLA TEMPERATURA AMBIENTE, ED IL COP E' PIUTTOSTO BASSO (INFERIORE A 3)

LA MACCHINA FRIGORIFERA VA INSTALLATA ALL'APERTO, E' PIU' GRANDE E PIU' COSTOSA DI UNA MACCHINA RAFFREDDATA AD ACQUA, PERO' NON C'E' NECESSITA' DI TORRE DI RAFFREDDAMENTO, IL CHE DA' COMPLESSIVAMENTE UN RISPARMIO IN COSTO E IN SPAZIO

FRIGORIFERO A COMPRESSIONE RAFFREDDATO AD ARIA



FRIGORIFERO A COMPRESSIONE

SISTEMI DI RAFFREDDAMENTO AD ACQUA

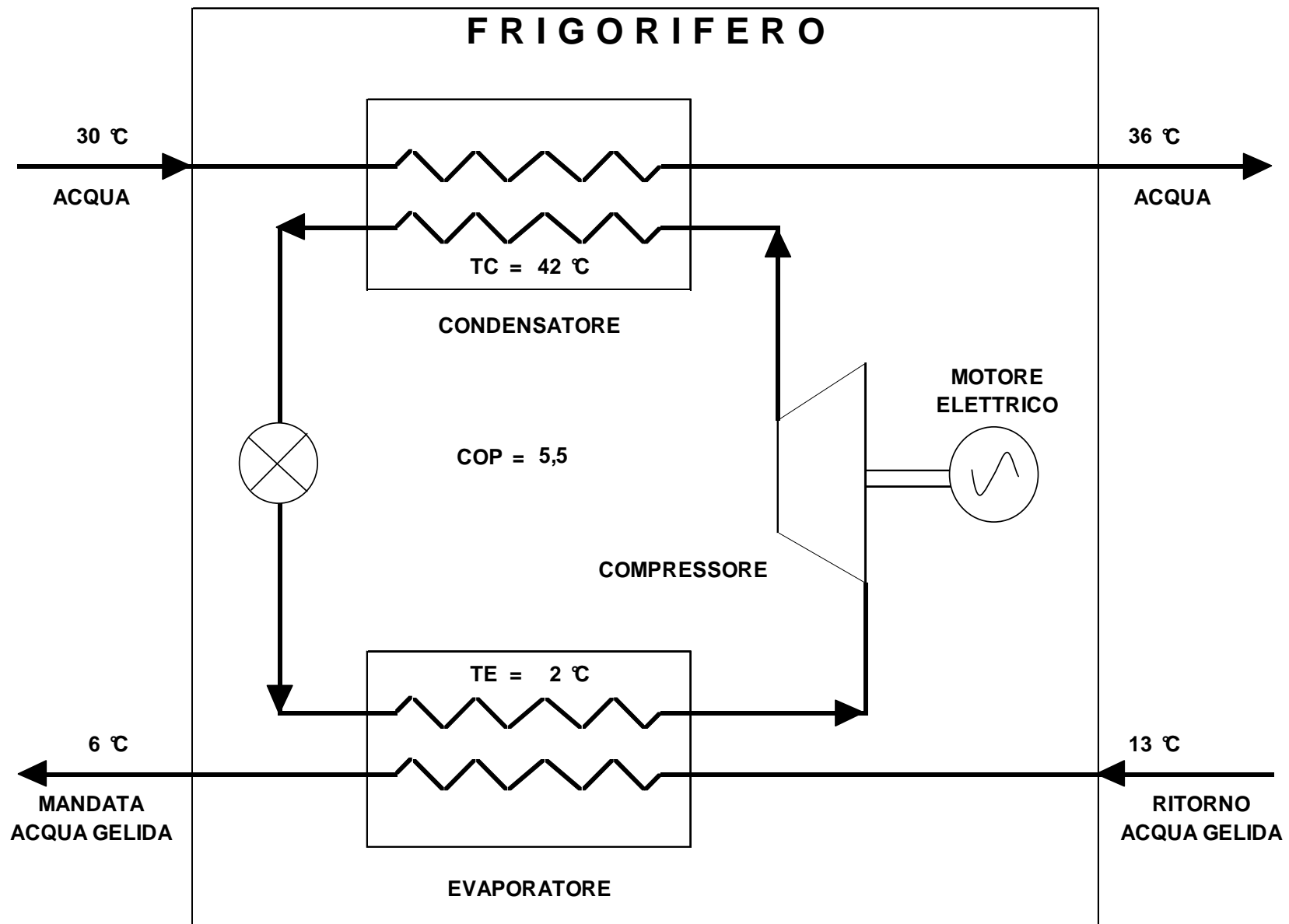
IL CONDENSATORE E' RAFFREDDATO MEDIANTE ACQUA, CHE VIENE RAFFREDDATA, A PROPRIA VOLTA, DA UNA TORRE DI RAFFREDDAMENTO

