

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Analytics per il monitoraggio energetico di centri sportivi e natatori: definizione del Tool attraverso tecniche di Machine Learning e Data Mining.



Relatore: Chia.mo Prof. Ing. Maurizio Schenone

Candidata: Rossana Carminati

Tutor aziendale: Chia.mo Ing. Raffaele Tardi

Analytics per il monitoraggio energetico di centri sportivi e
natatori: definizione del Tool attraverso tecniche di *machine
learning* e *data mining*.

Rossana Carminati

15 Dicembre 2020

Indice

1	L'azienda: HF s.r.l.	1
2	Monitoraggio e Targeting	6
2.1	Obbiettivi e strumenti di monitoraggio energetico	7
2.2	Normativa Italiana sull'uso razionale dell'energia: inquadramento normativo del monitoraggio energetico	10
2.3	Monitoraggio energetico di centri natatori e sportivi	15
3	Modi e metodi per lo sviluppo del Target di consumo energetico	18
3.1	Modelli predittivi	18
3.1.1	Modelli deterministici	19
3.1.2	Modelli <i>data-driven</i> : statistica e intelligenza artificiale	20
3.1.3	Modelli ibridi	21
3.1.4	Stato dell'arte nella predizione di consumo energetico	22
3.2	Identificazione del modello applicato al caso in esame	23
4	Centri natatori e polisportivi	26
4.1	Impianti caratteristici di un centro natatorio	26
4.1.1	Impianto di trattamento dell'acqua	26
4.1.2	Impianto elettrico	32
4.1.3	Impianto di climatizzazione	33
4.2	Normativa CONI	35
5	Analisi partizionale dei gruppi	38
5.1	Introduzione alle tecniche di <i>clustering</i> partizionale	39
5.2	Impostazioni preliminari per il <i>clustering</i> : selezione delle caratteristiche e rappresentazione dei dati	43
5.3	Clusterizzazione di serie temporali	44
5.3.1	Metriche per il <i>clustering</i> di serie temporali	46
5.3.2	Algoritmi per il <i>clustering</i> di serie temporali	49

5.3.3	Score Function	50
5.4	Clusterizzazione sulla base dei consumi energetici	51
5.5	Risultati finali del <i>clustering</i>	54
6	Definizione dei parametri aggregati per la stima dei target di consumo	58
6.1	Consumo di acqua	60
6.1.1	Acqua calda sanitaria	62
6.1.2	Acqua di approvvigionamento delle vasche	62
6.2	Assorbimento di energia elettrica	64
6.2.1	Assorbimento elettrico dell'illuminazione	65
6.2.2	Assorbimento elettrico delle pompe	66
6.2.3	Assorbimento elettrico dei ventilatori	67
6.2.4	Assorbimento elettrico dei gruppi frigo e pompe di calore	68
6.2.5	Assorbimento elettrico di macchine accessorie	69
6.3	Assorbimento di energia termica	70
6.3.1	Assorbimento di energia termica per il riscaldamento e/o il rinfrescamento degli ambienti	70
6.3.2	Assorbimento di energia termica per la ventilazione dell'edificio	74
6.3.3	Assorbimento di energia termica per il riscaldamento dell'acqua calda sanitaria . .	79
6.3.4	Assorbimento di energia termica per il riscaldamento dell'acqua di vasca	80
7	Reti neurali	82
7.1	Funzionamento di una rete neurale	82
7.2	ANN di classificazione per i consumi di centri sportivi	85
	Conclusioni e sviluppi futuri	90
A	Calcolo per la stima dell'energia fornita da fonti rinnovabili	93
A.1	Impianto solare-termico	93
A.1.1	Metodo F-Chart	94
A.1.2	Calcolo delle temperature medie esterne mensili	98
A.1.3	Calcolo dell'irradianza giornaliera media mensile	98
A.2	Impianto fotovoltaico	101
B	Valori di trasmittanza termica	104

Sommario

Dal 2014 in Italia è diventato obbligatorio, per le imprese ad alto consumo energetico, trasmettere all'ENEA¹ un documento chiamato diagnosi energetica prodotto da organismi competenti (EGE² o ESCO³). La diagnosi energetica analizza i profili disaggregati di consumo e individua, attraverso tecniche di analisi degli investimenti, soluzioni di efficientamento energetico. In questo contesto si inserisce l'obbligo di monitoraggio energetico, che vige a partire dalla seconda diagnosi energetica dell'impresa, al fine di ottenere delle valutazioni accurate riguardo i possibili interventi di risparmio. Nonostante questa pratica sia una spesa ormai obbligatoria per le attività energivore, in realtà determina ottimi risultati in termini economici, tanto da stimolare il mondo imprenditoriale a investire molto sull'analisi dei dati registrati dal monitoraggio (tecniche di *data analytics*). Nel caso delle strutture natatorie e sportive il processo di monitoraggio e analisi dei dati risulta particolarmente importante dato che i consumi energetici sono molto elevati e costituiscono circa il 30% dei costi totali dell'impresa.

Questo testo ha l'obiettivo di illustrare la realizzazione di un Tool Analitico di *monitoring & targeting* per strutture sportive. L'*Analytic Tool* - AT - in questione è stato sviluppato tramite tecniche di intelligenza artificiale e *data mining* sfruttando i dati di consumo dei centri natatori, raccolti negli anni dall'azienda HF s.r.l. di Milano che opera nel campo degli impianti e gestisce il monitoraggio energetico di svariati centri polisportivi in Italia.

La trattazione successiva è focalizzata sulla selezione e la manipolazione dei dati per la costruzione dei target dei consumi principali (energia elettrica, energia termica e acqua) mediante approcci *data-driven*. L'AT sarà programmato in modo che i gestori dei centri possano: (i) monitorare gli andamenti di gas, luce e acqua in tempo reale (*real time energy visibility*); (ii) confrontare i consumi ai rispettivi target stimati dalle reti neurali artificiali e (iii) ricevere avvisi automatici di diagnostica nel caso in cui i consumi superino il livello atteso (*Fault Detection*).

In questo modo, il management aziendale può sviluppare gestioni correttive nei periodi successivi, pianificare i corsi con criteri di razionalizzazione dell'energia e predire l'andamento economico dell'attività. Parallelamente l'area tecnica riuscirà a individuare eventuali perdite e malfunzionamenti in tempo reale, in modo da poter intervenire tempestivamente evitando il prolungarsi di sprechi energetici e sprechi di acqua, minimizzando gli eventuali danni che il malfunzionamento comporterebbe.

¹Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile.

²Esperto in Gestione dell'Energia: figura professionale certificata con codifica dalla norma tecnica UNI CEI 11339 capace di gestire l'uso dell'energia in modo efficiente.

³Energy Service Company: persona fisica o giuridica certificata con codifica dalla norma tecnica UNI CEI 11352 che fornisce misure di miglioramento dell'efficienza energetica nelle installazioni.

La decisione di implementare l'AT fondata su una rete neurale artificiale è stata una scelta strategica le cui ragioni risiedono in tre importanti considerazioni.

Innanzitutto, è possibile osservare che si tratta di un approccio ottimale in presenza di grandi quantità di dati, che aumenteranno sempre più per soddisfare le richieste normative legate all'efficienza energetica e grazie alla economicità dei sistemi elettronici in commercio (Building Management Systems - BMS - in campo civile e Supervisory Control And Data Acquisition System - SCADAS - in contesto industriale).

In secondo luogo, il settore del risparmio energetico è sottoposto a un'incalzante evoluzione delle normative e del mercato, da cui nasce la necessità di rendersi competitivi e sviluppare nuovi strumenti dinamici per il controllo e la manutenzione dei sistemi energetici. In particolare, le tecniche di intelligenza artificiale permettono un miglioramento continuo dei target con l'acquisizione ed elaborazione di nuovi dati.

Infine, è possibile notare che la funzionalità delle tecniche di *machine learning* si mostra quando risulta presente una inadeguatezza degli strumenti tradizionali che possono fornire solo delle stime approssimative.

In questo caso di studio l'interazione di parametri fisici-tecnologici con l'azione umana dell'utenza e dei gestori genera una distorsione fra la realtà e le predizioni teoriche basate su modelli tradizionali. L'azione umana in questo campo ha un effetto non trascurabile ma è difficile da modellizzare e prevedere a causa del suo comportamento non lineare. Attraverso l'utilizzo di una rete neurale la non linearità può essere valutata in funzione di alcuni parametri significativi.

La tesi è strutturata in sette capitoli: il primo presenta l'azienda sede del lavoro di tesi; il secondo introduce il monitoraggio energetico contestualizzandolo in campo normativo; il terzo espone lo schema logico del lavoro completo di opportune considerazioni al fine di motivare gli strumenti e i metodi adottati; il quarto riporta le caratteristiche di impianti e strutture di centri sportivi e natatori insieme alle normative di riferimento; il quinto illustra le tecniche di analisi partizionale dei gruppi e riporta i risultati del *clustering*, eseguito per individuare i profili di consumo energetico attraverso i quali istruire la *machine learning*; il sesto mostra le definizioni dei parametri aggregati per la stima del target di consumo; il settimo descrive in maniera qualitativa lo sviluppo della rete neurale eseguito dall'azienda Masvis srl, riportando i risultati quantitativi ottenuti dallo studio e gli sviluppi futuri dell'intero progetto.

Capitolo 1

L'azienda: HF s.r.l.

HF s.r.l. è una società a responsabilità limitata fondata a Milano nel 2012 da un team di professionisti con comprovate competenze nell'ambito dell'ingegneria e del management. La compagine societaria di HF s.r.l. è partecipata da soci privati e dal gruppo industriale Tuvia Group. Quest'ultima è una società d'investimento che opera per lo sviluppo delle proprie partecipate rispettando la loro autonomia gestionale.

Il modello di business di questa azienda è basato su tre principali elementi che si rispecchiano nella *governance* di HF. Il primo è aggiungere valore al business attraverso una visione imprenditoriale di lungo termine, attraverso l'adozione di processi innovativi e attraverso una disciplina finanziaria rigorosa. Il secondo si compone di un management in continua evoluzione al fine di stare al passo con i cambiamenti. Il terzo si concretizza nella gestione dell'incertezza attraverso l'organizzazione del futuro.

HF s.r.l. opera nel settore edile, energetico e degli impianti con una missione ambiziosa e composita, seguendo gli obiettivi di: sostenibilità ambientale, risparmio energetico, comfort abitativo e manutenzione intelligente. L'azienda fornisce consulenza e assistenza tecnica nel campo edile e termo-tecnico, in quello delle manutenzioni e dell'*energy management and saving*.

In più, propone una gamma di servizi *end-to-end*, completi di:

- analisi preliminari;
- ideazione di soluzioni innovative a basso impatto ambientale;
- creazione di un progetto personalizzato sulle necessità tecniche, amministrative, economiche e finanziarie del cliente;
- ottenimento dei permessi amministrativi di realizzazione e costruzione;
- erogazione del servizio nei tempi definiti;
- monitoraggio e accertamento qualitativo e quantitativo dei risultati conseguiti.



SEDE LEGALE e DIREZIONE GENERALE

HF s.r.l.

Via Conte Rosso, 36 | 20134 - Milano

PEC hf@mypec.eu

SEDI OPERATIVE

Milano

Via Conte Rosso, 36 | 20134 - Milano

MAIL info@accaeffe.it

TEL. +39 02 2641 6593 | FAX +39 02 8716 2566

Bari

S.P. 1 Bari-Modugno, 4 | 70026 - Modugno (BA)

MAIL hfsolutionsrl@pec.it

TEL. +39 080 2059 548 | FAX +39 02 8716 2566

Figura 1.1: Logo, sedi e contatti di HF s.r.l.

La filosofia aziendale di HF s.r.l. si compone di quattro elementi: l'identificazione di soluzioni semplici (*Think Simple*); la concretezza del lavoro commissionato (*Solid Work*); l'importanza di eliminare gli sprechi e ottimizzare i processi (*No Blast*); la responsabilità, il lavoro di squadra, la gentilezza, la disponibilità e la trasparenza (*Right Attitude*). Questi principi vengono applicati in tutte le business unit che compongono l'azienda (*innovation for engineering, innovation for general contract, innovation for facility management*) e, insieme alla qualità del lavoro svolto, rappresentano il valore aggiunto dell'azienda.

HF s.r.l. è dotata di certificazione di qualità (ISO 9001: 2015) nel settore dell'erogazione dei servizi di progettazione architettonica e impiantistica e di certificazione ISO UNI EN 11352 nel settore dell'erogazione dei servizi energetici. Inoltre, detiene i requisiti di certificazione F-Gas e FER per l'installazione e manutenzione impianti contenenti fluidi refrigeranti e a energia rinnovabile.

I centri natatori e sportivi che negli anni passati si sono affidati ad HF s.r.l. per il monitoraggio energetico sono 45, distribuiti per lo più nel nord Italia. Mostriamo in Figura 1.5 il numero di centri per regione. Le strutture natatorie e sportive verranno indicate con un codice alfanumerico che identifica unicamente la regione per una questione di privacy del cliente in questione (vedi Figura 1.4).

L'analisi è stata condotta su 36 strutture e sono stati valutati i risultati finali su 5. Le rimanenti 4 strutture sportive sono state escluse dall'analisi a causa della mancanza dei dati di consumo di più mesi come si può vedere dallo schema in Figura 1.3. Il monitoraggio energetico fornito dall'azienda sino ad oggi si è basato sulla registrazione dei consumi ogni 15 giorni e ha fornito ai clienti un trend di consumo basato sul *know-how* aziendale. Il target fornito, seppur indicativo, ha permesso di supportare con buoni risultati l'assistenza volta alla gestione e manutenzione degli impianti.



Figura 1.2: Corporate Identity.

Visti i vantaggi, HF s.r.l. ha deciso di investire ulteriormente sulla funzione di *energy monitoring and targeting* al fine di poter intervenire repentinamente sulle disfunzioni degli impianti e fornire degli strumenti significativi per il management aziendale dei centri natatori.

Elenchiamo infine alcuni dei principali clienti di HF srl: Deloitte Consulting, TDK Lambda France, Unicredit, CBRE, Idea Fimit, BNP Paribas Real Estate, Generali Real Estate, Cromwell Investments, Innovation Real Estate, DEA Capital SGR, Agire Group Real Estate, AON Hewitt Risk Consulting, KTM Sportmotorcycle, Gruppo In Sport, Sport Management SpA SSD, Savills, ENPAM, Logicor, Kryalos, Kervis Asset Management, ecc. . .

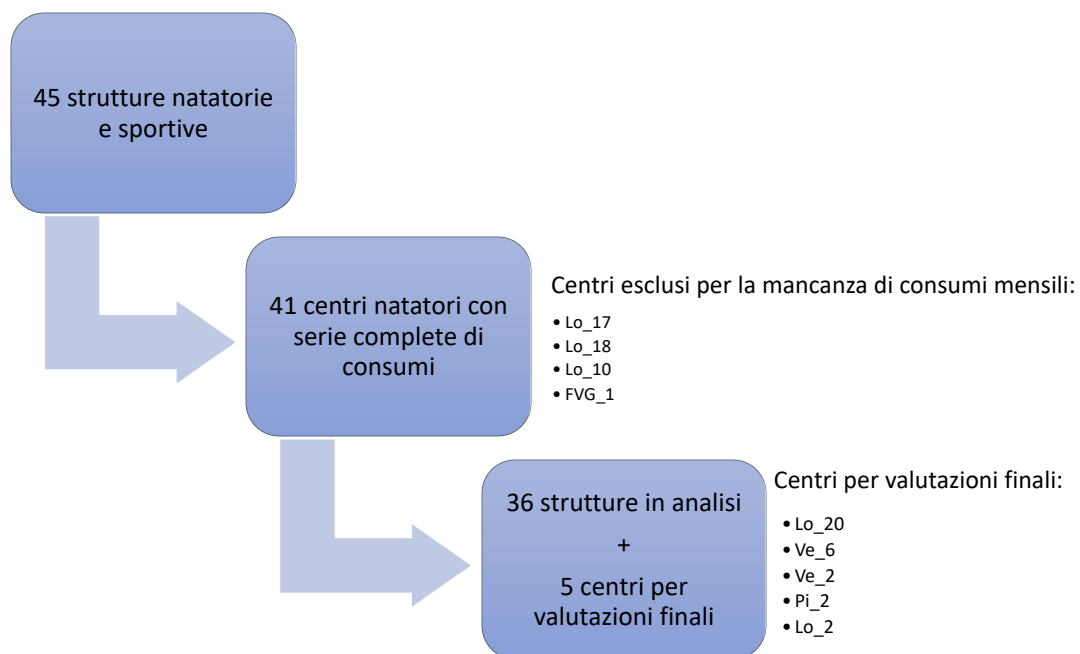


Figura 1.3: Schema dell'insieme di dati utili per la costruzione dell'Analytic Tool.

