

# MANUALE D'AUSILIO ALLA PROGETTAZIONE TERMOTECNICA

## IDRONICA



Cultura e Tecnica per Energia Uomo e Ambiente

© 2015 AiCARR

via Melchiorre Gioia, 168 - 20125 Milano

Tel. 02.6747.9270 - Fax 6747.9270

[www.aicarr.org](http://www.aicarr.org)

Prima edizione 2015

I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica, di riproduzione e di adattamento totale o parziale, con qualsiasi mezzo (microfilm, copie fotostatiche compresi), sono riservati per tutti i Paesi.

Nessuna parte di questo libro può essere riprodotta con sistemi elettronici, meccanici o altro senza l'autorizzazione scritta di AiCARR.

Si ringraziano le seguenti aziende per la gentile concessione dell'uso delle immagini e grafici presenti all'interno del volume:

BELIMO ITALIA srl, CALEFFI Spa; CGT Spa; FROLING Srl; HOVAL Srl; JOHNSON CONTROLS SYSTEMS AND SERVICE ITALY Srl; KLOBEN Sas; VIESSMANN Srl

Finito di stampare nel mese di Settembre 2015

Prodotto interamente realizzato in Italia

Codice ISBN: 978-88-95620-66-4

## PREFAZIONE

*Ho sempre ritenuto che una delle principali lacune culturali presente nell'ambito della progettazione degli impianti HVAC e idraulici in genere sia quella relativa a una approfondita e consapevole conoscenza dell'idronica, da intendersi non tanto come conoscenza dei criteri di dimensionamento dei circuiti idraulici, quanto piuttosto come conoscenza dei criteri relativi alla loro scelta e impostazione progettuale in relazione alle caratteristiche prestazionali e alle esigenze funzionali delle macchine, delle apparecchiature e dei terminali che tali reti sono chiamate a collegare e a rendere fra loro funzionanti nel migliore dei modi.*

*Solamente una mirata progettazione idronica delle reti termofluidiche garantisce, infatti, il corretto funzionamento degli impianti, consentendo ai sistemi di produzione energetica di operare senza rischio di avarie e nelle migliori condizioni di resa e ai sistemi di utenza di fornire le prestazioni attese in qualsiasi situazione di esercizio.*

*Alla luce di ciò, quando sono stato chiamato dal Past President Michele Vio a ricoprire per il triennio 2011-2013 il ruolo di Presidente della Commissione Comitati Tecnici, ho ritenuto che fra le molteplici iniziative di approfondimento e divulgazione culturale che la Commissione da me presieduta avrebbe dovuto cercare di portare a termine fosse molto importante inserire anche quella di redigere un "Manuale di idronica" che avesse lo scopo di illustrare in modo chiaro e completo non soltanto i principi dell'idronica, ma anche e soprattutto i suoi aspetti applicativi nell'ambito delle varie tipologie impiantistiche. In altre parole un manuale che, partendo dall'analisi delle molteplici problematiche di circuitazione idronica, caratteristiche di ciascuna macchina o apparecchiatura, spiegasse ai progettisti i motivi in base ai quali devono essere disegnate le relative reti idroniche di allacciamento e fornisse loro le corrette soluzioni progettuali sotto forma di schemi funzionali di principio.*

*Mi sono pertanto rivolto a un gruppo di amici che sapevo da sempre essere attenti cultori di questa specifica tematica, chiedendo loro di cimentarsi in quest'impresa. Eravamo agli inizi del 2011 e ricordo ancora bene che cosa disse con tutta la sua autorevolezza Alberto Cavallini nel corso della prima riunione: "è una sfida importante e faticosa che vale la pena di affrontare, a una condizione però: che ci si impegni tutti in prima persona". L'armiamoci e partite non era tollerato né tollerabile e così è stato.*

*Ci sono voluti più di quattro anni per pubblicare il manuale, non tanto perché i vari Autori non avessero le idee chiare su che cosa scrivere, quanto piuttosto perché trovassero il tempo di farlo, ma ora sfogliandolo non si può non essere tutti orgogliosi del lavoro svolto e più che convinti che valeva assolutamente la pena spendere energie in tal senso.*

*Quello che è stato prodotto è un testo di grande spessore e importanza, unico nel suo genere non soltanto a livello nazionale, ma anche internazionale. Un testo che tutti gli addetti ai lavori, e in particolare i progettisti, dovrebbero conoscere approfonditamente e tenere a portata di mano per farne quell'uso quotidiano per cui esso è stato volutamente e specificatamente pensato. Un testo da raccomandare e far subito imparare ai giovani che ambiscono a diventare progettisti di impianti meccanici.*

*E per concludere i ringraziamenti a nome di AiCARR e miei personali.*

*In primo luogo ad Adileno Boeche per la professionalità, l'impegno, la determinazione e, in molti casi, la caparbia con cui ha saputo svolgere il faticoso e ingrato compito del Coordinatore. E poi a tutti gli Autori e al Revisore per il bellissimo omaggio che essi fanno con questo volume all'Associazione, un dono prezioso non solamente in termini di sapere e conoscenza, che già di per sé non sarebbe poca cosa, ma di impegno e tempo sottratti alla famiglia, al lavoro e allo svago.*