LA TEMPERATURA DI CONDENSAZIONE E' POCO PIU' ELEVATA, RISPETTO ALLA TEMPERATURA AMBIENTE, ED IL COP E' ALTO (4,50 – 6,00)

IL FRIGORIFERO PUO' ESSERE INSTALLATO AL CHIUSO ED E' PIU' COMPATTO. PER CONTRO, L'INTERA INSTALLAZIONE, INCLUSA LA TORRE DI RAFFREDDAMENTO, HA MAGGIOR INGOMBRO ED E' PIU' COSTOSA

IL COP COMPLESSIVO, TENUTO CONTO DEGLI ASSORBIMENTI ELETTRICI DELLE TORRI DI RAFFREDDAMENTO E DELLE POMPE DELL'ACQUA DI TORRE, SI ATTESTA INTORNO A 3,50 – 4,50

FRIGORIFERO A COMPRESSIONE RAFFREDDATO AD ACQUA



TORRE DI RAFFREDDAMENTO

COMPONENTE PER RAFFREDDARE ACQUA USANDO L'ARIA ESTERNA

L'ACQUA DA RAFFREDDARE VIENE SPRUZZATA IN GOCCIOLINE ALL'INTERNO DI UNA CORRENTE D'ARIA (QUESTA E' SPINTA DA UN VENTILATORE)