Lombardia	Emilia Romagna	Liguria	Toscana	Veneto	Friuli Venezia Giulia	Piemonte
☐ Lo ₁	☐ ER ₁	☐ Li ₁	☐ To ₁	☐ Ve ₁	☐ FVG ₁	☐ Pi ₁
☐ Lo ₂	☐ ER ₂	☐ Li ₂	☐ To ₂	☐ Ve ₂	☐ FVG ₂	☐ Pi ₂
☐ ...	☐ ER ₃	☐ Li ₃				
☐ Lo ₂₈						

Figura 1.4: Codici alfanumerici delle strutture natatorie e sportive.

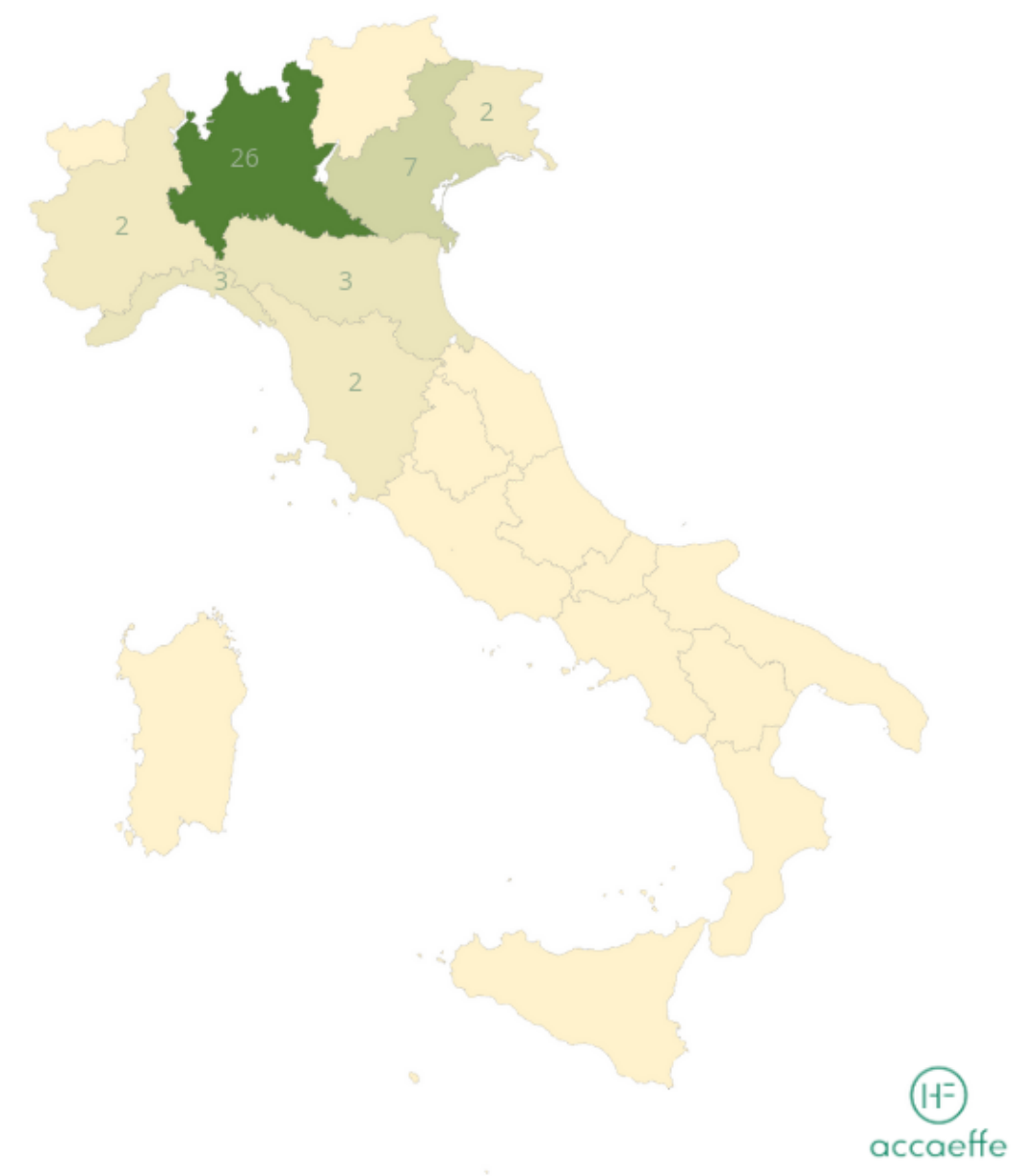


Figura 1.5: Mappa dei cetri natatori e sportivi.

Capitolo 2

Monitoraggio e Targeting

L'origine delle tecniche di gestione razionale dell'energia derivano storicamente dalla crisi energetica del 1973, quando il conflitto fra Israele da un lato e Egitto e Siria dall'altro determinò un embargo del petrolio verso USA e Europa da parte di tutti i paesi appartenenti all'OPEC. La crisi ebbe tre principali effetti; innanzitutto rese evidente l'instabilità del sistema produttivo occidentale interamente basato sul consumo di greggio proveniente da paesi politicamente instabili, in secondo luogo introdusse una nuova concezione nell'uso dell'energia determinata dall'esigenza di un utilizzo parsimonioso della risorsa e infine aprì la strada ad altre fonti energetiche (principalmente il gas naturale e l'energia atomica). In questa occasione, nei paesi europei e negli USA si avviarono programmi di *Austerity* per il risparmio energetico.

In Italia nel 1975 fu varato il primo documento di programmazione energetica con l'emanazione del Piano Nazionale e, il 30 aprile 1976, venne promulgata la Legge n.373, dove veniva introdotto il principio di risparmio energetico e venivano elencati i primi requisiti nella progettazione degli impianti e nell'isolamento termico degli edifici. Pochi anni dopo la prima crisi seguì un secondo shock petrolifero causato dalla rivoluzione islamica in Iran e dalla guerra fra Iran e l'Iraq (1980). L'evento portò un importante aumento del prezzo del greggio e proprio in quegli anni, per supplire alle necessità energetiche, in Inghilterra venne introdotto per la prima volta il monitoraggio energetico nel settore tessile, navale e nell'industria cartaria con lo scopo di individuare sprechi energetici nei settori industriali energivori. Le tecniche di *Monitoring and Targeting* (M&T) si sono progressivamente diffuse in Europa e negli Stati Uniti in svariati settori, non solo grazie ai promettenti risultati di risparmio energetico, ma anche grazie alle informazioni estrapolabili dai dati registrati e analizzati, utili al management, *financing and budgeting* aziendale.

La sensibilità agli sprechi energetici, alle emissioni di gas serra e di particolati inquinanti, oggi richiedono attività quali: l'introduzione di nuove tecnologie, l'ottimizzazione dei processi, la risoluzione repentina di malfunzionamenti o settaggi errati evitando che consumi inutili si prolunghino nel tempo. In questo contesto si inserisce il M&T che risulta ancora una pratica rilevante, che oggi viene integrata in sistemi di informazione di gestione energetica in tempo reale (*Energy Management Information System*, EMIS). In genere, il monitoraggio viene applicato in concomitanza all'installazione di sistemi automatici

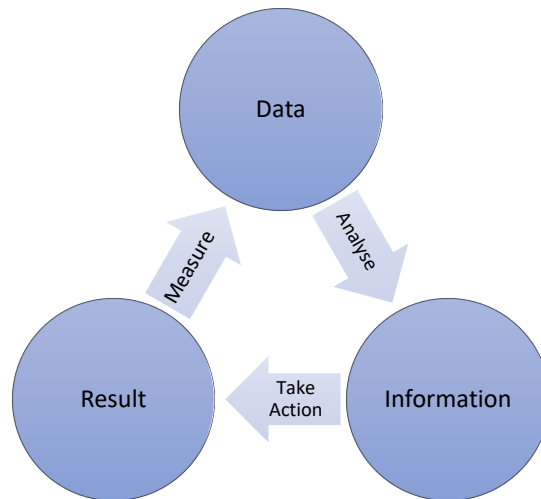


Figura 2.1: Step delle tecniche di Monitoring e Targeting.

di lettura dei consumi (Digital Thecnologies for Energy Management, DTEM) comunicanti con il sistema di informazione per la gestione dell'energia, in questo caso si parla di *Automatic Monitoring e Targeting* (aM&T).

Nel seguente capitolo riportiamo una breve panoramica che concerne le tecniche di M&T. Nella prima sezione si introduce il M&T definendone gli obbiettivi e descrivendone gli step fondamentali che è utile implementare. Nella seconda sezione si contestualizza il monitoraggio in base alle normative vigenti. Nell'ultima si approfondisce il tema del M&T per i centri natatori e sportivi con l'obiettivo di evidenziare l'importanza di questi strumenti nel campo dell'*energy management*.

2.1 Obbiettivi e strumenti di monitoraggio energetico

Il M&T è una tecnica utilizzata per la gestione razionale dell'energia con l'obbiettivo di registrare l'energia elettrica e/o termica entrante nel sistema analizzato e confrontarla con un valore di consumo target. Negli impianti più recenti, l'energia in ingresso viene campionata da sistemi di lettura automatici che garantiscono una frequenza di acquisizione costante dei dati. Il valore di target proposto dal sistema può derivare: da dati storici, da un modello teorico oppure da studi di regressione effettuati fra il consumo storico acquisito e i parametri che ne influenzano il valore complessivo (*driving factors*).

Il processo di monitoraggio inizia con l'individuazione dei sistemi di assorbimento elettrico e termico; a cui segue la fase di campionamento dei consumi. La frequenza di campionamento consigliata dalla letteratura è settimanale o superiore, affinché eventuali malfunzionamenti o scostamenti imprevisti

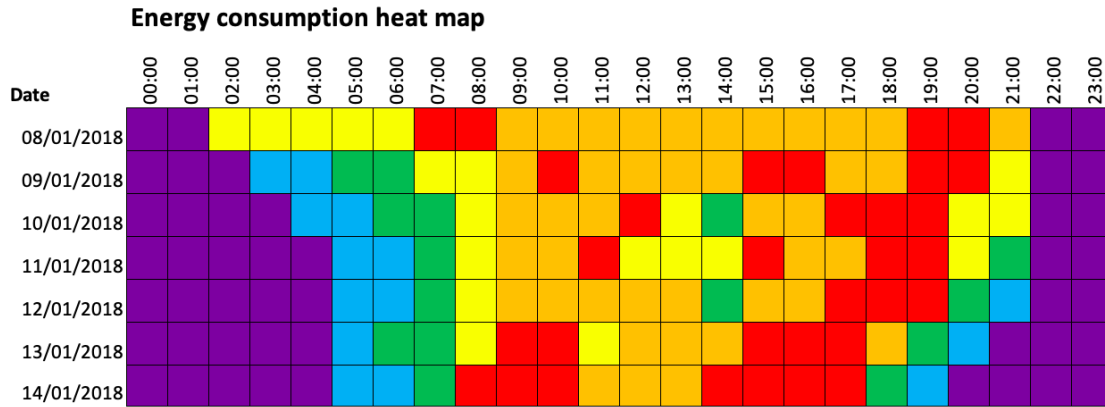


Figura 2.2: Energy consumption heat map.

possano essere diagnosticati in un tempo ragionevole, evitando il prolungarsi di una spesa immotivata. I dati raccolti dal sistema di lettura dei consumi sono analizzati al fine di evidenziare picchi di consumo non ordinari. Per svolgere questo procedimento, si confronta l'energia assorbita dal sistema con il valore atteso (target). Successivamente, individuati i periodi di sovra-consumo, l'area gestionale elimina quelli che combaciano con gestioni straordinarie; mentre l'area tecnica (responsabile del corretto funzionamento degli impianti e dei sistemi) investiga le anomalie rimanenti andando a ricercare le cause generatrici che possono essere sia di natura umana (per esempio l'errore di un operatore nel *setting* di un periodo di accensione di un impianto) che di natura meramente tecnica (malfunzionamento di un componente). Questo processo deve avanzare sotto la supervisione dell'Energy Manager e le informazioni in tempo reale devono essere rese disponibili al reparto tecnico affinché possa agire tempestivamente quando necessario. I risultati ottenuti vengono riassunti in un report con dati semestrali o annuali al fine di comunicare all'area del management gli indicatori di performance energetica sulla base dei quali potranno essere svolte le analisi economiche per gli investimenti futuri. Nel report possono essere incluse diverse informazioni e rappresentazioni grafiche. In genere, si trovano:

- il profilo di consumo energetico confrontato al target durante tutto il periodo analizzato;
- il rapporto fra consumo effettivo e quello atteso (che esprime contemporaneamente la bontà e l'efficacia del sistema di monitoraggio e la prestanza delle funzioni aziendali nell'individuazione e nella risoluzione dei problemi tecnici);
- la così detta *heat map* di consumo energetico (Figura 2.2) per evidenziare i periodi temporali in cui si hanno le maggiori perdite monetarie;
- l'*overspend league table* (Figura 2.3) dove vengono elencati, in ordine decrescente per assorbimento energetico, gli elementi costituenti l'impianto (o la linea di produzione) e viene riportato un colore - rosso, giallo o verde - per definire se il funzionamento è regolare o se si registrano assorbimenti maggiori non giustificati che portano complessivamente a superare la soglia limite di consumo.

Overspend league table			
	Overspend vs baseline (€)	Overspend vs baseline (kWh)	Within control limits?
Grinder	4.500	50.000	●
Extruder 3	3.700	41.333	●
Extruder 1	3.100	37.496	●
Chiller 1	2.300	25.674	●
Bioler 2	900	10.000	●
Mixer 3	700	7.000	●
Mixer 1	-100	2.089	●
Extruder 2	-780	-8.765	●
Mixer 2	-1.040	-12.586	●
Chiller 2	-1.460	-16.835	●
Boiler 1	-2.010	-65.000	●
Chiller 3	-2.200	-68.457	●

Figura 2.3: Overspend league table.

L'importanza e l'efficacia dei processi di M&T risultano evidenti in più funzioni aziendali: in primis, ne usufruisce l'area tecnica (dedicata alla gestione degli impianti o delle linee di produzione) che riesce a diagnosticare la presenza di problemi e intervenire repentinamente; in secondo luogo il M&T supporta l'area del Business Management a effettuare scelte strategiche di mercato e/o di ottimizzazione nella pianificazione delle attività economiche, logistiche e produttive dell'azienda. I vantaggi si ritrovano anche grazie agli incentivi legislativi che spingono l'imprenditoria ad adottare questi sistemi. La versatilità del monitoraggio è indubbia vista la quantità e la varietà di risultati che possono essere raggiunti con un'opportuna adozione dei sistemi integrati di M&T. Riportiamo di seguito i principali risultati:

- gestione dei consumi energetici (i quali non vengono più accettati come costi fissi);
- rilevazione e identificazione degli eccessi di consumo;
- individuazione di anomalie di consumo rispetto a dati storici;
- valutazione degli efficientamenti concretamente ottenuti da un investimento;
- rappresentazione analitica del trend di consumo energetico che è possibile confrontare con lo storico dello stesso oggetto (linea di produzione, caldaia, impianto di climatizzazione, macchinario, reparto aziendale, stabilimenti...) con un oggetto simile, così da localizzare le perdite di energia;
- archiviazione di dati storici per valutazioni future (come la sostituzione di un macchinario o l'efficientamento di una linea);

- predizione dei consumi e costi futuri per definire la pianificazione strategica di un periodo successivo (area management and marketing);
- definizione dei consumi e dei costi per unità di prodotto;
- programmazione preventiva della manutenzione;
- sviluppo e miglioramento delle performance e dei target che fungono da indice per la gestione energetica;
- osservazione e analisi dei parametri che influenzano l'efficienza energetica;
- accesso ad alcune tipologie di incentivi.