Matteo Bo  
Presidente Commissione Comitati Tecnici AiCARR  
Triennio 2011-2013

Torino, Luglio 2015

## PRESENTAZIONE

Quando Alberto Cavallini, nell'ormai lontana primavera del 2011, mi parlò dell'iniziativa di Matteo Bo, a quel tempo presidente della Commissione Comitati Tecnici, di redigere in ambito AiCARR un manuale di idronica e mi propose di assumermi il ruolo di coordinare il gruppo di lavoro (allora non ancora individuato) che avrebbe dovuto scrivere il manuale, come avrei potuto rifiutare? E questo innanzitutto per il rapporto che mi legava (e mi lega tuttora) ad Alberto, che conoscevo da oltre quarant'anni, che era stato mio giovane insegnante durante gli studi universitari e poi mio correlatore di laurea, nonché, ora e da tempo, amico e socio nella società di ingegneria all'interno della quale entrambi operiamo; secondariamente, per l'interesse che ho sempre nutrito, e che era ben noto ad Alberto e a Matteo, per questa branca fondamentale della termotecnica che è l'idronica e che, nella mia lunga esperienza professionale, ho purtroppo constatato essere quasi sconosciuta ai più, anche per scarsità di letteratura tecnica specifica. Mi affascinò subito l'idea che il manuale prospettato potesse colmare questa grande lacuna, dal momento che, a quanto constava a tutti noi addetti ai lavori, mancava sul mercato a livello non solo nazionale, ma anche europeo, un'opera sufficientemente completa ed esaustiva su questo argomento.

Il gruppo di lavoro venne rapidamente costituito, coinvolgendo professionisti che, secondo Matteo, Alberto ed io, potevano essere da un canto interessati e, d'altro canto, assolutamente competenti quanto meno in alcuni settori specifici dell'idronica: la compagine fu quindi formata, oltre che da noi tre, da:

- l'ing. M. Stefano Venco (libero professionista)
- l'ing. Michele Vio (libero professionista, allora Presidente AiCARR)
- l'ing. Davide Elardo (società Belimo Italia)
- l'ing. Luca Alberto Piterà (segretario tecnico AiCARR)

ed anche da alcuni tecnici sia di una nota casa costruttrice di caldaie che di un altrettanto noto costruttore di pompe. Tutti costoro, peraltro, si defilarono abbastanza presto, per motivi dovuti ad altri impegni o anche di tipo diverso.

Il primo lavoro fu naturalmente quello di pensare un complesso organico e logico di argomenti da trattare e quindi di scrivere un primo indice degli argomenti stessi, ovvero dei capitoli, attribuendo poi a ciascun capitolo uno o più autori fra quelli costituenti il gruppo.

L'impresa cui ci accingevamo si prospettò subito complessa e lunga, anche e soprattutto per la difficoltà di coordinare personalità così diverse (anche come esperienze professionali), impegnate e operanti in luoghi spesso lontani fra loro, al fine di ottenere un risultato il più possibile completo e omogeneo come impostazione formale, livello di contenuti, grafica e così via.

Spero (ma saranno i lettori a valutarlo) che, con l'impegno e gli sforzi di tutti, ci siamo riusciti.

L'impostazione e i contenuti del volume possono essere riassunti come descritto nel seguito.

- Cap. 1: Principi fondamentali dell'idronica (A. Boeche). Si richiamano qui il Primo Principio della Termodinamica, il Teorema di Bernoulli ed i fondamenti di moto dei fluidi, illustrandone le principali applicazioni ai circuiti idronici aperti e chiusi.
- Cap. 2: Le pompe (A. Cavallini). L'argomento delle pompe centrifughe (e non solo) è trattato in modo particolarmente approfondito, partendo dai concetti basilari dei triangoli delle velocità e sviluppando con rigore scientifico i temi delle perdite energetiche, dei rendimenti, delle potenze, delle curve caratteristiche, delle pompe a velocità variabile e così via.
- Cap. 3: L'idronica di base dei circuiti chiusi (A. Boeche). Vengono illustrati gli schemi elementari e via via più complessi di circuiti primari e secondari, a spillamento e iniezione, a portata costante e variabile, con i relativi bilanci energetici (una serie di schede esemplificative risulta di grande comodità); viene infine sviluppato il tema degli edifici di grande altezza.
- Cap. 4: L'idronica di base dei circuiti aperti (A. Boeche). Strutturato come il precedente, questo capitolo riguarda i circuiti aperti idrosanitari (compresa la produzione di acqua calda sanitaria) e antincendio, i circuiti a servizio delle torri evaporative e quelli per gli edifici di grande altezza.
- Cap. 5: Corpi scaldanti e raffrescanti (M. Vio). Dopo alcuni richiami di trasmissione del calore vengono presi in esame i vari tipi di corpi scaldanti e raffreddanti, approfondendone le caratteristiche funzionali e le relazioni fra emissione termica, portata d'acqua e temperature di lavoro.
- Cap. 6: Le valvole di regolazione (D. Elardo). Il capitolo illustra le valvole di regolazione, le loro caratteristiche, il loro comportamento e i concetti ad esse correlati.