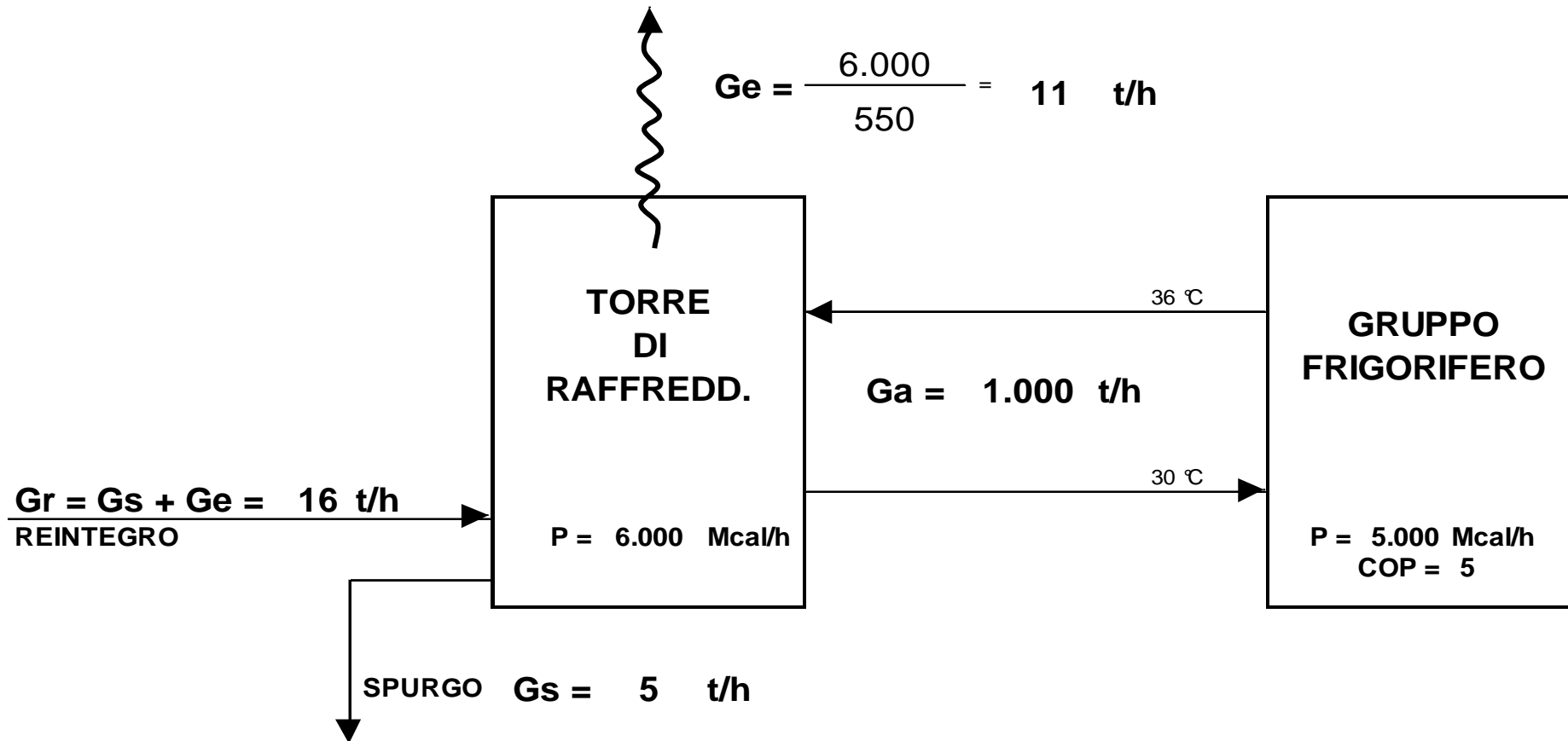
UNA MINIMA PARTE DELL'ACQUA EVAPORA E, SOTTRAENDO CALORE, RAFFREDDA L'ARIA

IN TAL MODO, L'ARIA SI PORTA VICINA ALLA TEMPERATURA AL BULBO UMIDO (DI SOLITO 7-8°C MENO DELLA TBS) E, QUIN DI, SI RIESCE A RAFFREDDARE DI PIU' L'ACQUA

DI SOLITO:

$$TUA = TBU + (4-5^{\circ}\text{C}) = TBS - (2-3^{\circ}\text{C})$$

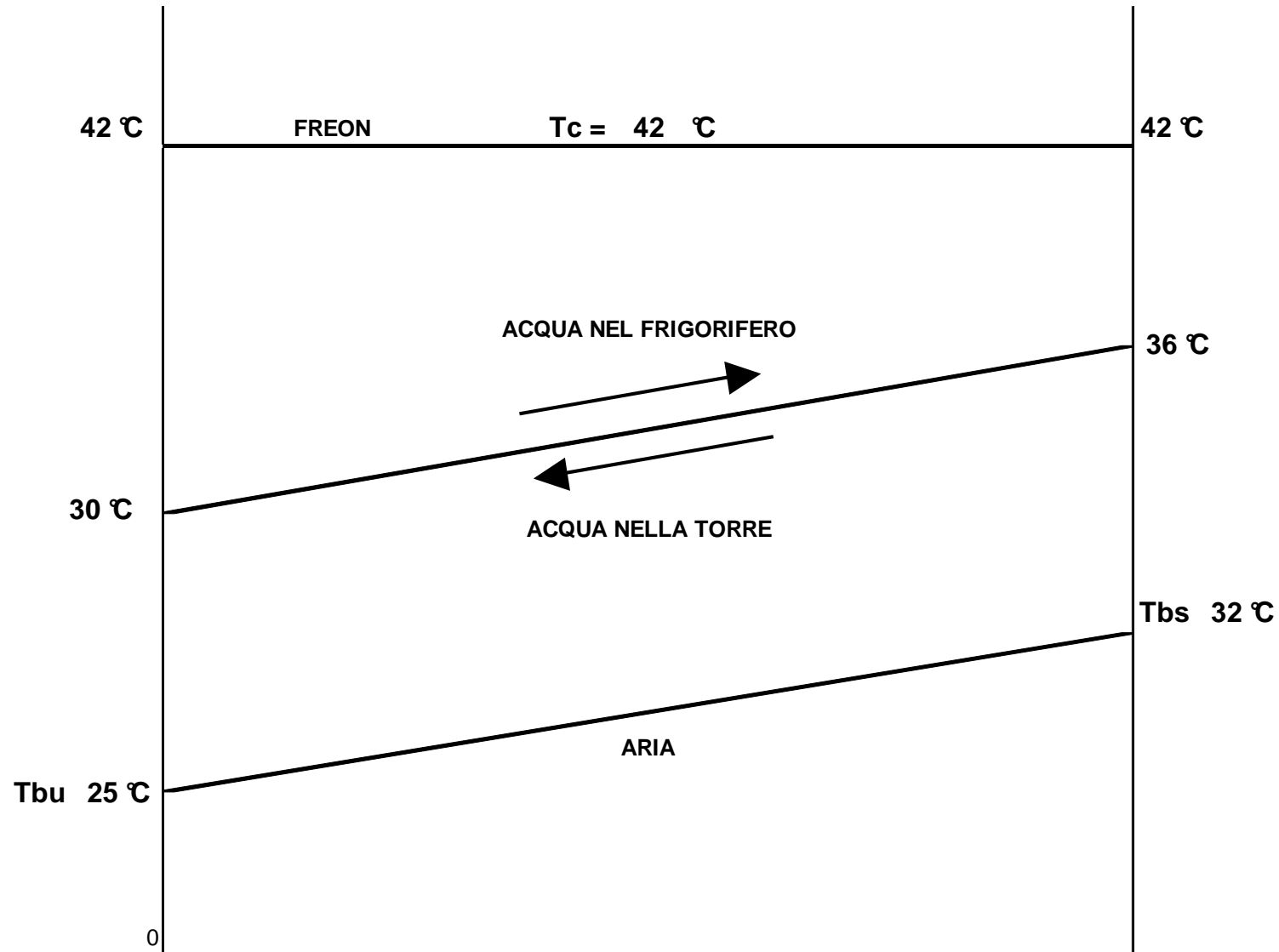
TORRE DI RAFFREDDAMENTO



L'EVAPORATO SI CALCOLA IN BASE AL CALORE LATENTE DI EVAPORAZIONE : 550 kcal/kg
CON DT DI 5-6°C L'EVAPORATO RISULTA CIRCA 1% DELLA PORTATA IN CIRCOLO