Oltre alla quantità di vantaggi che questo processo può apportare, è evidente che è altrettanto rilevante il valore aggiunto che ciascuna di queste analisi restituisce al management e alla manutenzione ordinaria degli impianti.

Per concludere, le tecniche di *M&T*, oltre a raggiungere l'obiettivo primario di risparmio energetico determinano anche: il risparmio economico, la riduzione delle emissioni di gas serra, la possibilità d'accesso a incentivi finanziari, il perfezionamento del budgeting grazie alla previsione della spesa energetica, la definizione del costo per unità di prodotto, determinando l'energia consumata dai vari centri di costo attraverso il monitoraggio di aree specifiche dedicate a una lavorazione o a un prodotto.

2.2 Normativa Italiana sull'uso razionale dell'energia: inquadramento normativo del monitoraggio energetico

Il susseguirsi delle crisi energetiche fra gli anni '70 e '80 aprì per la prima volta nella storia dei paesi occidentali due evidenti problematiche: gestire l'energia in maniera razionale evitando gli sprechi e cercando di ottimizzare i processi tecnologici, costruire a livello nazionale una diversificazione energetica così da evitare la subordinazione delle attività e dei processi da avvenimenti geopolitici esteri. In Italia, nel 1975 fu emanato il Piano Energetico Nazionale per la programmazione energetica e poco dopo, il 30 aprile 1976, venne promulgata la legge n. 373 ("Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici", [13]) dove, per la prima volta, apparivano il principio di risparmio energetico, i requisiti nella progettazione, installazione, esercizio e manutenzione degli impianti e i requisiti di isolamento termico degli edifici. In particolare, la legge n. 373 venne attuata negli anni seguenti con i seguenti decreti:

- decreto del Presidente della Repubblica 28 giugno 1977, n.1052, "Regolamento di esecuzione della legge 30 aprile 1976, n. 373 relativa al consumo energetico per usi termici negli edifici." [14];
- decreto del Ministro dell'industria, commercio e artigianato del 10 marzo 1977, "Determinazione delle zone climatiche, dei valori minimi e massimi dei relativi coefficienti volutici di dispersione termica." [9];

- decreto ministeriale 30 luglio 1986, “Aggiornamento dei coefficienti di dispersione termica degli edifici.” [3];
- legge 29 maggio 1982, n. 308 - “Norme sul contenimento dei consumi energetici, lo sviluppo delle fonti rinnovabili di energia e l’esercizio di centrali elettriche alimentate con combustibili diversi dagli idrocarburi” - promuove l’impiego di fonti energetiche rinnovabili mediante contributi e incentivi [16];
- legge 9 gennaio 1991, n. 10 (entrata in vigore 17-1-1991) - “Norme per l’attuazione del Piano Energetico Nazionale in materia di uso razionale dell’energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia” - fissa i criteri per l’attuazione del piano energetico nazionale, introduce l’obbligo della relazione tecnica e della certificazione energetica degli edifici [15];
- decreto del Presidente della repubblica del 26 agosto 1993, n. 412 - “Regolamento recante norme per la progettazione, l’installazione, l’esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell’articolo 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n.10” - come dice l’intestazione attua la legge 10 e quindi: individua la zona climatica e i gradi-giorno, classifica gli edifici per categorie, definisce i valori massimi della temperatura ambiente, definisce i requisiti e il dimensionamento degli impianti termici, stabilisce il rendimento minimo dei generatori di calore, introduce alcuni obblighi per quanto riguarda la termoregolazione e contabilizzazione delle fonti energetiche, definisce i valori limite del fabbisogno energetico normalizzato per la climatizzazione invernale e i limiti di esercizio degli impianti termici sulla base della zona climatica, infine regola la conduzione e manutenzione degli impianti termici [20];
- decreto del Presidente della Repubblica 15 novembre 1996, n. 660 - “Regolamento per l’attuazione della direttiva 92/42/CEE concernente i requisiti di rendimento delle nuove caldaie ad acqua calda, alimentate con combustibili liquidi o gassosi” - aggiorna i valori minimi di rendimento delle caldaie [17];
- decreto del Presidente della Repubblica 21 dicembre 1999, n. 551 - “Regolamento recante modifiche al decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412, in materia di progettazione, installazione, esercizio e manutenzione degli impianti termici degli edifici, ai fini del contenimento dei consumi di energia.” - [19];
- decreto ministeriale 17 marzo 2003 - “Aggiornamenti agli allegati F e G del decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412, recante norme per la progettazione, l’installazione, l’esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici, ai fini del contenimento dei consumi di energia.” - sostituisce gli allegati F e G al decreto del Presidente della Repubblica del 26 agosto 1993 n. 412 con allegati I e II e impone che i nuovi impianti siano muniti di libretto di centrale e libretto di impianto conformi agli allegati I e II dello stesso decreto; mentre per gli impianti esistenti

richiede di fare lo stesso aggiungendo però anche i vecchi libretti prodotti secondo gli allegati F e G del decreto n. 412 [2];

- decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192 - “Attuazione della Direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell’edilizia” - stabilisce i criteri generali, le metodologie di calcolo e requisiti minimi di prestazione energetica per il contenimento dei consumi nell’edilizia e dà una modulazione nel tempo delle disposizioni inerenti la certificazione energetica [8];
- decreto legislativo 29 dicembre 2006, n. 311 - “Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell’edilizia” - corregge le disposizioni della L. 192 [10];
- decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28 - “Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell’uso dell’energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE” - definisce strumenti, meccanismi e incentivi per il raggiungimento della quota di energia prodotta da fonti rinnovabili definita dagli obiettivi prefissati che si deve raggiungere entro il 2020 (in attuazione della direttiva 2009/28/CE), definisce gli obblighi di integrazione delle fonti rinnovabili nei nuovi edifici o negli edifici sottoposti a ristrutturazioni rilevanti, definisce gli incentivi conseguibili dalla produzione energia elettrica e termica da fonti rinnovabili (mediante contratti di diritto privato fra il GSE e il soggetto responsabile dell’impianto nel primo caso e mediante il sistema dei certificati bianchi nel secondo), trasferisce al GSE la gestione del meccanismo di certificazione relativo ai certificati bianchi [6];
- decreto del Presidente della Repubblica 16 aprile 2013, n. 74 - “Regolamento recante definizione dei criteri generali in materia di esercizio, conduzione, controllo, manutenzione e ispezione degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici e per la preparazione dell’acqua calda per usi igienici sanitari, a norma dell’articolo 4, comma 1, lettere a) e c), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192.” - definisce i criteri generali in materia di esercizio, conduzione, controllo, manutenzione e ispezione degli impianti termici [18];
- decreto legislativo 4 luglio 2014 n. 102 (Entrata in vigore: 18/07/2014) - “Attuazione della direttiva 2012/27/UE sull’efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE” [7];
- decreto 26 giugno 2015 n. 162 - “Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici.” - [5];
- decreto 16 febbraio 2016 - “Aggiornamento della disciplina per l’incentivazione di interventi di piccole dimensioni per l’incremento dell’efficienza energetica e per la produzione di energia termica da fonti rinnovabili.” - [4].

Il decreto legislativo n. 102 del 4 Luglio 2014 (G.U. Serie Generale n. 165 del 18/07/2014) ha recepito la Direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica⁴. Tale Decreto istituisce l'obbligo di svolgere una volta ogni quattro anni una diagnosi energetica (o *audit* energetico) alle "grandi imprese"⁵ e alle imprese "energivore"⁶ (le definizioni che determinano l'appartenenza a una di queste due categorie sono riportate nell'articolo 8, comma 3). In particolare, tale documentazione è d'obbligo per le imprese che per due anni consecutivi sono rientrate nella classe delle grandi imprese e per quelle che nell'anno precedente sono state classificate come energivore. L'*audit* (per le imprese sopra indicate) deve essere redatto al fine di comprendere l'utilizzo dell'energia nell'azienda, identificare eventuali sprechi e figurare gli investimenti convenienti per ridurre la spesa energetica [7].

In questo contesto normativo si inserisce l'obbligo di monitoraggio energetico, in corrispondenza della seconda diagnosi energetica l'azienda deve aver inserito sistemi di monitoraggio adeguati (come l'uso di contatori dedicati per ogni reparto o funzione aziendale) in modo da effettuare una diagnosi più accurata della precedente che porti a valutazioni migliori dei possibili interventi di efficientamento.

Oggi, il monitoraggio energetico oltre ad essere un obbligo per centri energivori e imprese di grandi dimensioni, è uno strumento essenziale per migliorare la gestione dell'impresa e delle risorse energetiche come è stato illustrato nella Sezione 2.1 a pagina 7. In particolare, in campo normativo sono previsti importanti incentivi, deliberati al fine di raggiungere l'obiettivo nazionale di risparmio energetico.

Ad oggi sono presenti quattro tipi di incentivi per l'efficienza energetica che è possibile richiedere in funzione della tipologia di intervento.

Il primo consente di ottenere detrazioni fiscali per interventi sulle singole unità immobiliari o su parti comuni degli edifici. La legge del 27 dicembre 2017, n. 205 ha prorogato le detrazioni per spese sostenute entro il 31 dicembre 2018 nel primo caso, entro il 31 dicembre 2021 nel secondo.

Per singole unità immobiliari l'aliquota di detrazione è differenziata in base all'intervento realizzato.

Per le parti comuni degli edifici la detrazione è 70% per interventi che interessano almeno il 25% dell'inviluppo edilizio e al 75% per interventi che migliorano la qualità media dell'involucro.

Il secondo incentivo consiste nel Conto Termico 2.0, rinnovato recentemente rispetto all'introduzione (DM 28-12-2012). Questo secondo incentivo è rivolto agli impianti di piccola dimensione (pubblici e

⁴Direttiva europea volta a richiedere agli Stati membri di definire obiettivi nazionali di riduzione dei consumi energetici e programmi operativi conseguibili entro il 2020.

⁵Grandi imprese: imprese con più di 250 dipendenti e un fatturato superiore a 50 milioni di euro o un totale di bilancio annuo superiore di 43 milioni.

⁶Imprese energivore: imprese iscritte nell'elenco annuale istituito presso la Cassa per i servizi energetici e ambientali (CSEA) ai sensi del decreto interministeriale 5 aprile 2013.

privati) per il miglioramento delle prestazioni energetiche e permette di recuperare velocemente parte delle spese sostenute.

Il terzo incentivo corrisponde a quello dei Certificati Bianchi o Titoli di Efficienza Energetica (TEE) ovvero titoli negoziabili che attestano il raggiungimento di risparmi energetici conseguiti grazie a interventi di efficientamento [6]. I Certificati Bianchi sono emessi dal GME e gestiti da GSE come previsto dal decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28 (“Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell’uso dell’energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE”); la richiesta per l’ottenimento di questa tipologia di incentivo si delinea in sei step avvalendosi dei soggetti competenti secondo la normativa (EGE⁷, ESCO⁸, soggetto pubblico o privato in possesso di un sistema di gestione dell’energia). Per richiedere questo incentivo è necessario innanzitutto misurare i consumi e presentare il progetto di efficientamento energetico selezionato sulla base di opportuni criteri basati sui consumi e sulla fattibilità economica dell’investimento. In caso di approvazione del GSE si realizza il progetto e si misurano nuovamente i consumi. Dalla differenza fra i consumi ex ante ed ex post dell’opera si ricava il risparmio conseguito. In ultimo, si richiede periodicamente al GSE la certificazione dei risparmi, il GSE certifica il risparmio ed autorizza il GME all’emissione dei titoli.

Il quarto incentivo, appena introdotto, è l’ecobonus o superbonus al 110%, che permette di ricevere in cinque o dieci anni (a seconda degli interventi effettuati) una quota dell’ammontare speso per i lavori di efficientamento che soddisfano le tre condizioni seguenti:

1. gli interventi devono rispettare il decreto requisiti minimi (decreto attuativo della misura superbonus prevista dal decreto rilancio),
2. deve essere verificato un salto energetico dell’immobile di almeno due classi,
3. deve essere stato eseguito almeno uno dei due interventi imprescindibili per accedere al bonus: (i) sostituzione del generatore di calore e (ii) coibentazione delle pareti disperdenti.

⁷Esperto in Gestione dell’Energia: figura professionale certificata con codifica dalla norma tecnica UNI CEI 11339 capace di gestire l’uso dell’energia in modo efficiente.

⁸Energy Service Company: persona fisica o giuridica certificata con codifica dalla norma tecnica UNI CEI 11352 che fornisce misure di miglioramento dell’efficienza energetica nelle installazioni.

2.3 Monitoraggio energetico di centri natatori e sportivi

Il monitoraggio energetico risulta una pratica imprescindibile nelle strutture natatorie per due motivi:

1. l'elevato fabbisogno energetico degli impianti;
2. la struttura dei costi dell'attività.

Infatti, a causa dell'elevata temperatura dell'aria che viene mantenuta sul piano vasca 24 ore su 24, dell'elevato ricambio d'aria e dell'alta temperatura dell'acqua di vasca, i centri natatori e sportivi sono notoriamente centri energivori (vedi Capitolo 4 a pagina 26). Inoltre, la spesa energetica ricopre circa il 35% dei costi totali di esercizio dell'attività e, di conseguenza, incide in maniera significativa sia da un punto di vista ambientale che economico. Approfondiamo quindi la struttura dei costi dell'attività evidenziando le criticità associate e quale apporto può fornire il monitoraggio in questo contesto.

Il bilancio di un centro natatorio è composto dalle seguenti spese principali: consumi, ammortamenti, costi del personale, spese amministrative, tasse fisse, certificazioni ed autorizzazioni⁹. Tutti i fattori elencati sono costi fissi, l'unica eccezione riguarda i consumi in parte variabili. La quota fissa è data dal condizionamento dell'edificio, dal riscaldamento dell'acqua di vasca, dall'illuminazione. . . Mentre i consumi variabili sono: assorbimento di potenza elettrica dei phon, l'assorbimento termico per il riscaldamento dell'acqua calda sanitaria e il volume consumato di acqua calda sanitaria. E' possibile osservare che i costi variabili ricoprono una percentuale piccola rispetto a quelli fissi e ciò determina inevitabilmente difficoltà nella gestione dei centri natatori. Quindi, la rigidità dei costi legati all'attività comporta un rischio non indifferente, in quanto la variazione dell'utenza (ovvero dei ricavi) ha conseguenze economiche di rilievo: può portare a ricoprire solo in parte i costi fissi, mettendo in crisi l'intera attività. Infatti, le imprese con un'alta incidenza di costi fissi sul totale dei costi manifestano ampie oscillazioni del reddito al variare dei ricavi. Nel caso dei centri natatori, indipendentemente dal numero di utenti che frequentano il centro, il gestore ha a carico una quota non indifferente di costi fissi. Quindi otterrà ottimi guadagni quando il centro è frequentato ma, in caso contrario, il rischio di andare in perdita sarà alto. Diamo una breve spiegazione grafica di questo fatto. In Figura 2.4 si confronta due imprese con lo stesso *BEP* ma costi fissi completamente differenti. Nel grafico in alto l'impresa ha elevati costi fissi (struttura A), mentre nel grafico sottostante l'impresa (struttura B) ha dei costi fissi inferiori. Spostandosi dalla quantità Q_0 (quantità corrispondente al *BEP*) alla quantità Q_1 è evidente che la struttura A determina un incremento di profitto ($R_i = RT - CT$) molto più elevato della struttura B; tuttavia, nel caso in cui la quantità passi da Q_0 a Q_2 , si ha anche una perdita maggiore.

⁹Nella maggior parte dei casi i centri natatori e polisportivi sono proprietà del comune gestite da aziende che hanno vinto un appalto e pagano per usufruire della struttura.