- *Cap. 7: Comportamenti dei circuiti regolati con valvole a due o tre vie (D. Elardo). Vengono qui considerati i circuiti idronici regolazione a tre vie (ovvero a portata sostanzialmente costante) e a due vie (a portata variabile), scendendo nei particolari del loro funzionamento e della relativa ottimizzazione.*
- *Cap. 8: Le problematiche idroniche dei generatori di calore a combustione (M. Bo, M. Vio). Il capitolo affronta le principali (e non solo queste) questioni idroniche riguardanti le caldaie (a condensazione e non) ed i cogeneratori, fornendo preziose indicazioni per i progettisti.*
- *Cap. 9: Le problematiche idroniche degli impianti solari termici (L. A. Piterà). L'idronica di questi impianti, che spesso viene trascurata, è qui illustrata ed approfondita in modo chiaro e completo, mettendo anche in evidenza i problemi connessi a sovratemperature, rischi di gelo, ecc.*
- *Cap. 10: Le problematiche idroniche dei refrigeratori d'acqua e pompe di calore (M. Vio). Analogamente al caso dei generatori di calore, vengono qui presi in considerazione, sotto il profilo idronico, i gruppi refrigeratori e le pompe di calore, con i relativi possibili schemi di collegamento e di distribuzione alle utenze, sviluppando gli argomenti legati alle portate d'acqua, alle temperature di lavoro, al contenuto d'acqua degli impianti, ai serbatoi inerziali e così via. Vengono illustrati anche i principi di funzionamento delle "banche del ghiaccio".*
- *Cap. 11: Gli impianti ad anello d'acqua (M. S. Venco). Si tratta di impianti che pochi tecnici conoscono, ma che possono trovare un vasto campo di applicazioni, consentendo, se ben progettati, dei grandi risparmi energetici. E Stefano Venco li conosce bene!*
- *Cap. 12: Raccolta di schemi di principio di centrali termiche e frigorifere e d'impianti ad anello d'acqua (M. Bo, A. Boeche, A. Cavallini, L. A. Piterà, M. S. Venco, M. Vio). Si tratta di un'ampia raccolta di schemi funzionali di centrali, dei quali vengono illustrati e commentati il funzionamento e i vantaggi, ma anche gli elementi di criticità.*

*Completa il volume un'ampia appendice (a cura di M. Bo, A. Boeche, L. A. Piterà) comprendente dati tecnici, tabelle di calcolo, e così via.*

*E' davvero da sottolineare come l'opera, al di là dei contenuti concettuali e teorici, comprenda soprattutto il vasto "know-how" tecnico di tutti gli autori, di valore inestimabile in quanto frutto di anni di professione ad alto livello.*

*A tutti gli autori pertanto (nonostante i sacrifici e le arrabbiate ai quali mi hanno costretto e i grattacapi che mi hanno dato come coordinatore del gruppo di lavoro) vanno i miei vivi complimenti e sinceri ringraziamenti per l'impegno profuso e il risultato finale raggiunto.*

*Un "grazie" particolare desidero infine rivolgere a Mara Portoso, che con encomiabile spirito di sacrificio e abnegazione ha accettato l'oneroso ruolo di revisore finale della ragguardevole mole di materiale prodotto dai vari autori.*

*Adileno Boeche*

*Coordinatore e responsabile del Gruppo di Lavoro*

*Padova, Luglio 2015*

# INDICE

<b>CAPITOLO 1 - PRINCIPI FONDAMENTALI DELL'IDRONICA .....</b>	<b>1</b>
1.1 DEFINIZIONI E CONCETTI .....	1
1.2 IL PRINCIPIO DI CONTINUITÀ .....	2
1.3 IL PRIMO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA.....	3
1.4 IL TEOREMA DI BERNOULLI .....	5
1.5 CIRCUITI IDRONICI ELEMENTARI APERTI E CHIUSI .....	7
1.6 IL MOTO "REALE" DELL'ACQUA NELLE TUBAZIONI .....	11
1.6.1 Generalità .....	11
1.6.2 Il moto laminare .....	11
1.6.3 Il moto turbolento .....	12
1.7 GLI ATTRITI NEI CIRCUITI IDRONICI .....	13
1.7.1 Generalità sugli attriti .....	13
1.7.2 Le perdite di carico distribuite; il fattore di attrito .....	13
1.7.3 Le perdite di carico concentrate (o accidentali) .....	16
1.8 CURVE CARATTERISTICHE DEI CIRCUITI IDRONICI; CIRCUITI IN PARALLELO E IN SERIE .....	16
1.9 CENNI SULLE CURVE CARATTERISTICHE DELLE POMPE CENTRIFUGHE .....	20
1.10 IL PUNTO DI FUNZIONAMENTO NEL SISTEMA CIRCUITO-POMPA .....	21
1.10.1 Concetti fondamentali .....	21
1.10.2 Circuiti a caratteristica variabile .....	22
1.10.3 Pompe a velocità variabile .....	22
1.10.4 Pompe in parallelo .....	23
1.10.5 Pompe in serie .....	24