LO SPURGO, NORMALMENTE, E' CIRCA META' DELL'EVAPORATO, PER CUI IL REINTEGRO E' 1,5%
CIRCA DELLA PORTATA IN CIRCOLO

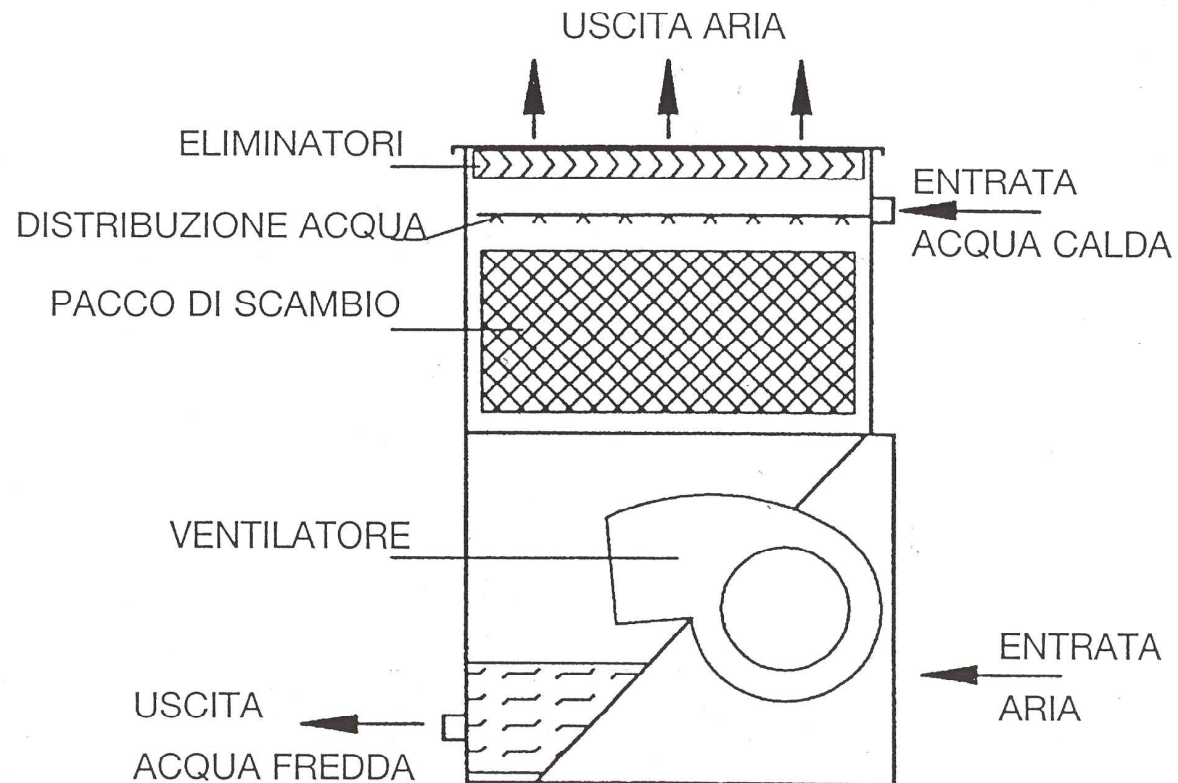
TORRE DI RAFFREDDAMENTO



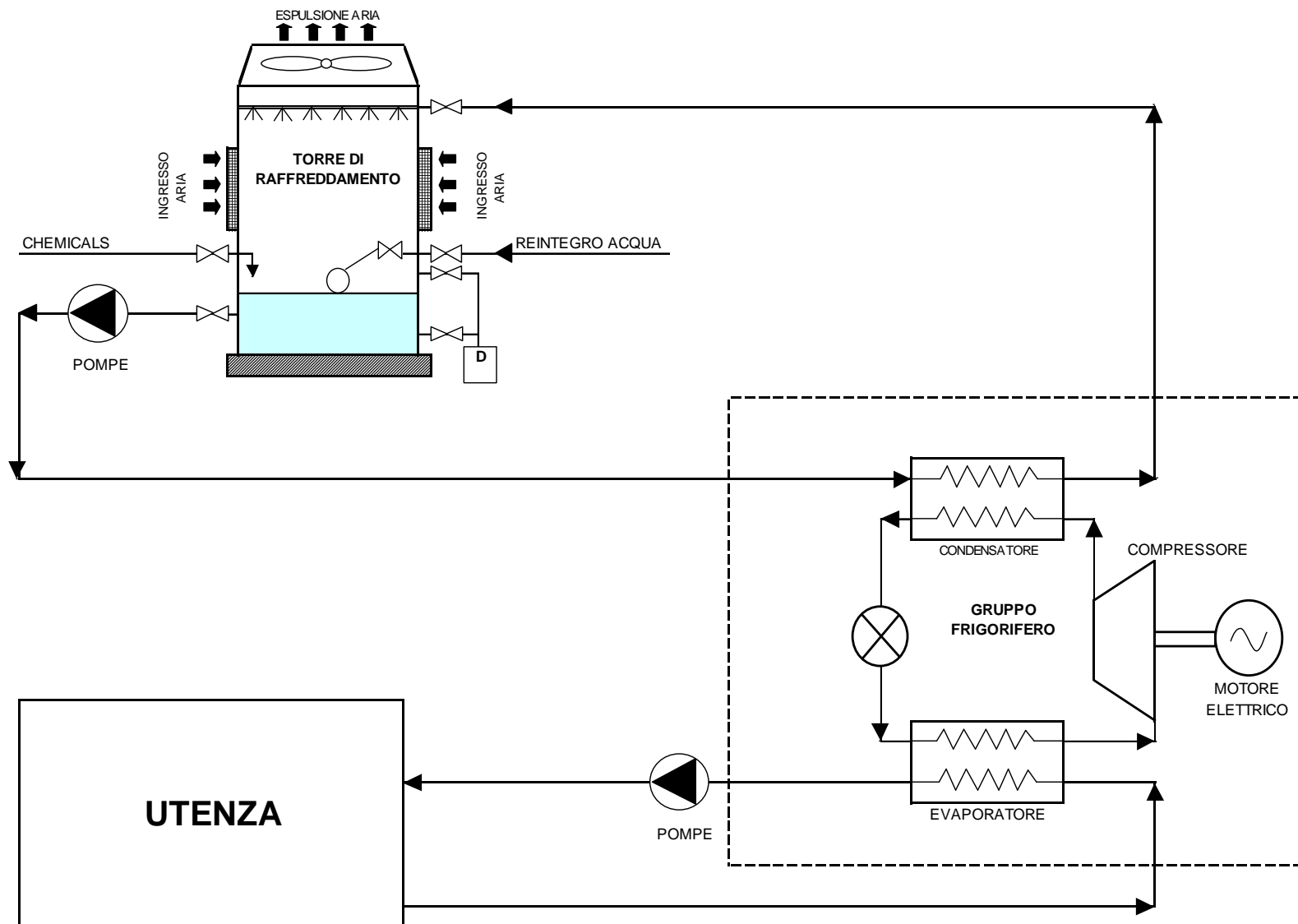
**ESEMPIO DI DIAGRAMMA DI SCAMBIO TERMICO IN UN SISTEMA
FRIGORIFERO + TORRE DI RAFFREDDAMENTO**