La valutazione della struttura dei costi, relativi alla gestione di impianti natatori, fa emergere la necessità di adoperare azioni strategiche per evitare grosse perdite monetarie nell'attività. In particolare, si evidenzia l'importanza di uno studio predittivo dei costi fissi che la caratterizzano. Osservando i fattori che compongono i costi tipici di un impianto natatorio e polisportivo, è rilevabile che non è utile agire su: ammortamenti, salari, spese amministrative e tasse fisse. L'unico contributo significativo ad aumentare gli introiti è un'azione diretta sugli impianti, completa del monitoraggio dei consumi di acqua, gas e luce. Tale strategia fornisce dati storici attraverso i quali l'impresa può attuare scelte rilevanti nella gestione.

Il lavoro qui riportato si avvale dei dati di monitoraggio mensile di 41 centri natatori per costruire un modello predittivo dei consumi mensili futuri (anche di nuovi centri polisportivi) a partire da un numero limitato di caratteristiche. Lo scopo del lavoro consiste nella creazione di un Tool che monitori i consumi delle strutture e fornisca un target di riferimento sulla base del quale individuare eventuali anomalie di funzionamento degli impianti e applicare tutte le strategie e analisi caratteristiche del *M&T* viste nella Sezione 2.1 a pagina 7.

In breve, agire sugli impianti e conoscere il target dei consumi dei mesi successivi sono ottimi strumenti che i gestori dei centri natatori possono sfruttare per ottenere un risparmio, eseguire valutazioni economiche e portare indicazioni adatte a pianificare la gestione successiva. Questo set di informazioni può determinarne la riuscita dell'azione imprenditoriale e un incremento dei ricavi.

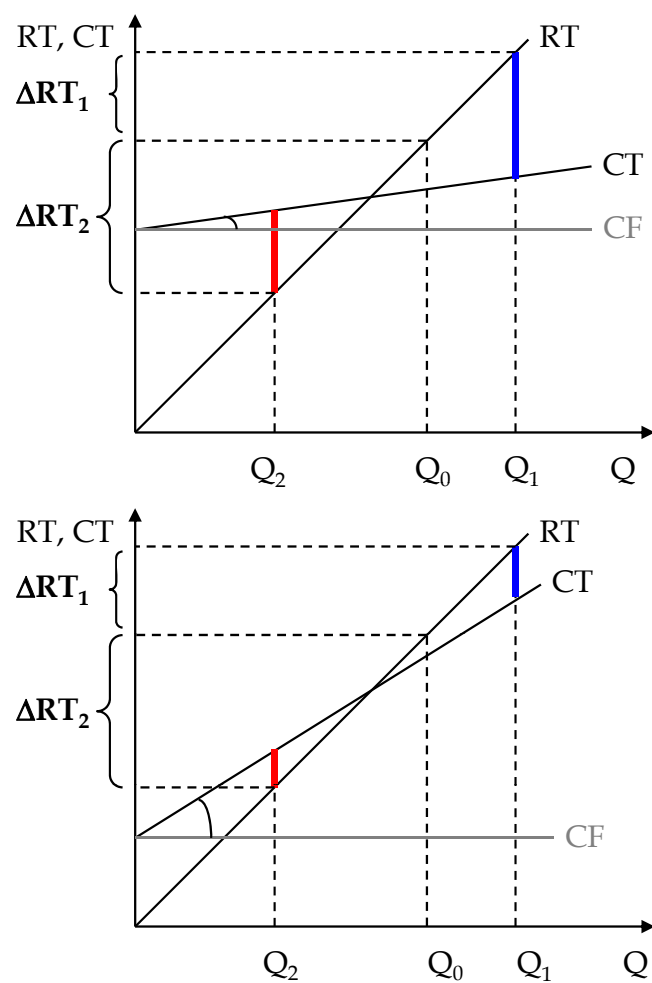


Figura 2.4: Confronto della struttura dei costi di due attività con lo stesso BEP.

Capitolo 3

Modi e metodi per lo sviluppo del Target di consumo energetico

Il presente capitolo ha l'obiettivo di contestualizzare e giustificare i metodi scelti per lo sviluppo del Tool di monitoraggio energetico di centri natatori e sportivi. In particolare, il fine del capitolo è introdurre le possibili strategie per la predizione dei consumi e identificare la procedura seguita in questa tesi con le opportune argomentazioni del caso. Si riporta nella prima sezione una breve descrizione dei modelli predittivi esistenti, approfondendo lo stato dell'arte dei modelli nel campo del consumo energetico; infine, si illustrano gli step del processo di KDD che verrà adottato nella tesi.

3.1 Modelli predittivi

Una modellazione dei consumi di una qualsiasi costruzione include molti parametri non tutti facilmente reperibili. In particolare, potremmo dividere le informazioni necessarie nelle seguenti macro-voci:

1. Caratteristiche geometriche e fisiche dell'edificio;
2. Caratteristiche termo-igrometriche interne;
3. Dati meteorologici;
4. Carichi interni;
5. Utenza;
6. Caratteristiche tecniche dei sistemi di riscaldamento e di climatizzazione estiva.

Si nota che 1, 2 e 6 sono caratteristiche costanti nel tempo nonostante la commutazione stagionale di 6; mentre 3, 4 e 5 variano continuamente. La predizione dei dati meteorologici (3) può essere considerata un problema risolto grazie ai modelli sviluppati e grazie alle stazioni meteo presenti in tutta Italia. Invece, per quanto riguarda i carichi interni (4) e l'utenza (5) la predizione risulta più complessa dato che è

strettamente legata all'attività umana, non lineare e dominata dall'incertezza. Facendo riferimento a dati storici o a strutture simili, per questi due termini è possibile adottare delle predizioni o meglio dei valori attesi con una certa probabilità di accadimento che può essere affinata con la collezione progressiva di dati reali. Si sottolinea a questo proposito che, in funzione dell'unità temporale su cui si intende stimare i consumi, risulta importante stabilire come valutare o come modellizzare l'andamento di 3, 4 e 5. Rimandiamo al Capitolo 6 a pagina 58 la discussione relativa al presente caso di studio e introduciamo i possibili approcci investigati.

La predizione dei consumi energetici non è un problema nuovo [40, 34] e dispone di un'ampia bibliografia dato il crescente interesse verso l'uso razionale dell'energia sia in ambito civile che industriale. A partire dal secolo scorso sono stati sviluppati differenti modelli predittivi la cui evoluzione è stata supportata sia in ambito accademico che imprenditoriale. In letteratura è possibile distinguere: metodi qualitativi da metodi quantitativi, metodi basati su dati storici, analisi di regressione lineari e non lineari, predittori probabilistici e metodi di intelligenza artificiale. . .

Macroscopicamente, vengono individuate tre grandi famiglie di modelli che è possibile impiegare come predittori [22]: (i) modelli deterministici; (ii) modelli ibridi; (iii) modelli *data-driven*. Questi tre macro-gruppi adottano approcci concettualmente molto differenti che possono essere più o meno convenienti a seconda dello scopo proposto e delle informazioni disponibili.

In sintesi, la scelta è fortemente legata all'applicabilità del metodo e alla tipologia del problema.

3.1.1 Modelli deterministici

I modelli deterministici (*White-box Model*) si basano su leggi fisiche che modellano il processo considerato ottenendo l'evoluzione futura. Tali sistemi hanno il vantaggio di essere trasparenti infatti, nel modello si conoscono le componenti, i parametri e le relazioni che intercorrono fra loro. Inoltre, non necessitano di dati storici e sono facilmente generalizzabili. Purtroppo, attraverso questi modelli la soluzione può risultare poco accurata dato che ammette un errore che deriva in primo luogo dalle ipotesi semplificative proposte per modellizzare il fenomeno in questione e in secondo luogo dagli errori associati ai valori dei parametri. Questi modelli vengono utilizzati nella fase di progetto in cui tutti i parametri sono noti e si vuole dimensionare il sistema.

Nel campo dei consumi energetici, i metodi più comunemente impiegati come predittori sono:

- l'analisi CFD - *Computational Fluid Dynamic*;
- il *Zonal Approach*;
- il *Multi Zone* o *Nodal Approach*.

L'analisi CFD consiste nella risoluzione delle equazioni di Navier-Stokes e restituisce una descrizione dettagliata dei differenti flussi che è desiderabile monitorare (portata di aria, portata di inquinanti, temperatura, gradiente di temperatura, umidità ecc. . .) a scapito del costo computazionale, che risulta elevato.

Il *Zonal Approach* divide un edificio in celle ciascuna delle quali corrisponde a una piccola parte di una stanza. Il metodo in questione semplifica il problema tridimensionale di dinamica dei fluidi con un modello 2D e in questo modo permette di ottenere una descrizione abbastanza buona della distribuzione spaziale di pressione, temperatura, concentrazioni, velocità dell'aria ecc... impiegando un costo computazionale nettamente inferiore rispetto all'analisi CFD. Tuttavia, questa analisi non produce risultati dettagliati dei flussi e richiede la conoscenza pregressa di profili di flusso.

Infine, il *Nodal Approach* è un modello monodimensionale in cui ogni zona di un edificio è un volume omogeneo caratterizzato da variabili uniformi. Identificando in nodi gli oggetti del sistema¹⁰, questo metodo trasforma il problema fluidodinamico in un approccio unidimensionale in cui le equazioni di scambio termico sono risolte per tutti i nodi del sistema. Ciò permette di descrivere il comportamento di un edificio con più zone su una scala temporale ampia con un costo computazionale moderato; per questo risulta particolarmente adatto a predire la temperatura e il consumo energetico dei singoli ambienti.

3.1.2 Modelli *data-driven*: statistica e intelligenza artificiale

I modelli *data-driven* sono basati sull'implementazione di una funzione dedotta unicamente dai campionamenti di un data base di training che descrive il comportamento di uno specifico sistema.

Questi metodi non necessitano una conoscenza approfondita della geometria dell'edificio o dei fenomeni fisici per formare una predizione accurata dato che sono completamente basati sulle misure acquisite.

Nel campo della predizione dei consumi gli approcci principali che si trovano in letteratura sono i seguenti:

- Conditional Demand Analysis - CDA - (tecnica di regressione);
- Genetic Algorithm - GA - (tecnica di ottimizzazione);
- Artificial Neural Network - ANN - (tecnica di regressione);
- Support Vector Machine - SVM - (tecnica di regressione).

La tecnica di regressione CDA ipotizza una relazione lineare fra le variabili e gli output e valuta i coefficienti di proporzionalità. Se i dati sono sufficienti e se effettivamente il problema è lineare, allora la funzione di regressione ottenuta descrive il sistema desiderato. Il secondo approccio, quello degli algoritmi genetici, è una tecnica di ottimizzazione stocastica ispirata dall'analogia con la teoria dell'evoluzione di Darwin. Questa restituisce una funzione che descrive il sistema, tuttavia ha la difficoltà di essere computazionalmente onerosa e in più l'assegnazione dei parametri dell'algoritmo risulta difficile.

Le reti neurali artificiali si basano su un processo iterativo di apprendimento basato su dati reali. Queste non richiedono ipotesi iniziali ma solo una scatola nera (*Black-box Model*) nella quale non sono note le

¹⁰Una stanza, un muro, l'esterno dell'edificio o le sorgenti interne (come l'occupazione dell'utenza o la presenza di apparecchiature) sono considerati come un nodo.

componenti interne e il loro funzionamento; in pratica non si ha l'interpretazione fisica (il modello non è trasparente). Infine, le SVM risolvono un problema di ottimizzazione andando a ricercare una funzione di regressione che funga da predittore con un errore massimo consentito, ϵ , misurato rispetto al dato reale. Questi metodi sono computazionalmente efficienti per dati *real-time* e possono raggiungere un'accuratezza maggiore rispetto ai modelli deterministici poiché sono stati costruiti a partire da dati reali e quindi considerando tutti quei fenomeni che altrimenti verrebbero esclusi per semplificare l'analisi CFD o per le ipotesi stesse del modello impiegato. Infine, è possibile notare che nel caso in cui il predittore debba valutare degli elementi non lineari, le ANN in particolare riescono a tenere conto anche di questo comportamento. Per contro gli svantaggi si concretizzano nella necessità di grosse quantità di dati al fine di ottenere dei buoni strumenti di predizione dei consumi.

3.1.3 Modelli ibridi

I modelli ibridi sono modelli costituiti da leggi fisico-matematiche coadiuvate con altre metodologie necessarie a determinare o dare una stima di alcuni parametri sconosciuti. Queste strategie nascono dall'unione dei modelli deterministici e di quelli *data-driven* al fine di smussare quanto più possibile i difetti di ciascuno dei due metodi (come ridurre il costo computazionale e decrementare la numerosità del data base necessario). Le strategie più frequenti in letteratura sono le seguenti:

- usare una *machine learning* come stimatore dei parametri fisici e poi procedere con un modello deterministico;
- usare la statistica per implementare un modello di apprendimento, progettato a partire da un approccio fisico, che descriva il comportamento (termico o elettrico) di un edificio;
- usare un metodo statistico quando gli approcci deterministici non sono efficaci o sufficientemente accurati (per esempio per estrapolare il comportamento non lineare dell'utenza).

Il vantaggio principale nell'utilizzo di un metodo ibrido è che consente di effettuare lo studio con un numero limitato di dati (rispetto ai modelli *data driven*). In più, adottando questo tipo di approccio, risulta sufficiente una descrizione approssimativa della geometria dell'edificio e dei parametri termici a differenza di quanto richiesto per una buona applicazione dei modelli deterministici.

In breve, i primi metodi sono applicabili in contesti nei quali sono disponibili i dati di progetto e sono fortemente dipendenti dalla complessità del modello. La seconda categoria di metodi è molto utile nel caso in cui si conoscano i dati reali di consumo ma non è nota alcuna informazione sul progetto: motivo per cui la riuscita di queste tecniche è fortemente dipendente dalla quantità e qualità dei dati disponibili. Infine i modelli ibridi possono essere applicati dove esiste una serie di consumo nota e quando il modello fisico dell'edificio è disponibile ma incompleto. Osserviamo a questo proposito che nel caso di edifici esistenti è difficile ricostruire il modello fisico, quindi questi approcci possono essere di aiuto.



Figura 3.1: Schema di raffinamento dei dati.

Riportiamo di seguito i principali risultati che si trovano in letteratura riguardo alla predizione dei consumi energetici: elettrici e termici.

3.1.4 Stato dell'arte nella predizione di consumo energetico

Per edifici di cui si dispone di serie temporali storiche, le tecniche statistiche e di intelligenza artificiale si sono dimostrate le più accurate e rapide; in [27] gli autori hanno presentato e confrontato le principali tecniche di *machine learning* per la previsione delle serie temporali di consumo.

Fra i modelli di *Artificial Intelligence* le *Support Vector Machine* e le reti neurali artificiali hanno avuto un discreto successo superando in accuratezza e costo computazionale le altre tecniche.

Le prime (ANN, *artificial neural networks*) possono modellare problemi non lineari senza alcuna conoscenza a priori delle relazioni fra input e output; tuttavia sono fortemente dipendenti dall'inizializzazione dei pesi, convergono lentamente verso un minimo locale ed è difficile ottenere un bilanciamento fra *overfitting*¹¹ e generalizzazione.

Le seconde (SVM) riescono a gestire le non linearità e l'alta dimensionalità dei problemi; possono essere applicate efficientemente a problemi con pochi dati, anch'esse restituendo un minimo locale; hanno buone capacità di modellazione e generalizzazione; ma mancano in trasparenza e hanno un elevato costo computazionale.

Infine, si aggiunge che i risultati migliori riscontrati in letteratura sono stati ottenuti attraverso l'unione delle due tecniche. Infatti, i modelli ibridi ottengono un'accuratezza maggiore [38, 30].