<b>CAPITOLO 2 - LE POMPE</b> .....	<b>26</b>
2.1 GENERALITÀ .....	26
2.2 LE POMPE VOLUMETRICHE .....	27
2.3 LE POMPE ROTODINAMICHE .....	32
2.3.1 Generalità.....	32
2.4 LE POMPE CENTRIFUGHE NELLE APPLICAZIONI HVAC .....	35
2.4.1 Le più comuni soluzioni costruttive .....	35
2.4.2 La caratteristica ideale (euleriana) di una girante centrifuga .....	38
2.4.3 La caratteristica reale di una pompa centrifuga. Rendimenti.....	40
2.4.4 Le leggi di affinità per le pompe centrifughe .....	46
2.4.5 Diagrammi a mosaico .....	46
2.4.6 Cavitazione. NPSH .....	47
2.4.7 Sulle condizioni operative delle pompe centrifughe.....	50
2.4.8 Pompaggio a portata variabile .....	52
2.4.9 Rendimento delle pompe centrifughe .....	62
2.4.10 Regolamenti europei sulla ecosostenibilità.....	65
2.4.11 Aspirazione da serbatoi aperti .....	69
2.4.12 Installazione delle pompe centrifughe.....	75
<b>CAPITOLO 3 - L'IDRONICA DI BASE DEI CIRCUITI CHIUSI</b> .....	<b>78</b>
3.1 ANDAMENTO DELLE PRESSIONI ENTRO UN CIRCUITO CHIUSO .....	78
3.1.1 Circuito con pompa inattiva.....	78
3.1.2 Circuito con pompa attiva .....	79
3.2 IL BILANCIAMENTO DEI CIRCUITI IDRONICI. FONDAMENTI.....	80
3.3 CIRCUITI IDRONICI ELEMENTARI.....	82
3.4 L'IDRONICA NEGLI EDIFICI DI GRANDE ALTEZZA.....	138
3.5 IL SEPARATORE IDRAULICO E L'ACCUMULO INERZIALE.....	140
3.6 L'ACCUMULO DI FREDDO .....	142
<b>CAPITOLO 4 - L'IDRONICA DI BASE DEI CIRCUITI APERTI</b> .....	<b>144</b>
4.1 INTRODUZIONE.....	144
4.2 RETI IDROSANITARIE .....	144

4.2.1	Generalità .....	144
4.2.2	Le reti di distribuzione dell'acqua fredda sanitaria .....	144
4.2.3	La produzione e distribuzione dell'acqua calda sanitaria (ACS).....	146
4.2.4	La questione "legionella" .....	148
4.2.5	Il caso degli edifici di grande altezza .....	150
4.3	RETI IDRICHE ANTINCENDIO .....	154
4.3.1	Generalità .....	154
4.3.2	Il caso degli edifici di grande altezza .....	156
4.4	CIRCUITI D'ACQUA DI RAFFREDDAMENTO CON TORRI EVAPORATIVE .....	157
4.4.1	Generalità .....	157
4.5	SISTEMI IDRONICI CON ACCUMULO (GENERALMENTE DI FREDDO) A PELO LIBERO, A PRESSIONE ATMOSFERICA.....	160
<b>CAPITOLO 5 - CORPI SCALDANTI E RAFFRESCANTI .....</b>		<b>163</b>
5.1	INTRODUZIONE.....	163
5.2	CENNI SULLA TRASMISSIONE DEL CALORE .....	163
5.2.1	Conduzione termica .....	163
5.2.1.1	Parete piana .....	164
5.2.1.2	Parete cilindrica .....	165
5.2.2	Convezione termica.....	165
5.2.2.1	Convezione forzata.....	166
5.2.2.2	Convezione naturale.....	167
5.2.3	Irraggiamento termico .....	169
5.2.3.1	Influenza della temperatura delle pareti nello scambio termico per irraggiamento.....	171
5.2.4	Scambio termico globale.....	172
5.2.5	Cenni sugli scambiatori di calore .....	174
5.3	TIPOLOGIE DEI TERMINALI D'IMPIANTO .....	177
5.3.1	Terminali a scambio prevalente per convezione naturale .....	177
5.3.2	Terminali a scambio per convezione forzata .....	177
5.3.3	Terminali a scambio prevalente per radiazione.....	177
5.3.4	Terminali a scambio misto.....	177
5.4	CRITERI DI ACCOPPIAMENTO DEI TERMINALI AI GENERATORI .....	178
5.4.1	Funzionamento in riscaldamento .....	178

5.4.1.1	Accoppiamento con caldaie a condensazione.....	178
5.4.1.2	Accoppiamento con pompe di calore a compressione .....	178
5.4.1.3	Accoppiamento con pompe di calore a compressione a ciclo transcritico.....	181
5.4.1.4	Accoppiamento con pompe di calore ad assorbimento .....	182
5.4.1.5	Conclusioni sul funzionamento in riscaldamento.....	183
5.4.2	Funzionamento in raffreddamento .....	184
5.5	RADIATORI .....	184
5.5.1	Generalità .....	184
5.5.2	Curve prestazionali .....	185
5.5.3	Conclusioni sui radiatori.....	187
5.6	SISTEMI RADIANTI .....	187
5.6.1	Generalità .....	188
5.6.1.1	Potenza termica scambiata per irraggiamento .....	188
5.6.1.2	Potenza termica scambiata per convezione .....	189
5.6.2	Funzionamento in raffrescamento .....	190
5.6.2.1	Sistema a soffitto .....	190
5.6.2.2	Sistema a pavimento .....	193
5.6.3	Funzionamento in riscaldamento .....	193
5.6.3.1	Sistema a soffitto .....	194
5.6.3.2	Sistema a pavimento .....	194
5.7	BATTERIE DI SCAMBIO TERMICO.....	195
5.7.1	Scambio termico nelle batterie: analisi semplificata .....	195
5.7.2	Generalità .....	199
5.7.3	Funzionamento in raffrescamento e deumidificazione.....	200
5.7.3.1	Variazione della temperatura d'immissione dell'acqua .....	201
5.7.3.2	Variazione di portata d'acqua .....	202
5.7.4	Funzionamento in riscaldamento .....	203
5.8	TRAVI FREDE.....	203
5.8.1	Funzionamento in raffrescamento .....	204
5.8.2	Funzionamento in riscaldamento .....	204