TORRI DI RAFFREDDAMENTO

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO



SCHEMA FRIGORIFERO A COMPRESSIONE RAFFREDDATO AD ACQUA CON TORRE DI RAFFREDDAMENTO



FRIGORIFERO A COMPRESSIONE

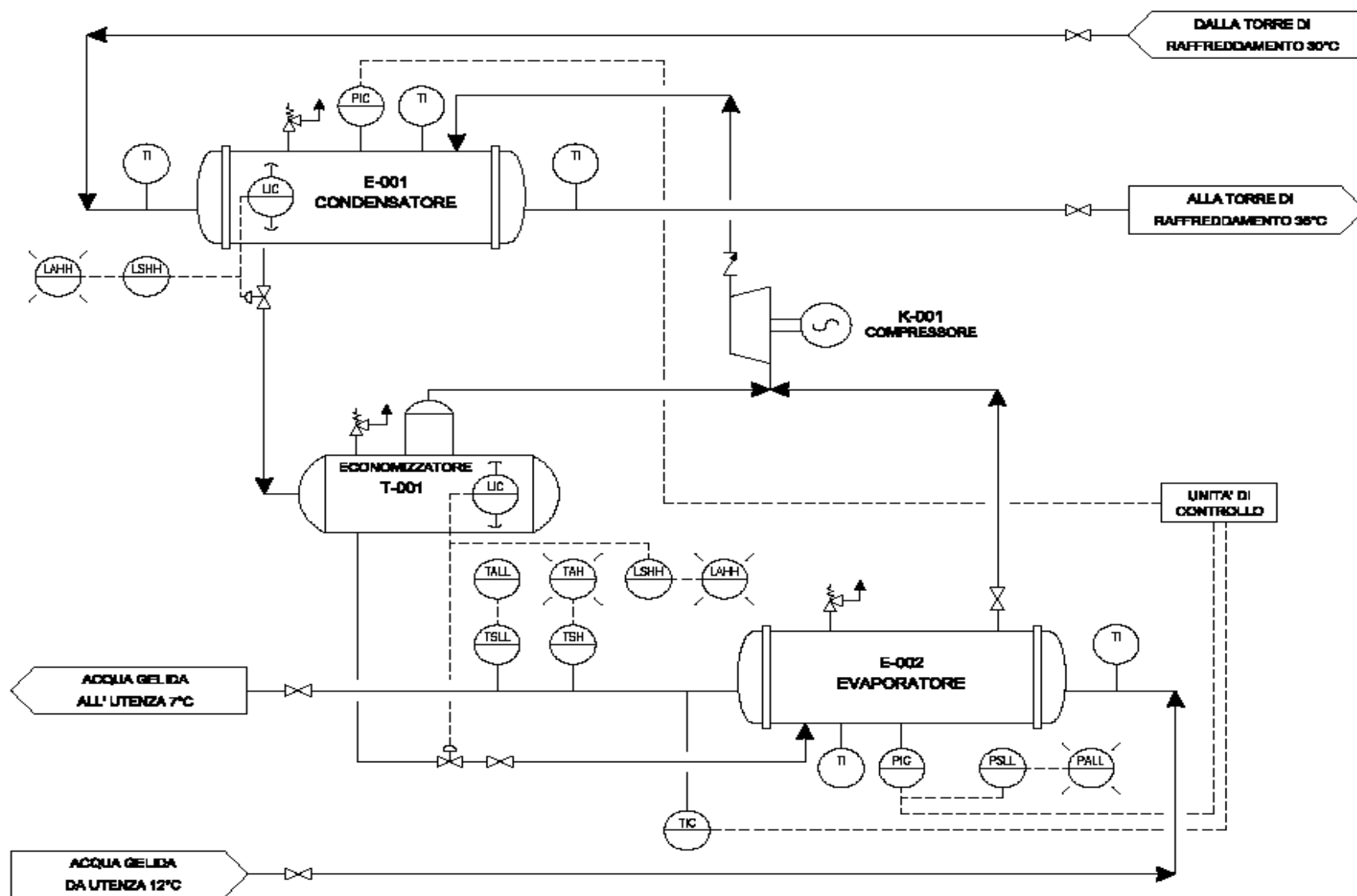
SISTEMI DI RAFFREDDAMENTO AD ARIA / ACQUA

DIMENSIONI E COSTO FRIGO: MAGGIORI SE RAFFREDDATO AD ARIA

DIMENSIONI E COSTO IMPIANTO COMPLETO: MAGGIORI SE RAFFREDDATO AD ACQUA, PERCHE' INCLUDE ANCHE UNA TORRE DI RAFFREDDAMENTO

EFFICIENZA (COP): MAGGIORE RAFFREDDATO AD ACQUA

GRUPPO FRIGORIFERO A COMPRESSIONE RAFFREDDATO AD ACQUA P&I TIPICO



FRIGORIFERO AD ASSORBIMENTO

IL FRIGORIFERO AD ASSORBIMENTO SI DIFFERENZIA DAL FRIGORIFERO A COMPRESSIONE ESSENZIALMENTE PER LA FASE DI COMPRESSIONE

NEL CICLO A COMPRESSIONE, IL VAPORE DEL FLUIDO DI LAVORO DEL CICLO VIENE PORTATO DALLA PRESSIONE MINIMA ALLA PRESSIONE MASSIMA DEL CICLO MEDIANTE COMPRESSIONE