3.2 Identificazione del modello applicato al caso in esame

Visti i risultati in letteratura, alcune osservazioni relative al problema in esame possono essere fatte al fine di motivare la metodologia proposta. Innanzitutto, si è escluso l'utilizzo di un modello puramente deterministico in quanto (come si può intuire dalla Sezione 3.1 a pagina 18) l'incertezza con cui è possibile assumere o reperire i dati di input (dati meteorologici, geometrici, variabili termo fisiche, utenza, tipologia di impianti...) per edifici datati, addizionata alle assunzioni dei modelli sopracitati, comporterebbe differenze concrete fra il risultato teorico e quello reale. Parallelamente anche i metodi *data-driven* sono stati ritenuti poco significativi per il caso di studio vista l'esiguità del data set stesso (si conoscono i consumi mensili dei 41 centri su un arco temporale al più di due anni).

Conseguentemente, la strategia adottata insieme a HF s.r.l. ha voluto unire insieme una rete neurale e un set di parametri aggregati descrittivi dei fattori di consumo. Quindi, nel seguente lavoro di tesi, verranno uniti approcci basati sull'analisi dei dati e approcci basati sui modelli fisici (di scambio termico e assorbimento elettrico) con l'obiettivo di produrre un target di consumo energetico.

Per adempiere allo scopo è stato seguito il processo *Knowledge Discovery in Databases* (KDD), ovvero il processo di scoperta della conoscenza nei database, il cui obiettivo è quello di sintetizzare la conoscenza racchiusa nei dati, ottenendo delle informazioni di maggior valore.

Il processo KDD, introdotto per la prima volta nel 1996 da Brachman e Anand, trasforma dati di “basso livello” in forme più utili (Figura 3.1). Lo studio solitamente parte da grossi database ed estrapola un numero limitato di informazioni di “alto livello”. Tale processo può coinvolgere iterazioni successive e contenere loop fra step successivi come è mostrato in Figura 3.2, illustriamo i passaggi principali di questo processo.

Il primo passo è quello di sviluppare una comprensione del dominio di applicazione, acquisire conoscenza degli studi che sono già stati fatti e identificare l'obiettivo del processo. In seguito, si crea il *data set* oggetto di studio, ovvero si selezionano i dati (o le variabili) sulla base dei quali sviluppare il processo di scoperta. Successivamente si puliscono i dati da possibili rumori e si valutano eventuali correzioni per tenere conto di cambiamenti noti e/o informazioni temporali. Lo step seguente consiste nel ridurre la dimensionalità del problema, quindi ridurre il numero di variabili in considerazione oppure trovare delle rappresentazioni invarianti. Fatto ciò, il processo KDD prevede l'applicazione di una tecnica di *data mining* in cui, identificato lo scopo del processo (*clustering*, regressione, classificazione...), si sceglie l'algoritmo da utilizzare. A questo punto si ha l'interpretazione dei pattern o eventualmente il ritorno agli step precedenti per adottare migliorie nel processo di KDD. L'ultimo passo del processo teorizzato è quello di utilizzare la conoscenza acquisita direttamente oppure incorporandola nella conoscenza di un altro sistema per un'analisi ulteriore.

¹¹Per *overfitting* si intende la situazione in cui il modello si adatta ai dati osservati (il campione) solo perché è stato fornito un numero eccessivo di parametri rispetto al numero di osservazioni.

Per lo studio sviluppato in questa tesi si è scelto di impiegare questa strategia per tre principali ragioni. Innanzitutto, il procedimento teorizzato è fortemente sostenuto dalla letteratura che ne dimostra l'efficacia. In secondo luogo, il processo risulta efficiente in presenza di grandi quantità di dati. Questo è interessante in vista degli sviluppi futuri dell'Analytic Tool; infatti, il Tool verrà aggiornato ogni biennio per tenere conto dei nuovi dati di consumo raggiungendo un progressivo affinamento dei target predetti. Infine, è possibile notare che la forza del procedimento KDD si mostra in maniera evidente quando risulta una inadeguatezza degli strumenti tradizionali (calcoli teorici) che, anche avendo tutti i dati necessari, possono solo fornire delle stime approssimative. In questo caso di studio interagiscono parametri fisici-tecnologici con l'azione umana: dell'utenza e dei gestori. Quest'ultimi risultano molto difficili da modellizzare a causa del loro comportamento non lineare e imprevedibile. Tuttavia, attraverso l'utilizzo di una rete neurale artificiale le non linearità possono essere valutate in funzione di più parametri significativi.

Riassumiamo di seguito i passi principali dello studio per lo sviluppo dell'Analytic Tool.

1. Raccolta e correzione¹² dei dati di consumo mensili dei centri sportivi e natatori (*know-how* aziendale).
2. Classificazione dei centri sulla base della forma del profilo di consumo energetico attraverso tecniche di *clustering*.
3. Definizione dei parametri che caratterizzano il consumo energetico (elettrico e termico) e di acqua dei centri sportivi e natatori in funzione delle caratteristiche geometriche, climatiche e impiantistiche presenti in ciascuno di questi.
4. Apprendimento e validazione delle reti neurali artificiali sulla base della suddivisione in famiglie ottenuta dal *clustering*.
5. Osservazione e analisi dei target di consumo energetico ottenuti dal Tool.

Come è possibile dedurre dall'elenco puntato, nella tesi sviluppata per la costruzione dell'Analytic Tool si ricorre due volte al processo KDD: la prima volta quando si ricerca una suddivisione dei centri polisportivi in classi (l'algoritmo di *data mining* in questo caso è il *clustering*); la seconda quando si addestra la rete (l'algoritmo di *data mining* in questo caso è l'ANN e i dati di input sono proprio i risultati del *clustering*).

¹²In alcuni casi il dato di consumo è stato corretto sulla base delle informazioni fornite dai dipendenti di HF s.r.l. responsabili del monitoraggio energetico al fine di escludere i dati difettosi ovvero quelli caratterizzati da consumi straordinari (come per esempio consumi dovuti a perdite e malfunzionamenti).

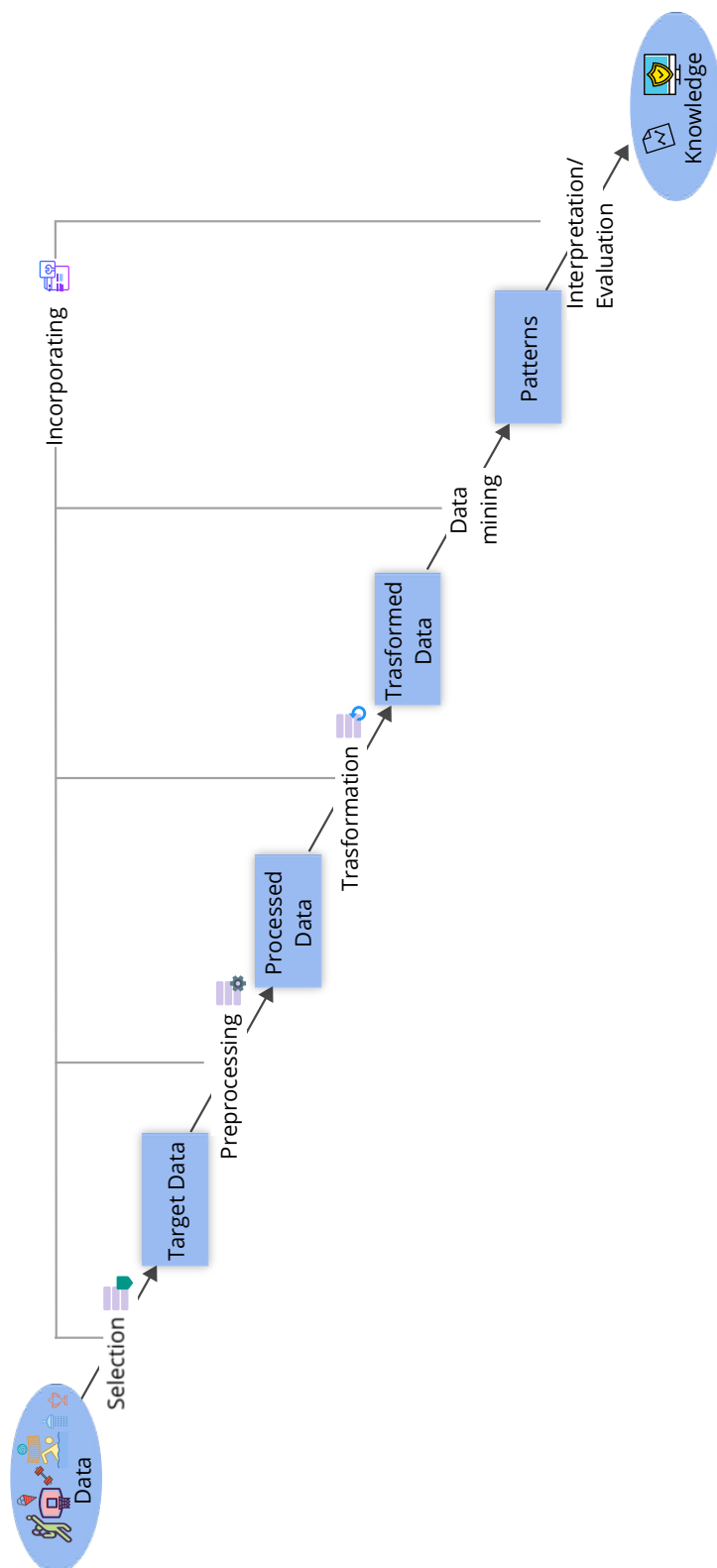


Figura 3.2: Mappa logica del processo di *Knowledge Discovery in Databases*.

Capitolo 4

Centri natatori e polisportivi

Per dare una visione completa e giustificata del lavoro svolto, il capitolo seguente tratta in primis una breve sezione che descrive gli impianti presenti nei centri natatori, soffermandosi in maniera più dettagliata sull'impianto di trattamento dell'acqua al fine di contestualizzare alcuni limiti normativi importanti legati alla filtrazione e alla gestione dell'impianto. Nella sezione successiva si riporta i principali obblighi normativi dati dalla norma CONI, specificatamente per impianti natatori, al fine di giustificare alcune delle assunzioni che verranno fatte nei capitoli successivi.

4.1 Impianti caratteristici di un centro natatorio

L'impianto caratteristico di un centro natatorio è quello di trattamento dell'acqua delle vasche; a questo si affiancano l'impianto idrico e sanitario, l'impianto elettrico, l'impianto di climatizzazione (ventilazione, riscaldamento/ rinfrescamento, umidificazione/deumidificazione) e gli impianti di emergenza (impianto antincendio, impianto di emergenza e segnalazione). Di seguito riporteremo le caratteristiche principali di questi, approfondendo in particolare il funzionamento dell'impianto di trattamento dell'acqua.

4.1.1 Impianto di trattamento dell'acqua

La normativa UNI 10637 stabilisce le caratteristiche chimiche, chimico-fisiche e microbiologiche dell'acqua di vasca delle piscine seguendo le prescrizioni dell'Accordo Stato-Regioni del 16 gennaio 2003 [1].

Le restrizioni sono fornite in maniera tale da: garantire l'igienicità dell'ambiente vasca ed evitare che l'attività di balneazione sia fonte di contagi. Gli inquinanti presenti nell'acqua delle piscine sono composti da: microorganismi, sostanze non dissolte e sostanze dissolte. Tutti gli inquinanti provengono dagli utenti della piscina, ciascuno dei quali porta con sé: batteri, funghi, virus (alcuni dei quali possono essere patogeni), capelli, pelle, resti di sapone, sudore, fluidi oculari, saliva e a volte urina¹³.

¹³L'ammoniaca contenuta nell'urina reagendo con il cloro forma le clorammine - monoclorammina e diclororammina - responsabili del forte odore di cloro nell'aria e che provocano irritazione all'apparato respiratorio e oculare.

A seconda dell'utilizzo della piscina, la UNI 10637: specifica i requisiti per la progettazione, costruzione e gestione degli impianti di trattamento dell'acqua; impone l'utilizzo delle sostanze disinfettanti, flocculanti e per la correzione del pH fra quelle di approvato utilizzo¹⁴; definisce le metodologie, la frequenza e gli strumenti per monitorare la qualità dell'acqua di approvvigionamento, dell'acqua di immissione e dell'acqua di vasca. A tal fine individua quattro tipologie di piscine:

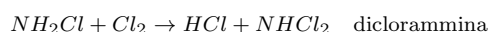
- Tipologia A: piscine pubbliche o aperte a un'utenza identificabile, come piscine comunali, piscine ad uso collettivo (alberghi, campeggi, scuole...), piscine per il gioco acquatico.
- Tipologia B: piscine di complessi condominiali costituiti da più di quattro unità abitative.
- Tipologia C: piscine ad uso riabilitativo e curativo.
- Tipologia D: Piscine al servizio di quattro o meno unità abitative.

Di seguito descriviamo l'impianto seguendo i principali obblighi normativi a cui devono sottostare i centri natatori di tipo A: categoria al centro d'interesse dello studio.

Facendo riferimento alla Figura 4.1 elenchiamo gli elementi fondamentali dell'impianto complessivo:

- sistema di ripresa e sistema di mandata;
- vasca di compenso;
- sistema di alimentazione dell'acqua di reintegro e rinnovo da acquedotto;
- prefiltri e filtri;
- sistema di disinfezione (dosaggio a base di cloro più impianti complementari);
- sistema di correzione del pH .

Il principio di funzionamento è essenzialmente quello di un impianto di ricircolo con qualche articolazione in più data dalla presenza di impianti ausiliari (impianti di dosaggio per la disinfezione, impianti di dosaggio per la correzione del pH , impianti di dosaggio per l'immissione di sostanze antialghe...) e dalla necessità di rinnovo e reintegro dell'acqua in vasca. L'acqua di reintegro va a compensare: l'evaporazione, gli schizzi, il trascinarsi fuori vasca causato dai bagnanti e l'acqua asportata per i prelievi e le analisi. L'acqua di rinnovo è necessaria per effettuare una diluizione delle impurezze e far sì che ci sia progressivamente un ricambio d'acqua effettivo in vasca: non è sufficiente il trattamento di depurazione, deve essere previsto un sistema di alimentazione dell'acqua di rinnovo, provvisto di contatore per la verifica del volume effettivamente immesso. La UNI 10637 stabilisce che il rinnovo dell'acqua sia pari al



¹⁴Si rimanda nuovamente alla lista di sostanze approvate dall'Accordo Stato-Regioni riportate nell'Allegato N.1 (del accordo stesso).

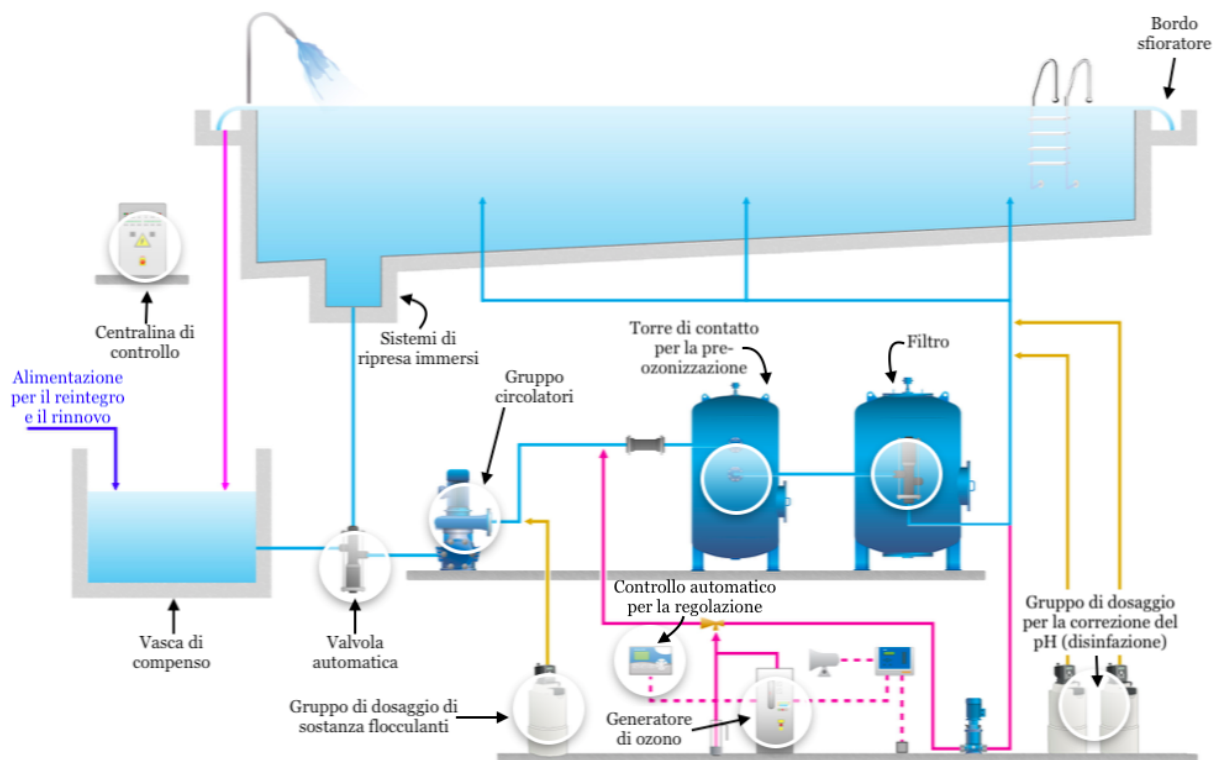


Figura 4.1: Schema d'esempio di trattamento dell'acqua di vasca.