<b>CAPITOLO 6 - VALVOLE DI REGOLAZIONE .....</b>	<b>205</b>
6.1 GRANDEZZE FONDAMENTALI .....	205
6.1.1 Curva caratteristica di regolazione .....	206
6.1.2 Caratteristiche principali delle valvole di regolazione .....	209
6.2 IL $K_{vs}$ E IL METODO DI SELEZIONE DELLA VALVOLA .....	210
6.2.1 Definizione e misura del $K_{vs}$ .....	210
6.2.2 Selezione della valvola a partire dal $K_{vs}$ .....	211
6.3 TIPOLOGIE DI VALVOLE .....	212
6.4 DISPOSITIVI DI CONTROLLO E COLLEGAMENTO ALLA REGOLAZIONE .....	216
6.4.1 Segnali elettrici di pilotaggio e comunicazione .....	216
6.4.2 Dispositivi aggiuntivi .....	218
<b>CAPITOLO 7 - COMPORTAMENTI DEI CIRCUITI REGOLATI CON VALVOLE A 2 O A 3-VIE .....</b>	<b>219</b>
7.1 AUTORITÀ DELLA VALVOLA DI REGOLAZIONE .....	219
7.2 PORTATA VARIABILE E PORTATA COSTANTE .....	220
7.3 GLI SCHEMI BASE DEI CIRCUITI IDRONICI REGOLATI .....	223
7.4 IL BILANCIAMENTO STATICO E DINAMICO DEI CIRCUITI .....	230
7.4.1 Bilanciamento statico nei circuiti a portata costante .....	230
7.4.2 Bilanciamento dinamico nei circuiti a portata variabile .....	232
7.4.3 Organi di bilanciamento .....	235
7.4.4 Valvole PICV (o autobilancianti) a bilanciamento statico/dinamico integrato .....	237
7.5 ESEMPI NUMERICI DI SELEZIONE DELLA VALVOLA .....	239
7.5.1 Diagrammi di selezione delle valvole .....	240
7.5.2 Selezione delle valvole per impianti a portata costante .....	242
7.5.3 Selezione delle valvole per impianti a portata variabile .....	243
7.6 CRITICITÀ E ASPETTI ENERGETICI NELLA REGOLAZIONE DEI CIRCUITI .....	245
7.6.1 Importanza del funzionamento ai carichi parziali .....	245
7.6.2 Autorità, rapporto di regolazione e implicazioni sul $\Delta t$ del circuito .....	246
7.6.3 Il bilanciamento e sua relazione con l'efficienza dell'impianto idronico .....	248
7.6.4 Trafilamento e problemi di ricircolazione fluido caldo-freddo .....	250
7.6.5 Risparmio energetico e valutazioni economiche .....	251

<b>CAPITOLO 8 - LE PROBLEMATICHE IDRONICHE DEI GENERATORI DI CALORE A COMBUSTIONE .....</b>	<b>253</b>
8.1 INTRODUZIONE .....	253
8.2 LE CALDAIE PER PRODUZIONE DI ACQUA CALDA .....	253
8.2.1 Problematiche di funzionamento in relazione al livello termico.....	253
8.2.1.1 La condensazione dei fumi nelle caldaie alimentate con idrocarburi.....	253
8.2.1.2 I vantaggi della condensazione dei fumi nelle caldaie alimentate con idrocarburi .....	257
8.2.1.3 Gli svantaggi della condensazione dei fumi nelle caldaie alimentate con idrocarburi .....	259
8.2.1.4 La condensazione dei fumi nelle caldaie alimentate con biomassa .....	259
8.2.1.5 Gli shock termici .....	261
8.2.2 Tipologie di caldaie alimentate con idrocarburi.....	261
8.2.2.1 Le caldaie standard .....	262
8.2.2.2 Le caldaie a bassa temperatura .....	263
8.2.2.3 Le caldaie a condensazione .....	266
8.2.3 I sistemi di controllo e regolazione dei moderni generatori di calore .....	270
8.2.4 Accorgimenti idronici volti a evitare la condensazione.....	271
8.2.4.1 Controllo della temperatura minima del ritorno realizzato direttamente tramite il sistema di regolazione della caldaia	271
8.2.4.2 Aumento della temperatura del ritorno realizzato mediante pompa di miscelazione comunemente denominata Pompa anticodensa.....	272
8.2.4.3 Aumento della temperatura del ritorno realizzato mediante pompa di miscelazione più valvola miscelatrice a 3-vie...	274
8.2.4.4 Aumento della temperatura del ritorno negli impianti con circuito primario di caldaia e circuiti secondari di utenza (im- pianti con separatore idraulico) realizzato con valvola miscelatrice a 3-vie .....	275
8.2.5 Accorgimenti idronici volti a massimizzare la condensazione .....	276
8.2.6 Problematiche di funzionamento in relazione alla portata .....	278
8.2.7 Disaccoppiamento idronico mediante circuiti primari/secondari: il separatore idraulico .....	279
8.2.7.1 L'impiego del separatore idraulico nel caso di impianti con caldaie a condensazione .....	284
8.2.7.2 L'impiego del separatore idraulico nel caso di impianti con caldaie tradizionali .....	285
8.2.8 Le condizioni di funzionamento dei generatori di calore ad acqua calda .....	286
8.2.9 Considerazioni conclusive .....	287
8.3 I COGENERATORI CON MOTORI ENDOTERMICI ALTERNATIVI .....	288
8.3.1 Premessa.....	288
8.3.2 Principali fonti di recupero calore di un cogeneratore.....	289
8.3.3 Livelli termici di recupero calore di un cogeneratore.....	291
8.3.4 La trigenerazione in regime estivo .....	295