NEL CICLO AD ASSORBIMENTO, IL VAPORE IN USCITA DALL'EVAPORATORE VIENE FATTO ASSORBIRE IN UN LIQUIDO; QUEST'ULTIMO, CON UNA POMPA, SUBISCE L'INCREMENTO RICHIESTO DI PRESSIONE DA QUELLA MINIMA A QUELLA MASSIMA DEL CICLO. POI AVVIENE LA SEPARAZIONE DEI DUE FLUIDI

NEL CICLO AD ASSORBIMENTO, IL LAVORO DA INTRODURRE NEL CICLO E' FORTEMENTE RIDOTTO RISPETTO AL CASO DI CICLO A COMPRESSIONE, MA SI RENDE NECESSARIA L'INTRODUZIONE DI ENERGIA TERMICA AD UNA TEMPERATURA PIUTTOSTO ELEVATA

FRIGORIFERI AD ASSORBIMENTO TERMODINAMICA

COEFFICIENTE DI PRESTAZIONE PER IL CICLO AD ASSORBIMENTO:

$$\text{COP} = Q_E / Q_G$$

Q_E = ENERGIA TERMICA SOTTRATTA ALL'UTENZA (E = EVAPORATORE)

Q_G = ENERGIA TERMICA CONSUMATA (G = GENERATORE)

PER GRUPPI MONOSTADIO: $\text{COP} = 0,65 - 0,70$

PER GRUPPI BISTADIO: $\text{COP} = 1,10 - 1,20$

CON UN CIRCUITO FACENTE CAPO AD UNA TORRE DI RAFFREDDAMENTO,
BISOGNA ASPORTARE CALORE Q_T :

$$Q_T = Q_E + Q_G$$

TIPOLOGIE DI FRIGORIFERI AD ASSORBIMENTO

I FLUIDI CHE SI UTILIZZANO PER CICLI AD ASSORBIMENTO SONO PRINCIPALMENTE:

- ACQUA + BROMURO DI LITIO
- ACQUA + AMMONIACA

I FRIGORIFERI AD ASSORBIMENTO SI DIFFERENZIANO A SECONDA DEL NUMERO DEGLI STADI:

- MONOSTADIO: ALIMENTAZIONE A 70-120°C
- BISTADIO: ALIMENTAZIONE A 160°C

IL TIPO DI ALIMENTAZIONE PUO' ESSERE :

- CON CALDAIA O COGENERAZIONE + FLUIDO TERMOVETTORE (ACQUA CALDA O SURRISCALDATA O VAPORE) SIA PER I CICLI MONOSTADIO CHE BISTADIO
- A FIAMMA DIRETTA (SOLO CICLI BISTADIO)

FRIGORIFERI: ECONOMICS

FRIGORIFERI A COMPRESSIONE:

- CON RAFFREDDAMENTO AD ACQUA IL COMPLESSO FRIGO + TORRE COSTA DI PIU' DEL SOLO FRIGO RAFFREDDATO AD ARIA
- IN COMPENSO, IL RAFFREDDAMENTO AD ACQUA CONSENTE COP PIU' ALTI E QUINDI MINORI COSTI DI ESERCIZIO
- CONFRONTARE IL RISPARMIO ANNUO COL MAGGIOR COSTO D'INVESTIMENTO

FRIGORIFERI A COMPRESSIONE VS. FRIGORIFERI AD ASSORBIMENTO:

- IL FRIGO AD ASSORBIMENTO HA UN COSTO D'INVESTIMENTO PIU' ALTO
- IN TERMINI DI COSTO DI ESERCIZIO, SI GIUSTIFICA SOLO SE PUO' USARE CALORE DI SCARTO (A COSTO PROSSIMO ALLO 0)
- IN TAL CASO, CONFRONTARE IL RISPARMIO ANNUO COL MAGGIOR COSTO D'INVESTIMENTO

FRIGORIFERI A COMPRESSIONE / ASSORBIMENTO CONFRONTO ECONOMICO

PREZZO ENERGIA ELETTRICA	
- E.E. USO CIVILE	20 - 30 €cent / kWh
- E.E. USO INDUSTRIALE	10 - 15 €cent / kWh

PREZZO COMBUSTIBILE (GAS)	
- GAS USO CIVILE	50 - 60 €cent/Sm ³
- GAS USO INDUSTRIALE	28 - 35 €cent/Sm ³
POTERE CALORIFICO INFERIORE GAS	9,6 kWh/Sm ³