5% della somma fra il volume della piscina e il 60% del volume convenzionale della vasca di compenso¹⁵. Nel caso in cui i bagnanti siano pochi¹⁶ la UNI prevede la possibilità di diminuire questa percentuale che comunque non può scendere al di sotto del 2,5%.

Le piscine di classe A sono caratterizzate da un sistema di ripresa a sfioro: l'acqua che tracima dal bordo vasca, viene raccolta da canaline e condotta fino alla vasca di compenso. Qui, se il livello dell'acqua supera un determinato valore, tramite un meccanismo di troppo pieno, l'acqua in eccesso viene scaricata. Dalla vasca di compenso l'acqua viene aspirata verso il circuito di mandata e passa in serie attraverso pre-filtro, pompa e filtro prima di essere reimpressa in piscina. Il pre-filtro permette di eliminare gli inquinanti non dissolti di dimensioni maggiori, mentre il filtro tenta di eliminare quelli più piccoli. Per aumentare l'efficacia del filtro, fra il pre-filtro e il filtro, si inserisce un dosatore di sostanza flocculante. L'effetto dell'iniezione di questo composto chimico nell'acqua è quello di favorire la coagulazione degli

¹⁵Il volume convenzionale della vasca di compenso è definito come il volume compreso fra il fondo della vasca e il sistema troppo pieno.

¹⁶Da normativa questa scelta è accettata se, conteggiando 30 l per bagnante al giorno, il valore si discosta in maniera importante dal 5%.

inquinanti rimasti, che in questo modo rimangono intrappolati nel filtro con una probabilità maggiore. A valle del filtro, si trovano (da normativa) sistemi automatici di dosaggio che iniettano sostanze per generare la disinfezione da microorganismi¹⁷. In genere si usano impianti di dosaggio a base di cloro, coadiuvati con impianti per la produzione di ozono¹⁸ o raggi UV¹⁹. Infine, prima dell'immissione in vasca tramite bocchette, si inserisce il sistema automatico di dosaggio per la correzione del pH .

Tutte le sostanze utilizzate in questo circuito devono essere scelte fra quelle elencate nell'Accordo Stato-Regioni del 2003; devono essere immesse da sistemi automatici (interbloccati con l'impianto di circolazione) che regolano le quantità sulla base di un segnale di misura.

Secondo la UNI 10637, la correzione di pH , l'immissione di sostanze anti-alga e la disinfezione possono anche essere effettuate con un trattamento d'urto direttamente in vasca in assenza di bagnanti. Tuttavia così facendo la vasca risulta inagibile sino a quando le concentrazioni non torneranno al di sotto dei limiti stabiliti (Tabella 4.1).

Di seguito si riporta per punti gli altri principali requisiti imposti dalla UNI 10637.

Tabella 4.1: Requisiti dell'acqua di immissione e di quella contenuta in vasca secondo l'Accordo Stato-Regioni del 16 gennaio 2003.

PARAMETRO	ACQUA DI IMMISSIONE	ACQUA DI VASCA
Requisiti fisici		
Temperatura:		
- vasche coperte in genere	$(24 - 32)^{\circ}C$	$(24 - 30)^{\circ}C$
- vasche coperte bambini	$(26 - 35)^{\circ}C$	$(26 - 32)^{\circ}C$
- vasche scoperte	$(18 - 30)^{\circ}C$	$(18 - 30)^{\circ}C$
PH per disinfezione a base di cloro. (Ove si utilizzino disinfettanti diversi il pH dovrà essere opportunamente fissato al valore ottimale per l'azione disinfettante.)	6,5 – 7,5	6,5 – 7,5

¹⁷Sostanze ammesse dall'Accordo Stato-Regioni del 2003: cloro liquido; ipoclorito di sodio; ipoclorito di calcio; dicloroisocianurato di sodio anidro; dicloroisocianurato di sodio biidrato; acido triclorisocianurico; ozono.

¹⁸L'ozono, oltre ad avere un effetto coagulante, ha alto potenziale di ossidazione e questo gli permette di distruggere virus e batteri: entra nella parete cellulare, ossida enzimi, proteine, DNA, RNA determinando la lisi della cellula.

¹⁹I raggi UV forniscono un ausilio alla disinfezione (sono capaci di eliminare germi resistenti al cloro) e consentono la decomposizione delle clorammine.

Tabella 4.1 prosegue dalla pagina precedente

Torbidità in SiO_2	$\leq 2 \text{ mg/l } SiO_2$ (o unità equivalenti di formazina)	$\leq 4 \text{ mg/l } SiO_2$ (o unità equivalenti di formazina)
Solidi grossolani	Assenti	Assenti
Solidi sospesi	$\leq 2 \text{ mg/l}$ (filtrazione su membrana da $0,45 \mu m$)	$\leq 2 \text{ mg/l}$ (filtrazione su membrana da $0,45 \mu m$)
Colore	Valore dell'acqua potabile	$\leq 5 \text{ mg/l Pt/Co}$ oltre quello dell'acqua di approvvigionamento
Requisiti chimici		
Cloro attivo libero	$(0,6 - 1,8) \text{ mg/l } Cl_2$	$(0,7 - 1,5) \text{ mg/l } Cl_2$
Cloro attivo combinato	$\leq 0,2 \text{ mg/l } Cl_2$	$\leq 0,4 \text{ mg/l } Cl_2$
Impiego combinato Ozono Cloro: - Cloro attivo libero - Cloro attivo combinato - Ozono	$(0,4 - 1,6) \text{ mg/l } Cl_2$ $\leq 0,05 \text{ mg/l } Cl_2$ $\leq 0,01 \text{ mg/l } O_3$	$(0,4 - 1,0) \text{ mg/l } Cl_2$ $\leq 0,2 \text{ mg/l } Cl_2$ $\leq 0,01 \text{ mg/l } O_3$
Acido isocianurico	$\leq 75 \text{ mg/l}$	$\leq 75 \text{ mg/l}$
Sostanze organiche (analisi al permanganato)	$\leq 2 \text{ mg/l } O_2$ oltre l'acqua di approvvigionamento	$\leq 2 \text{ mg/l } O_2$ oltre l'acqua di approvvigionamento
Nitrati	Valore dell'acqua potabile	$\leq 20 \text{ mg/l } NO_3$ oltre l'acqua di approvvigionamento
Flocculanti	$\leq 0,2 \text{ mg/l}$ in Al o Fe (rispetto al flocculante impiegato)	$\leq 0,2 \text{ mg/l}$ in Al o Fe (rispetto al flocculante impiegato)
Requisiti microbiologici		
Conta batterica a $22^\circ C$	$\leq 100 \text{ ufc/1 ml}$	$\leq 200 \text{ ufc/1 ml}$
Conta batterica a $36^\circ C$	$\leq 10 \text{ ufc/1 ml}$	$\leq 100 \text{ ufc/1 ml}$
Escherichia coli	$\leq 0 \text{ ufc/100 ml}$	$\leq 0 \text{ ufc/100 ml}$
Enterococchi	$\leq 0 \text{ ufc/100 ml}$	$\leq 0 \text{ ufc/100 ml}$
Staphylococcus aureus	$\leq 0 \text{ ufc/100 ml}$	$\leq 1 \text{ ufc/1 ml}$
Pseudomonas aeruginosa	$\leq 0 \text{ ufc/100 ml}$	$\leq 1 \text{ ufc/1 ml}$

Requisiti dell'acqua

Come è stato già introdotto nella sezione precedente, per il rispetto delle norme igieniche e sanitarie, sono previsti obblighi normativi riguardanti l'acqua impiegata nell'attività natatoria. In particolare, la normativa fissa dei criteri specifici a seconda della destinazione dell'acqua e descrive dettagliatamente i punti di prelievo, le modalità di analisi e la frequenza minima di queste ultime (Prospetto 2). I requisiti possono essere riassunti nei tre punti seguenti (per ulteriori approfondimenti rimandiamo alla bibliografia):

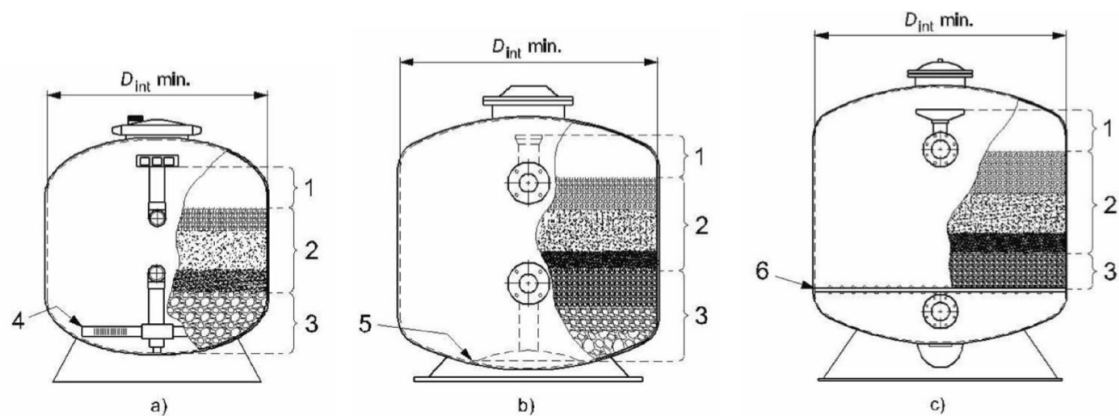


Figura 4.2: Filtro a massa multistrato (1 - Spazio libero; 2 - Strati filtranti; 3 - Strati di supporto di graniglia; 4 - Diffusori; 5 - Campana; 6 - Piastra).

- l'acqua di approvvigionamento deve essere potabile (requisiti descritti nel Decreto Legislativo del 2 febbraio 2001 N.31);
- l'acqua di immissione (ovvero l'acqua trattata dall'impianto) deve avere caratteristiche chimico-fisiche e microbiologiche descritte nel Prospetto 1;
- l'acqua di vasca, ovvero il volume contenuto nella piscina, deve rispettare i requisiti riportati nell'Allegato 1, Tabella A dell'accordo Stato-Regioni del 16 gennaio 2003.

Requisiti degli impianti di filtrazione

In base all'attività a cui è dedicata la vasca e in base alla tipologia di piscina, la norma riporta il tempo di ricircolo massimo dell'impianto di filtrazione (Prospetto 3 della UNI). I prefiltri devono essere almeno due, installati in parallelo. I filtri possono essere di varie tipologie e in ogni caso ne devono essere presenti per ogni vasca di compenso almeno due con le medesime caratteristiche. I filtri a sabbia (Figura 4.2) e quelli a massa sono i più comuni; i filtri precoat e i filtri a cartucce si trovano meno frequentemente e non possono essere impiegati con gli agenti flocculanti.

La pulizia dei filtri avviene attraverso un processo chiamato controlavaggio: si inverte il regime di flusso dell'acqua nel filtro con una portata d'acqua sufficiente a mettere in flottazione la massa filtrante.

Il flusso d'acqua usato al termine del processo deve essere scaricato.

Sistema di pompaggio

Il numero di pompe deve essere uguale al numero di filtri più una pompa supplementare di riserva. Ciascuna pompa deve essere dotata di valvola di intercettazione in aspirazione e mandata, manometro in mandata e se necessario valvola di non ritorno in mandata.

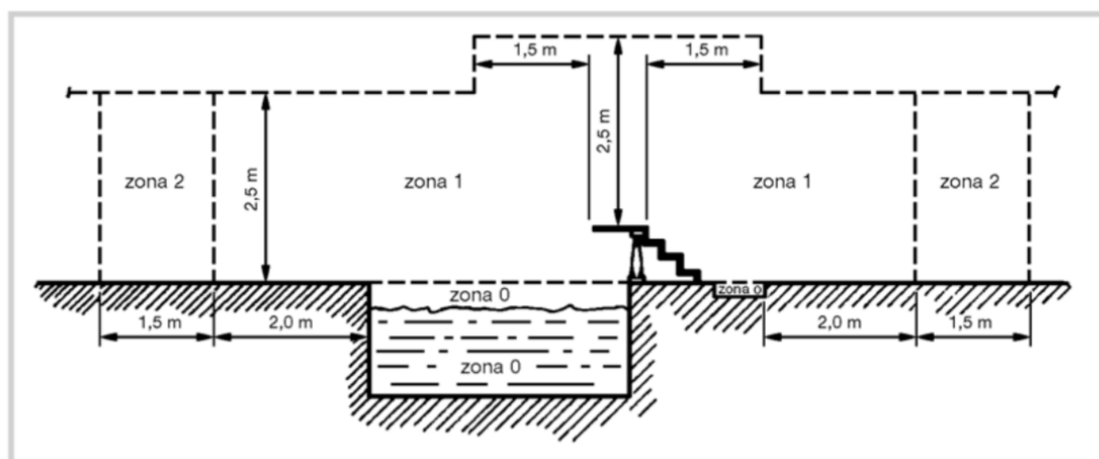


Figura 4.3: Divisione in zone del piano vasca in base alla Norma CEI 64-8.

Impianto di circolazione

Le tubazioni della piscina devono essere dimensionate in modo da avere perdite di carico $< 40 \text{ mm}_{c.a.}/m$ per l'aspirazione e $< 70 \text{ mm}_{c.a.}/m$ per la mandata. Possono avere brevi tratti di tubazione con perdite di carico superiori, purché non influiscano sulla resa finale dell'impianto. L'immissione dell'acqua deve garantire l'omogenizzazione in vasca e può avvenire sia dalle pareti che dal fondo.

4.1.2 Impianto elettrico

L'impianto elettrico delle strutture natatorie può essere in bassa o media tensione a seconda dell'estensione del centro e supplisce a tutti gli assorbimenti elettrici (pompe, ventilatori, luci, gruppo frigo...).

In presenza di vasche natatorie nel centro polisportivo gli impianti elettrici sono disciplinati dalla Norma CEI 64-8 Parte 7, dedicata agli ambienti speciali. La norma CEI è il riferimento normativo per eseguire impianti elettrici che recepisce la Legge 186/68 e il DM 37/08 sulla sicurezza degli impianti tecnici all'interno degli edifici. In questo campo la normativa impone svariati vincoli dati dalla necessità di ridurre al minimo il rischio di incidenti che potrebbero generarsi a causa dell'amplificazione della conducibilità che l'acqua e il vapore acqueo determinano.

In breve, lo scopo, è impedire che si possano verificare fenomeni di elettrocuzione per cui si divide in zone l'area natatoria in funzione della pericolosità associata e per ciascuna di esse vengono disposte opportune specifiche quali: tensione massima, classe di isolamento, gradi di protezione contro la penetrazione a liquidi, distanza fra gli apparecchi e gli impianti dalle zone più pericolose.