8.3.4.1	Modalità di accoppiamento fra cogeneratori e gruppi frigoriferi ad assorbimento .....	296
8.3.4.2	Utilizzo dei gruppi frigoriferi ad assorbimento come pompe di calore .....	299
8.3.5	Collegamenti idronici degli impianti di cogenerazione e trigenerazione .....	301
8.3.5.1	Collegamento dei cogeneratori al circuito di produzione dell'energia termica.....	302
8.3.5.2	Collegamento dei gruppi frigoriferi ad assorbimento al circuito acqua calda (lato generatore).....	303
8.3.5.3	Collegamento dei gruppi frigoriferi ad assorbimento al circuito acqua refrigerata (lato evaporatore) .....	304
8.3.5.4	Collegamento dei gruppi frigoriferi ad assorbimento a impianti con circuiti secondari acqua refrigerata a Portata costante.....	304
8.3.5.5	Collegamento dei gruppi frigoriferi ad assorbimento a impianti con circuiti secondari acqua refrigerata a portata variabile .....	306
<b>CAPITOLO 9 - LE PROBLEMATICHE IDRONICHE DEGLI IMPIANTI SOLARI TERMICI .....</b>		<b>309</b>
9.1	INTRODUZIONE .....	309
9.2	COLLETTORI SOLARI .....	309
9.2.1	Generalità .....	309
9.2.2	Rendimento di un collettore solare .....	309
9.2.3	Collettori solari piani vetrati .....	311
9.2.3.1	Modificatore dell'angolo di incidenza .....	313
9.2.4	Collettori solari sottovuoto .....	315
9.2.5	Collettori CPC (Compound Parabolic Concentrator) .....	317
9.3	TIPOLOGIE D'IMPIANTI SOLARI .....	321
9.3.1	Generalità .....	321
9.3.2	Impianti a circolazione forzata .....	321
9.3.3	Impianti a circolazione naturale .....	322
9.3.4	Impianti solari a circolazione naturale e impianti solari a circolazione forzata – Schemi .....	323
9.4	SISTEMI DI ACCUMULO .....	323
9.4.1	Accumulo termico .....	323
9.4.2	Sistemi di accumulo pressurizzati .....	326
9.4.2.1	Materiali impiegati nei serbatoi di accumulo .....	329
9.4.2.2	Serbatoi di accumulo per l'acqua calda sanitaria .....	329
9.4.2.3	Caratteristiche costruttive di un serbatoio solare .....	330
9.4.2.4	Alcune soluzioni specifiche .....	332

9.5 SISTEMI DI CONTROLLO .....	335
9.5.1 Generalità .....	335
9.5.2 Controllo della temperatura differenziale .....	335
9.6 FASI DI STAGNAZIONE IMPIANTI SOLARI TERMICI .....	339
9.6.1 Generalità .....	339
9.6.2 Fase di stagnazione dei collettori .....	339
9.6.3 Fasi critiche .....	340
9.6.4 Dinamica di svuotamento dei collettori .....	341
9.6.5 Sistemi a svotamento o Drainback del circuito primario .....	344
9.7 REQUISITI IGIENICI PER L'ACQUA CALDA SANITARIA .....	348
9.7.1 Generalità .....	348
9.7.2 Legionella .....	348
9.7.2.1 Aspetti generali .....	348
9.7.2.2 Sintomi dell'infezione .....	348
9.7.2.3 Impianti idronici a rischio.....	349
9.7.2.4 Controllo della Legionella.....	349
9.7.2.5 Controllo della Legionella negli impianti solari .....	351
9.8 PROGETTAZIONE IMPIANTI SOLARI .....	351
9.8.1 Generalità .....	351
9.8.2 Configurazione campo solare .....	352
9.8.2.1 Serie e parallelo .....	352
9.8.2.1.1 Collettori in serie a 2 attacchi .....	352
9.8.2.1.2 Collettori in serie a 4 attacchi .....	353
9.8.2.1.3 Collettori orizzontali in serie a 2 attacchi .....	354
9.8.2.2 Influenza della disposizione in schiera dei collettori .....	355
9.8.3 Componenti d'impianto .....	356
9.8.3.1 Vaso di espansione chiuso .....	359
9.8.3.1.1 Calcolo secondo la raccomandazione ISPESL .....	359
9.8.3.1.2 Dimensionamento del vaso di espansione .....	359
9.8.3.1.3 Metodo empirico per il dimensionamento del vaso di espansione .....	361
9.8.3.1.4 Dimensionamento delle valvole di sicurezza .....	361
9.8.3.1.5 Dimensionamento delle tubazioni dell'impianto solare termico .....	362