RENDIMENTO CALDAIA	85%
--------------------	-----

COSTO ENERGIA FRIGO PER TIPO DI FRIGO:	COP	€cent/kWh
TARIFFE USO CIVILE		
• A COMPRESSIONE RAFFREDDATO AD ACQUA	4,00 - 5,00	4,00 - 5,00
• A COMPRESSIONE RAFFREDDATO AD ARIA	2,50 - 3,00	6,67 - 8,00
• ASSORBIMENTO MONOSTADIO	0,70 (*)	8,75 - 10,50
• ASSORBIMENTO BISTADIO	1,10 (*)	5,57 - 6,68
• ASSORBIMENTO A FIAMMA DIRETTA	0,95	5,48 - 6,58
TARIFFE USO INDUSTRIALE		
• A COMPRESSIONE RAFFREDDATO AD ACQUA	4,00 - 5,00	2,00 - 2,50
• A COMPRESSIONE RAFFREDDATO AD ARIA	2,50 - 3,00	3,33 - 4,00
• ASSORBIMENTO MONOSTADIO	0,70 (*)	4,90 - 6,13
• ASSORBIMENTO BISTADIO	1,10 (*)	3,12 - 3,90
• ASSORBIMENTO A FIAMMA DIRETTA	0,95	3,07 - 3,84

(*) DA MOLTIPLICARE PER IL RENDIMENTO DI CALDAIA 85% PER AVERE L'EFFICIENZA REALE

POMPA DI CALORE

LA POMPA DI CALORE E' UNA PARTICOLARE MODALITA' DI UTILIZZO DEL CICLO FRIGORIFERO, IN CUI LA MACCHINA SI SFRUTTA PER SOTTRARRE CALORE DA UNA SORGENTE A BASSA TEMPERATURA E RESTITUIRLO AD UN LIVELLO TERMICO PIU' ELEVATO, PER CONSENTIRNE L'EFFETTIVO UTILIZZO

IL VANTAGGIO DELLA POMPA DI CALORE STA NELLA SOTTRAZIONE DI CALORE AD UNA FONTE GRATUITA (ESEMPI: ACQUA DI LAGO O DI FIUME, ACQUA DEL SOTTOSUOLO, ECC.)

DAL PUNTO DI VISTA DELLA FUNZIONE SVOLTA, SI TRATTA QUINDI DI UN GENERATORE DI CALORE

NEL CASO IN CUI SI RIESCA ANCHE A SFRUTTARE L'EFFETTO FRIGORIFERO DOVUTO AL RAFFREDDAMENTO, SI HA UN IMPIANTO "TOTAL ENERGY"

POMPA DI CALORE - BILANCIO ENERGETICO - 1

PER LA SOTTRAZIONE DI ENERGIA TERMICA (Q_L) DALLA SORGENTE FREDDA, E' NECESSARIO INTRODURRE LAVORO (L). L'ENERGIA TERMICA Q_H RIVERSATA ALLA SORGENTE CALDA E'

$$Q_H = Q_L + L$$

IL COEFFICIENTE DI PRESTAZIONE (COP) DI UNA POMPA DI CALORE E' DATO DAL RAPPORTO FRA L'EFFETTO UTILE E LA SPESA ENERGETICA:

$$\text{COP} = Q_H / L$$

Q_H = POTENZA TERMICA COMPLESSIVA CEDUTA DAL CICLO ALLA SORGENTE CALDA O CIRCUITO DI UTILIZZO

L = POTENZA ELETTRICA ASSORBITA PER L'AZIONAMENTO DEL COMPRESSORE

POMPA DI CALORE - BILANCIO ENERGETICO - 2

DATO CHE LA POMPA DI CALORE UTILIZZA COME CALORE UTILE ANCHE IL LAVORO L FORNITO DAL COMPRESSORE, PER LO STESSO CICLO FUNZIONANTE COME POMPA DI CALORE O COME FRIGORIFERO SI HA:

$$\text{COP}_F = Q_L / L \quad \text{COP}_{\text{PDC}} = Q_H / L = (Q_L + L) / L = Q_L / L + 1$$

IN REALTA', LE MACCHINE UTILIZZATE NEI DUE CASI SONO DIVERSE, PERCHE' LE TEMPERATURE DA UTILIZZARE AL CONDENSATORE SONO DIVERSE, PER CUI ANCHE I VALORI DI Q_L / L NEI DUE CASI SONO DIVERSI:

POMPA DI CALORE: TEMPERATURA DELL'ACQUA IN USCITA DAL CONDENSATORE = 60-75°C → $Q_L / L = 2 - 3$ → $\text{COP} = Q_H / L = 3 - 4$

FRIGORIFERO: TEMPERATURA DELL'ACQUA IN USCITA DAL CONDENSATORE = 30-40°C → $\text{COP} = Q_L / L = 4,5 - 6,0$