In Figura 4.3 si vede la divisione del piano vasca in 3 zone che sono definite nella norma CEI come segue:

- Zona 0: *volume interno della vasca e del relativo pediluvio che comprende le nicchie nelle sue pareti o nel pavimento che sono accessibili alle persone nella piscina.*

- *Zona 1: volume delimitato dalla superficie verticale situata a 2 m dal bordo della vasca, dal pavimento o dalla superficie dove possono sostare le persone e dal piano orizzontale situato a 2,50 m al di sopra di questa superficie o del pavimento. Allorché la piscina è dotata di piattaforme per tuffi, trampolini, blocchi di partenza, scivoli, o altri elementi, quali sculture, la Zona 1 comprende il volume delimitato dalla superficie verticale posta a 1,50 m attorno a queste strutture e dal piano orizzontale posto a 2,50 m al di sopra di questa superficie o del pavimento.*
- *Zona 2: volume compreso tra la superficie verticale esterna della Zona 1 e la superficie parallela a quest'ultima superficie situata a 1,50 m dalla stessa e delimitata orizzontalmente dal pavimento o dalla superficie dove possono sostare le persone e dal piano orizzontale posto a 2,50 m al di sopra di questa superficie o del pavimento.*

4.1.3 Impianto di climatizzazione

L'impianto di climatizzazione comprende il riscaldamento, il rinfrescamento, la ventilazione e (se previsto) il controllo dell'umidità relativa. Le tipologie impiantistiche sono ovviamente molteplici dato che possono differire per molti aspetti e componenti:

- sottosistema di emissione;
- sottosistema di regolazione;
- sottosistema di distribuzione;
- sottosistema di accumulo;
- sottosistema di generazione.

L'impianto idraulico per il riscaldamento e la distribuzione di acqua calda sanitaria viene gestito da un sistema automatico di regolazione: le temperature di mandata dell'acqua vengono controllate tramite l'azionamento di valvole miscelatrici posizionate sulle tubazioni di mandata (come in Figura 4.4).

Tuttavia, l'impianto di climatizzazione può essere di vario genere, sia per quanto riguarda la produzione e/o trasformazione energetica, sia per quanto riguarda la distribuzione e la tipologia di terminali.

Per il piano vasca coperto alcune generalità possono essere indicate, dato che la climatizzazione deve soddisfare le condizioni ambiente richieste da normativa per l'attività svolta e la deumidificazione continua dell'aria del vano piscina a protezione della struttura da danni dovuti all'umidità. Per garantire le condizioni termiche-igrometriche dell'aria, il piano vasca è sempre servito da un impianto ad aria. Questo può essere un impianto a tutt'aria (con unità di trattamento dell'aria o termoventilante) o un impianto misto aria-acqua (in genere, UTA più pavimento o strisce radianti). Si nota che, a prescindere dall'intensità di utilizzo della piscina coperta, è necessario un funzionamento continuo (24 ore su 24) dell'impianto di climatizzazione a causa dell'alto grado di evaporazione della superficie d'acqua e dal lungo transitorio termico che sarebbe necessario per scaldare tutte le mattine il complesso. In breve, per evitare danni alla struttura e contemporaneamente mantenere le condizioni ambiente prescritte da normativa il piano vasca

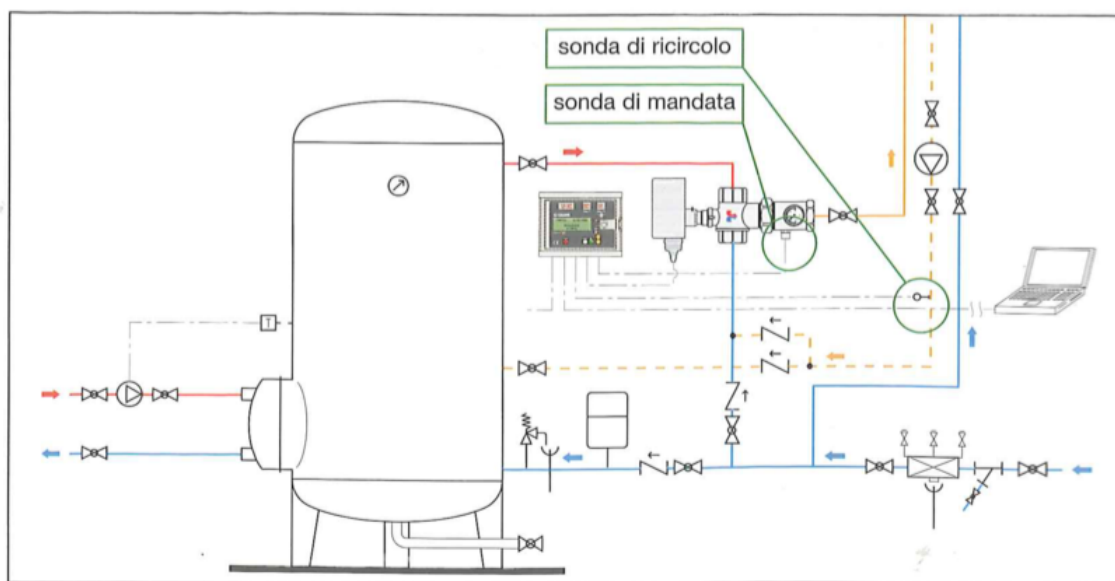


Figura 4.4: Sistema di controllo della temperatura dell'acqua di mandata.

viene climatizzato tutto il giorno, in alcuni casi impostando solo un'attenuazione notturna.

Per il resto dell'edificio è necessario andare a studiare caso per caso gli schemi funzionali dato che le zone potrebbero essere servite solo dall'impianto ad acqua oppure da un impianto misto aria-acqua.

Nel caso siano presenti spa e palestra è frequente trovare un'UTA dedicata a ciascuno di questi ambienti.

Abbattimento anti-legionella

Aggiungiamo per completezza a questa sezione un accenno all'abbattimento anti-legionella. Questa azione nelle strutture natatorie e sportive è essenziale per mantenere la salubrità di utenti e ambiente. Per eseguire questa operazione, viene impostato il regolatore dedicato affinché ad orari programmati, questo aumenti per un certo periodo di tempo la temperatura.

Spesso, per migliorare il controllo di disinfezione termica, viene posto un termostato anche sul tubo dell'acqua di ritorno dalla distribuzione (come in Figura 4.4), in maniera tale da verificare la temperatura raggiunta su tutta la rete o su una sua parte (questo dipende dalla posizione del termostato sulla tubazione di ritorno che dovrebbe essere installato sulla parte più remota dell'impianto). Nel caso in cui le temperature non siano sufficienti al processo di abbattimento il sistema di controllo è programmato per comunicare la mancata disinfezione (Figura 4.5).



Figura 4.5: Sistema di regolazione e avviso.

4.2 Normativa CONI

La Norma CONI [11] definisce i principali obblighi per la costruzione e la ristrutturazione di impianti sportivi²⁰ al fine di garantire la sicurezza, l'agibilità, l'igiene e la funzionalità degli spazi. In vari casi si affianca e si supporta con normative della Legge italiana (come norme urbanistiche, norme di sicurezza, norme di igiene ecc. . .). Di conseguenza, risulta necessario verificare la condizione più restrittiva fra la CONI e la normativa vigente in materia. In particolare, la normativa CONI regola:

- gli spazi dedicati all'attività sportiva e gli spazi accessori e sussidiari funzionali all'attività (caratteristiche geometriche qualitative e quantitative delle aree, fruibilità degli utenti DA, spazi per il pubblico, locali medici, vie di uscita. . .);
- regolamenti tecnici e procedure di omologazione delle FSN e DSA;
- caratteristiche di percorsi attrezzati nel verde; piste ciclabili; parchi acquatici e simili;
- affollamento, ricambi d'aria, velocità massima dell'aria, umidità relativa, illuminazione e diffusione sonora negli ambienti.

I requisiti relativi alle attrezzature e alle caratteristiche dimensionali, costruttive e tecniche degli spazi destinati alla pratica sportiva vengono commisurati, dalla normativa CONI stessa, in funzione del livello di attività a cui l'impianto è dedicato (amatoriali, agonistiche provinciali, agonistiche regionali, nazionali ecc. . .). Per quanto riguarda le vasche, queste vengono normate in specifiche tecniche definite dalla Federazione Italiana Nuoto (norme FINA [12]).

²⁰Impianto sportivo: luogo conforme e attrezzato per la pratica di discipline sportive regolamentate dalle Federazioni Sportive Nazionali e dalle Discipline Sportive Associate, nel seguito indicate come FSN e DSA.

Tabella 4.2: Confronto delle temperature dell'acqua fornite dalla norma CONI e dalla Conferenza Stato-Regioni.

Temperatura dell'acqua di vasca		nuotatori	non nuotatori	esterne
CONI	minima	$24^{\circ}C$	$26^{\circ}C$	-
	consigliata	$(26 - 28)^{\circ}C$	$(28 - 29)^{\circ}C$	-
Conferenza Stato-Regioni		$(24 - 32)^{\circ}C$	$(26 - 35)^{\circ}C$	$(18 - 30)^{\circ}C$

Si riportano in questa sezione alcune prescrizioni del CONI che sono state utilizzate nella presente tesi come dato di input per la costruzione dei parametri in maniera tale da alleggerire l'*audit* ai centri e quindi stimare i consumi basandosi sulle normative vigenti che devono in ogni caso essere rispettate.

Di seguito si riportano i valori suggeriti e prescritti dalla normativa CONI e dalla Conferenza Stato-Regioni²¹ (Accordo del 16 gennaio 2003) a cui il CONI stesso si riferisce.

Affollamento degli spazi di attività

Con il fine di dimensionare le vie d'esodo, la norma CONI indica un affollamento massimo pari a 1 utente ogni 2 m^2 di superficie di vasche servite per gli impianti natatori; 1 utente ogni 2 m^2 di superficie per aree spa e 1 utente ogni 4 m^2 di superficie dello spazio di attività per tutti gli altri impianti al chiuso. In tutti e tre i casi il calcolo va arrotondato per difetto.

Temperatura dell'acqua di vasca e temperatura d'immissione dell'acqua di vasca

Le temperature minime dell'acqua di vasca definite nella norma CONI coincidono con quelle riportate nella Tabella A della conferenza Stato-Regioni (Tabella 4.1). Quest'ultima amplia leggermente il limite superiore della temperatura in vasca rispetto al CONI come si può vedere dalla Tabella 4.2 comparativa. Mediamente, anche considerando l'esperienza aziendale, si può ragionevolmente ipotizzare $29^{\circ}C$ per le piscine coperte per nuotatori; $31^{\circ}C$ per le piscine coperte per l'avviamento al nuoto e $18^{\circ}C$ per quelle esterne nelle quali, quasi sempre, non si effettua alcun riscaldamento. I gestori si limitano a riempire le vasche esterne a maggio e lasciare che l'irradiazione solare riscaldi l'acqua proveniente dall'acquedotto (circa $15^{\circ}C$) di qualche grado.

²¹La Conferenza Stato-Regioni del 2003 costituisce un'accordo tra il Ministro della salute, le regioni e le province autonome di Trento e di Bolzano al fine di legiferare a proposito degli aspetti igienico-sanitari per la costruzione, la manutenzione e la vigilanza delle piscine a uso natatorio. L'accordo, ufficialmente pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale [1], è stato successivamente rivisto da una consultazione pubblica con il fine di: aggiornare i requisiti igienico-ambientali, semplificare e rendere più chiara e univoca l'interpretazione dei vari requisiti e delle modalità di esecuzione dei controlli. La proposta di revisione è stata redatta tenendo conto delle linee Guida dell'Organizzazione Mondiale della Sanità [28] così da comprendere la valutazione dei rischi per la salute nelle piscine e ambienti simili, il loro monitoraggio e la sorveglianza.

La temperatura d'immissione dell'acqua è normata dall'Accordo Stato-Regioni e, coerentemente alle temperature in vasca, ammette i seguenti valori:

- $(24 - 32)^{\circ}C$ per vasche coperte;
- $(26 - 35)^{\circ}C$ per vasche coperte dedicate ai corsi per bambini;
- $(18 - 30)^{\circ}C$ per vasche scoperte.

Nella tesi, per valutare il consumo termico per il riscaldamento delle vasche, si terrà conto di una temperatura di immissione di: $29^{\circ}C$ nelle vasche nuotatori, $31^{\circ}C$ nelle vasche di avviamento al nuoto e $15^{\circ}C$ nelle vasche esterne a meno di casi particolari (come vasche esterne riscaldate dell'area spa).

Temperatura e umidità relativa delle zone climatiche

La normativa CONI definisce le condizioni termo-igrometriche negli ambienti sportivi e ausiliari alle attività. Riportiamo di seguito i valori richiesti:

- piano vasca: la temperatura dell'aria deve essere maggiore o uguale alla temperatura delle vasche (Accordo Stato-Regioni del 2003) mentre, l'umidità relativa non deve superare il 70%;
- spogliatoi afferenti al piano vasca: il CONI ammette temperature comprese fra $(20 - 24)^{\circ}C$, con un grado igrometrico pari a $UR = 60\%$;
- sale di attività: temperatura fra $(16 - 20)^{\circ}C$ e $UR = 50\%$;
- spogliatoi afferenti alla sala di attività: $(18 - 22)^{\circ}C$, $UR = 50\%$;
- atrio: $20^{\circ}C$, $UR = 50\%$.

Obblighi di ventilazione nelle aree di un centro polisportivo

La norma CONI (Tabella C) con l'Accordo Stato-Regioni del 2003 (Paragrafo 1.6, "Requisiti termo-igrometrici e di ventilazione") definisce i requisiti di ventilazione richiesti nei vari ambienti.

Coerentemente alle necessità dello studio, riportiamo solo i seguenti valori:

- piano vasca: almeno $20 \text{ m}^3/h$ per m^2 di vasca con una velocità dell'aria inferiore ai $0,10 \text{ m/s}$ nell'area adibita all'attività degli utenti (in prossimità della superficie dell'acqua);
- spogliatoi afferenti al piano vasca: maggiore di 4 vol/h ;
- sala di attività fitness o palestra: $30 \text{ m}^3/h$ per persona (calcolata sulla base del massimo affollamento sulla superficie di attività) e $20 \text{ m}^3/h$ per persona per la zona dedicata al pubblico;
- spogliatoi afferenti alla sala di attività: 5 vol/h ;
- atrio: $1,5 \text{ vol/h}$.

Capitolo 5

Analisi partizionale dei gruppi

L'analisi partizionale dei gruppi (anche detta *clustering* partizionale) è stata applicata con successo nell'analizzare dati di consumo di edifici e impianti industriali. In letteratura è stato dimostrato che questo tipo di analisi è una tecnica efficace per identificare pattern di consumo energetico e in particolare risulta una tecnica interessante per fasi di pre-processamento dei dati [39].

Il seguente capitolo presenta alcune tecniche di *clustering* partizionale con il fine di individuare fra i centri natatori in analisi un campione diversificato i cui consumi siano rappresentativi dell'intera popolazione. Questo studio è necessario per identificare i centri che comporranno la conoscenza della *machine learning* e quelli che invece verranno utilizzati per verificare che la rete neurale abbia appreso delle relazioni corrette e quindi restituisca una buona predizione dei consumi. La scelta del campione è essenziale affinché il Tool ottenga delle buone stime dei target di consumo. In particolare, affinché la rete neurale implementata apprenda da classi diverse in maniera omogenea, il campione fornito alla rete neurale deve risultare bilanciato fra le famiglie. Ovvero, per ogni famiglia ottenuta dall'analisi di *clustering*, devono essere scelti lo stesso numero di centri per istruire la *machine learning*; in questo modo si evita che una tipologia pesi maggiormente sull'apprendimento. Di conseguenza il numero massimo di centri fornibili alla rete neurale per l'apprendimento è pari alla numerosità del cluster con il più basso numero di elementi meno uno (affinché rimanga almeno un termine della famiglia per la fase di validazione) per il numero di famiglie individuate. In breve, definito un *clustering* con k famiglie di numerosità n_i per $i = 1, 2, \dots, k$,

$$N_{learning} \leq k \cdot (\min\{n_i\} - 1)$$

Secondo la letteratura, l'istruzione della rete neurale deve essere effettuata con un campione $N_{learning}$ che comprende all'incirca l'80% dei dati disponibili in maniera tale da sfruttare la maggior parte dei dati per l'addestramento e solo la restante parte di dati (circa il 20%) per la fase di validazione. In questo studio, a causa dell'esiguo numero di strutture natatorie e sportive analizzate, è evidente che diventa una criticità non indifferente riuscire a selezionare l'80% dei centri soddisfacendo contemporaneamente la

richiesta di bilanciamento dei dati per l'apprendimento. Visti i risultati del *clustering*, per rispettare queste due condizioni è stato necessario adottare tecniche di moltiplicazione del dato (*data argumentation*, vedi Capitolo 7 a pagina 82).