9.8.3.1.6 Dimensionamento del vaso di drainback .....	363
9.8.3.1.7 Dimensionamento specifico delle tubazioni .....	365
9.8.3.1.8 La portata del circuito primario .....	366
9.8.4 Caricamento impianto e messa in funzione .....	367
<b>CAPITOLO 10 - LE PROBLEMATICHE IDRONICHE DI REFRIGERATORI D'ACQUA E POMPE DI CALORE .....</b>	<b>368</b>
10.1 PARAMETRI CHE INFLUENZANO L'EFFICIENZA ENERGETICA DEI GRUPPI FRIGORIFERI .....	368
10.1.1 Temperatura della sorgente fredda e del ricettore caldo.....	368
10.1.2 Parzializzazione dei circuiti frigoriferi.....	369
10.1.3 Contenuto d'acqua dell'impianto.....	369
10.2 LA REGOLAZIONE DELLE MACCHINE FRIGORIFERE .....	370
10.2.1 Il bilancio energetico dell'impianto .....	370
10.2.2 Stadi della regolazione.....	370
10.2.3 La regolazione dell'ambiente .....	371
10.2.4 Logiche di regolazione dei gruppi frigoriferi/pompe di calore.....	371
10.2.4.1 Regolazione della temperatura dell'acqua refrigerata sulla mandata e/o sul ritorno .....	371
10.2.4.2 La precisione del controllo della temperatura dell'acqua refrigerata prodotta dal gruppo frigorifero .....	372
10.3 CRITICITÀ DELLE MACCHINE FRIGORIFERE A COMPRESSIONE .....	374
10.3.1 Variazione di portata d'acqua negli scambiatori.....	375
10.4 CRITICITÀ DELLE MACCHINE FRIGORIFERE AD ASSORBIMENTO .....	375
10.5 COME GARANTIRE I TEMPI DI FUNZIONAMENTO DEL COMPRESSORE: INERZIA TERMICA DELL'IMPIANTO .....	375
10.5.1 Il contenuto d'acqua dell'impianto.....	376
10.5.2 Esigenze particolari delle pompe di calore ad inversione di ciclo .....	377
10.5.3 Il contenuto d'acqua dei circuiti di recupero parziale .....	377
10.5.4 Il contenuto d'acqua dei circuiti di recupero totale .....	378
10.5.5 Il contenuto d'acqua dei circuiti di condensazione dei gruppi frigoriferi acqua-acqua .....	378
10.5.6 Il contenuto d'acqua del circuito lato sorgente delle pompe di calore acqua – acqua .....	378
10.5.7 Il concetto di volume efficace .....	378
10.5.8 Calcolo del volume del serbatoio di accumulo inerziale .....	379
10.5.9 Influenza del tempo di risposta della regolazione .....	379
10.5.10 Strategie di dimensionamento del contenuto d'acqua dell'impianto.....	380
10.5.10.1 Considerazioni sull'importanza dell'inerzia termica dei circuiti idraulici.....	380

10.5.10.2	Contenuto d'acqua e regolazione dei terminali d'impianto.....	380
10.5.10.3	Contenuto d'acqua e regolazione dei gruppi frigoriferi.....	381
10.5.10.4	Quali obiettivi porsi e come raggiungerli .....	381
10.6	COME ASSICURARE LA COSTANZA DI PORTATA D'ACQUA.....	382
10.6.1	Unico circuito idraulico (senza disaccoppiamento).....	382
10.6.2	Circuito primario disaccoppiato dal circuito secondario .....	382
10.6.2.1	La formazione di miscela tra circuito primario e circuito secondario .....	383
10.6.2.2	Cosa si può fare per controllare il fenomeno della miscela .....	384
10.6.2.3	Cosa non si deve assolutamente fare per controllare il fenomeno della miscela .....	384
10.6.2.4	Entità del fenomeno della miscela .....	384
10.6.3	Impianti con circuito secondario a portata variabile .....	385
10.6.3.1	Circuito di utenza a portata variabile interconnesso a un circuito primario a portata costante: utilizzo di un'unica Pompa .....	385
10.6.3.2	Vantaggi dei circuiti secondari a portata variabile.....	385
10.6.4	Variazioni di portata sui gruppi frigoriferi a causa di transitori di regolazione .....	387
10.6.4.1	Inserimento di una valvola di non ritorno sul disconnettore idraulico (ramo di sfioro) .....	387
10.6.4.2	Gruppi frigoriferi in parallelo con pompa dedicata .....	388
10.6.4.3	Gruppi frigoriferi in parallelo con pompe comuni e valvole d'intercettazione .....	389
10.6.4.4	Gruppi frigoriferi in parallelo inseriti in un circuito primario con pompe a portata costante interconnesso a circuiti secondari a portata variabile (con o senza pompe) .....	389
10.7	IL POSIZIONAMENTO DEI SERBATOI DI ACCUMULO .....	390
10.7.1	Serbatoi inerziali .....	390
10.7.1.1	Posizionamento sulla tubazione di ritorno .....	390
10.7.1.2	Posizionamento sulla tubazione di mandata .....	391
10.7.1.3	Posizionamento sulla linea del disconnettore idraulico (ramo di sfioro) .....	392
10.7.1.4	Posizionamento come disconnettore idraulico (ramo di sfioro) .....	392
10.7.2	Serbatoi di stoccaggio dell'energia .....	392
10.7.2.1	Gruppo frigorifero in serie con accumulo di stoccaggio.....	393
10.7.2.2	Gruppo frigorifero in parallelo con l'accumulo di stoccaggio .....	396
10.7.2.3	Circuiti idraulici modificabili.....	397
10.7.2.4	Segnale di fine carica .....	398
10.7.2.5	Più gruppi frigoriferi a servizio di accumuli di stoccaggio .....	398
10.7.2.6	Ulteriori considerazioni .....	399

10.8 LA RIDUZIONE DELL'ENERGIA DI POMPAGGIO SUL CIRCUITO PRIMARIO .....	400
10.8.1 Circuiti primari a portata d'acqua variabile.....	400
10.8.1.1 Unica pompa per circuito primario e secondario .....	400
10.8.1.2 Pompe su circuito primario e secondario, entrambe a portata variabile.....	401
10.8.1.3 Ulteriori criticità: contenuto d'acqua efficace .....	402
10.8.1.4 Considerazioni energetiche .....	402
10.8.2 Circuiti primari a salto termico aumentato.....	402
10.8.2.1 Macchine frigorifere con scambiatori posti idraulicamente in serie .....	403
10.8.3 Circuiti idronici e macchine frigorifere combinati a doppio livello termico .....	403
10.9 LOGICHE DI CHIAMATA IN SEQUENZA DI PIU' GRUPPI FRIGORIFERI.....	404
10.9.1 Logiche di regolazione tradizionali.....	404
10.9.2 Logiche di sequenza proprietarie.....	406
10.9.3 La variazione del set-point.....	406
10.9.4 Strumenti in campo utili alla chiamata in sequenza dei gruppi frigoriferi .....	407
10.9.4.1 Impianti con primario a portata costante.....	407
10.9.4.2 Impianti con primario a portata variabile.....	408
10.9.5 Massimo numero di parzializzazioni possibili .....	408
10.10 CIRCUITI IDRAULICI PER IL RECUPERO DI CALORE .....	410
10.10.1 Il recupero di calore parziale .....	410
10.10.1.1 Circuiti idraulici per il recupero parziale.....	411
10.10.2 Il recupero di calore totale .....	411
10.10.2.1 Gruppi frigoriferi polivalenti a recupero totale.....	412
10.10.2.2 Circuiti idraulici per il recupero totale .....	415
10.11 CIRCUITI IDRAULICI DEI CONDENSATORI AD ACQUA.....	416
10.11.1 Circuiti per torri evaporative a circuito chiuso e dry-cooler.....	416
10.11.2 Circuiti per torri evaporative a circuito aperto .....	418
10.11.3 Circuiti per sorgenti termiche alternative (acquedotto, falda, mare, lago, fiume).....	420
<b>CAPITOLO 11 - LE PROBLEMATICHE IDRONICHE DEGLI IMPIANTI AD ANELLO D'ACQUA (WLHP) .....</b>	<b>422</b>
11.1 IL PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DEL SISTEMA.....	422
11.2 L'ANELLO D'ACQUA COME SORGENTE TERMICA ESTERNA .....	423
11.3 LE POMPE DI CALORE ACQUA-ARIA.....	423

11.3.1	Funzionamento in riscaldamento .....	424
11.3.2	Funzionamento in raffreddamento .....	425
11.3.3	Il funzionamento di un insieme di unità .....	426
11.3.3.1	In riscaldamento .....	426
11.3.3.2	In raffreddamento .....	426
11.3.3.3	Il funzionamento contrapposto .....	427
11.3.3.4	La temperatura dell'acqua dell'anello .....	429
11.3.4	La temperatura dell'acqua e l'affidabilità di funzionamento delle pompe di calore .....	429
11.3.4.1	La temperatura dell'acqua e l'efficienza delle pompe di calore .....	430
11.3.4.2	La temperatura dell'acqua e il sistema edificio/impianto .....	431
11.3.5	La portata dell'acqua .....	432
11.3.5.1	La portata d'acqua complessiva dell'impianto .....	433
11.3.5.2	La portata dell'acqua e l'affidabilità di funzionamento delle pompe di calore .....	433
11.3.5.3	La portata dell'acqua e l'efficienza delle pompe di calore e dell'impianto .....	433
11.3.6	Allacciamento idraulico delle pompe di calore .....	434
11.4	IL CIRCUITO IDRAULICO PRINCIPALE (ANELLO) .....	435
11.5	IL SISTEMA DI CIRCOLAZIONE .....	435
11.6	SISTEMI DI DISSIPAZIONE TERMICA .....	436
11.7	SISTEMI DI INTEGRAZIONE TERMICA .....	436
 <b>CAPITOLO 12 - SCHEMI IDRONICI DI PRINCIPIO CENTRALI DI PRODUZIONE ENERGETICA .....</b>		<b>438</b>
 <b>APPENDICE A PROPRIETA' TERMOFISICHE DELL'ACQUA .....</b>		<b>547</b>
<b>APPENDICE B TABELLA TUBAZIONI .....</b>		<b>552</b>
<b>APPENDICE C PERDITE DI CARICO DISTRIBUITE .....</b>		<b>561</b>
<b>APPENDICE D COEFFICIENTI <math>\xi</math> DELLE PERDITE DI CARICO CONCENTRATE .....</b>		<b>574</b>
<b>APPENDICE E CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DEI COLLETTORI DI CENTRALE .....</b>		<b>623</b>