Il presente Capitolo è suddiviso in quattro sezioni: nel primo si introduce il concetto di cluster, evidenziando i blocchi fondamentali che lo caratterizzano; la seconda sezione presenta la scelta delle variabili considerate (ovvero la fase di *feature selection*) discutendo i pregi e le criticità associate; la terza introduce il problema di *clustering* per serie temporali; il quarto riporta il confronto fra i *clustering* eseguiti con metriche e algoritmi differenti evidenziando i risultati conseguiti; infine, nell'ultima sezione si sintetizzano i risultati finali dell'analisi e si definiscono i centri che saranno la base dell'apprendimento.

5.1 Introduzione alle tecniche di *clustering* partizionale

L'idea di cluster è stata introdotta per la prima volta da Driver e Kroeber nel 1932 nell'ambito dell'antropologia; negli anni successivi è stata utilizzata in studi di psicologia e oggi le applicazioni spaziano in moltissimi settori (*machine learning* e *data mining*, *pattern recognition*, bioinformatica, ecc...).

Il *clustering* è un processo matematico con l'obiettivo di suddividere n elementi/oggetti in k classi (o cluster/gruppi/famiglie); tale suddivisione avviene in base alla similarità e/o dissimilarità con gli altri elementi, così che ciascun cluster risulta caratterizzato dalle proprietà di omogeneità (ovvero similarità di oggetti interni al cluster) e separazione (ovvero differenza fra oggetti appartenenti a cluster diversi). In letteratura è possibile ritrovare una moltitudine di tecniche proposte per la definizione di un cluster partizionale, fra queste una delle più intuitive consiste nel minimizzare la somma dei quadrati delle distanze fra le realizzazioni e i centroidi dei gruppi a cui sono state assegnate. Per esempio, si immagini di avere un set di n osservazioni $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n\}$, dove $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}$, e un numero di classi k (con $k < n$), lo scopo dell'algoritmo di *clustering* è quello di suddividere le osservazioni $\mathbf{x}_i$ in k gruppi, definiti dai rispettivi centroidi $\mathbf{C} = \{\mathbf{c}_1, \dots, \mathbf{c}_k\}$ così che la somma delle distanze al quadrato sia minimizzata, ovvero:

$$\mathbf{C}^* = \min_{\mathbf{C}} \sum_{j=1}^k \sum_{\mathbf{x}_i \in \mathbf{c}_j} dist^2(\mathbf{x}_i, \mathbf{c}_j)$$

dove, $\mathbf{c}_j$ è il centroide della partizione j -esima e $\mathbf{C}^* = \{\mathbf{c}_1^*, \dots, \mathbf{c}_k^*\}$ è l'insieme dei centroidi che minimizzano la somma delle distanze al quadrato.

Come si può notare, le tecniche di *clustering* partizionale possono essere ricondotte a un insieme di metodi utilizzati per risolvere problemi di ottimizzazione. Tuttavia, trovare un ottimo globale è

computazionalmente inefficiente²², perciò le tecniche di *clustering* procedono in maniera iterativa cercando un ottimo locale, che risulta fortemente dipendente dalla fase di inizializzazione dell'algoritmo. Data questa forte dipendenza dei risultati dalla fase di inizializzazione, in letteratura viene considerata una buona pratica eseguire lo studio di *clustering* più volte e selezionare l'ottimo locale migliore. Fra le soluzioni ottenute, la migliore divisione in famiglie è stabilita mediante un criterio predefinito. In genere, è possibile utilizzare come criterio di selezione un indice di validità del cluster (come la *silhouette*, l'indice di Dhunn o ancora la *score function*) oppure la somma delle distanze al quadrato delle realizzazioni dai rispettivi centroidi. Nel primo caso si sceglie la simulazione che restituisce l'indice di validità migliore. Nel secondo si seleziona la simulazione che minimizza la distanza fra gli elementi interni a una stessa famiglia.

L'impostazione di uno studio di clusterizzazione si basa sulla definizione di tre elementi fondamentali (Figura 5.1):

- la rappresentazione dei dati,
- la metrica,
- l'algoritmo di assegnazione in famiglie.

Rappresentazione dei dati L'analisi cluster non ha modo di identificare quali variabili siano rilevanti, per questo motivo la scelta delle variabili da includere nello studio deve essere subordinata da considerazioni concettuali relative alla natura del fenomeno e del *data set* associato. Ovviamente, ciò è fondamentale perché i risultati della clusterizzazione dipendono dalle variabili incluse nello studio e, in generale, è conveniente ridurre i problemi di *clustering* multidimensionali a dimensioni inferiori, sia per un fatto di tempo di calcolo, sia per evitare che parametri poco significativi influenzino la suddivisione in famiglie [26]. A tal proposito, in mancanza di possibili ragionamenti legati alla natura dei dati, è possibile applicare uno studio di selezione delle caratteristiche (processo di *feature selection*) che restituisca

²²Per esempio se volessimo determinare la suddivisione migliore di 40 oggetti in sole 2 classi le possibilità da investigare e confrontare l'una con l'altra sarebbero pari alla somma delle combinazioni che si ottengono scegliendo k elementi in un insieme di n diviso due (dato che non ci interessa l'ordine)

$$\frac{1}{2} \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} = \frac{2^{40}}{2} \approx 2^{4 \cdot 10} \approx 1000^4 = 10^{12}$$

dove si è usato il teorema binomiale per il calcolo con $a = b = 1$

$$(a + b)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} a^k b^{n-k}$$

Ammettendo una velocità di clock di 3,4 *GHz* e ipotizzando un centinaio di operazioni elementari per il calcolo della somma delle distanze al quadrato per ciascuna configurazione si avrà un tempo di calcolo dell'ordine di 10^4 ore di calcolo.

$$t = \frac{n_{op.elementari} \cdot 10^{12}}{f_{clock}} = \frac{100 \cdot 10^{12}}{3,4 \cdot 10^6 \cdot 3600} = 8,4 \cdot 10^3 \quad ore$$

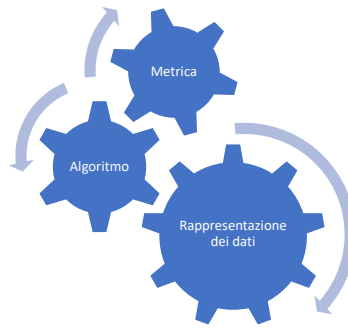


Figura 5.1: Elementi che definiscono il processo di *clustering*.

i parametri in ordine di rilevanza (per esempio, citiamo l'algoritmo *minimum redundancy maximum relevance*, implementabile su Matlab con la funzione *fsulaplacian*).

Un'ulteriore criticità associata alla rappresentazione dei dati scelti per individuare una suddivisione in un gruppo di oggetti tramite un *clustering* è la scala di misura delle variabili. Questa può essere un problema perché, cambiando la scala, cambia la distanza identificata fra gli oggetti e questo può generare delle distorsioni che modificano completamente il risultato del *clustering*. Un problema tipico si presenta quando una delle variabili ha un ordine di grandezza maggiore/minore delle altre: la variabile tende a dominare/sottomettersi rispetto alle altre. Per aggirare questo problema ogni variabile può essere standardizzata anche se questa operazione introduce un'ulteriore criticità, quella di ridurre la variabilità (quindi la distanza) fra i cluster. Ciò nonostante, molti testi raccomandano la standardizzazione, mentre se si è in dubbio è utile implementare più analisi e osservare i diversi risultati tenendo presente la tipologia dei dati e il campo di applicazione. Infine, per alcuni set di dati può risultare conveniente applicare un filtro al fine di eliminare il rumore di fondo dai dati. In breve, la selezione delle caratteristiche su cui effettuare la suddivisione in famiglie deve tenere conto di elementi quali: la dimensione del data set; la scala delle variabili che compongono il data set; il costo computazionale (tempo di calcolo) e la presenza di rumore nei dati.

Metrica Il secondo blocco fondamentale di un *clustering* è la metrica, ovvero la distanza che viene utilizzata per valutare la similarità o dissimilarità fra gli oggetti. La scelta di questa distanza può essere determinante per ottenere una buona divisione degli elementi.

Gli algoritmi di *similarity learning* spesso usano distanze standard (come quella euclidea) per rappresentare la similitudine fra i dati; tuttavia questo può portare a ignorare proprietà importanti nel *data set*, per cui i risultati possono non essere ottimali. La ricerca di una distanza che porti i dati simili più vicini possibile, spingendo lontano i dati non simili, può aumentare significativamente la qualità del cluster finale [37].

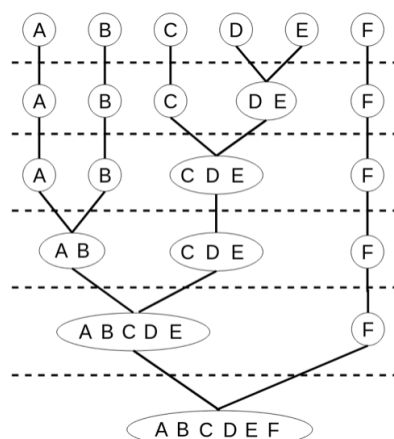


Figura 5.2: Esempio di *clustering* gerarchico.

Algoritmo di assegnazione in famiglie La scelta della tecnica di *clustering* non è meno importante della metrica e può influire nettamente sul risultato della partizione sia in termini di accuratezza (poiché ogni metodo definisce in maniera differente la similitudine e la diversità fra le osservazioni), sia in termini di efficienza (dato che il costo computazionale è diverso per ciascun algoritmo). In letteratura si trovano molteplici algoritmi di *clustering*; in questa sezione forniremo solo una descrizione qualitativa delle caratteristiche principali che li distinguono; mentre nei capitoli successivi verranno approfonditi unicamente quelli implementati e utilizzati per lo studio relativo alla tesi.

Innanzitutto, si possono differenziare due diversi approcci che un algoritmo di cluster può seguire: quello di aggregazione (chiamato anche *bottom-up*) e quello di disaggregazione (chiamato *top-down*). Nel primo ogni oggetto dell'analisi è considerato un cluster all'inizio, poi, in maniera iterativa, l'algoritmo unisce i cluster più vicini sino ad ottenere il numero di cluster assegnato oppure, sino a raggiungere una distanza minima fra elementi di cluster diversi o ancora, fino a soddisfare criteri statistici preimposti. La seconda tipologia procede nella maniera opposta quindi, inizialmente considera tutti gli oggetti nello stesso cluster, poi progressivamente divide i gruppi in sotto gruppi in base a misure di massima distanza sino a soddisfare un determinato criterio.

Un'ulteriore classificazione delle tecniche di *clustering* divide le tecniche partizionali da quelle gerarchiche. Le tecniche partizionali minimizzano una funzione di costo per determinare il raggruppamento in famiglie; mentre le tecniche di *clustering* gerarchico creano un dendrogramma andando a modificare progressivamente la massima distanza fra due oggetti della stessa famiglia (Figura 5.2). Per esempio quando la distanza fissata è molto piccola (condizione molto restrittiva), ciascun oggetto formerà una classe a sé stante.

Per concludere si sottolinea che non esistono a priori una tecnica e una metrica migliori delle altre. La scelta ottimale deve essere individuata sulla base del *data set* e del campo di applicazione; in genere

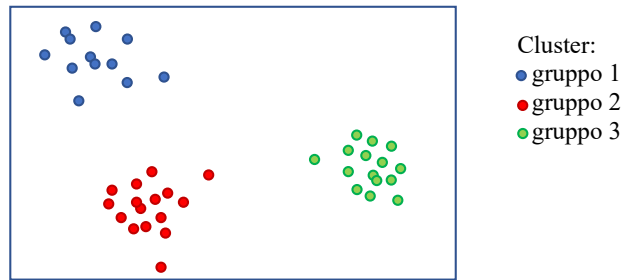


Figura 5.3: Esempio di oggetti classificati attraverso un processo di *clustering* che ha permesso di ottenere una buona suddivisione.

potrebbero condurre a buoni risultati più tecniche per cui il procedimento migliore da seguire consiste in un confronto fra strategie differenti. A questo proposito è bene evidenziare che la scelta fra due o più cluster ottenuti con tecniche (algoritmo e/o metrica e/o rappresentazione dei dati) differenti può basarsi sulla somma delle distanze al quadrato dal rispettivo centroide, se e solo se, la metrica è la medesima. In caso contrario, non avrebbe senso confrontarle su questa base poiché le metriche possono avere ordini di grandezza completamente diversi; allora in letteratura il confronto viene eseguito sulla base di uno o più indici di validità del cluster (*Cluster Validity Index* o CVI).

Negli anni sono stati definiti molteplici CVI; in genere, tutti fanno riferimento a due caratteristiche che di fatto descrivono la bontà del cluster: (i) la massima distanza (nel senso di misura di similarità) fra elementi assegnati a famiglie diverse e (ii) la minima distanza fra elementi della stessa famiglia. Per esempio in Figura 5.3 le tre classi sono ben separate e gli oggetti che le compongono sono ravvicinati, ciò è un indice di bontà del risultato conseguito tramite *clustering*.

5.2 Impostazioni preliminari per il *clustering* : selezione delle caratteristiche e rappresentazione dei dati

In questo studio di tesi la selezione dei centri identificati per la fase di apprendimento della rete neurale viene eseguita sulla base di un campione diversificato e rappresentativo estratto da uno studio di clusterizzazione dei centri natatori in analisi. Affinché il campione per l'apprendimento abbia queste caratteristiche, si sono utilizzati i dati dei consumi mensili per dividere i centri natatori in classi. In particolare, si è esclusa una suddivisione dei centri fondata su dei valori annuali per due ragioni principali: (i) il dato essendo aggregato nasconderebbe la stagionalità tipica di alcune strutture natatorie e (ii) la suddivisione del *data set* avverrebbe quasi unicamente basandosi sulla dimensione del centro. Per ovviare ai due problemi presentati si è impostato lo studio sulla base di serie temporali di consumo (in modo da valutare la stagionalità) ed è stata eseguita una normalizzazione dei dati affinché l'analisi ricerchi fra i centri similitudini di forma e non di scala.

Lo studio è stato eseguito su 36 centri sportivi e natatori sulla base di una serie temporale di due anni di consumi mensili raccolti e resi disponibili dall'azienda HF. In particolare, consumi termici ed elettrici sono stati valutati insieme a causa della commistione dei vettori energetici in alcune tipologie impiantistiche (si pensi per esempio al caso della cogenerazione o a un sistema ad assorbimento).

Tutti i valori registrati mese per mese da ciascun contatore sono stati trasformati in tonnellate equivalenti di petrolio (TEP) affinché nell'analisi fosse possibile sommare insieme le due serie temporali: consumi termici ed elettrici. La conversione è stata effettuata sulla base dei valori pubblicati dalla FIRE²³, la quale ha il compito di aggiornare periodicamente i coefficienti di conversione in funzione del quadro legislativo e di mercato. Riportiamo in Tabella 5.1 le conversioni utilizzate coerentemente alla normativa vigente²⁴. La scelta eseguire uno studio di clustering di serie temporali richiede l'approfondimento delle tecniche e delle problematiche associate a queste ultime: presentiamo di seguito quanto fatto.

5.3 Clusterizzazione di serie temporali

Come è noto, le serie temporali possono essere affette da distorsioni legate al campionamento del dato o dalla natura stessa del fenomeno osservato, si pensi per esempio ad un confronto fra cardiogrammi che sicuramente differiranno in fase, ampiezza e frequenza del battito cardiaco. Perciò, le metriche di *clustering* devono soddisfare alcuni invarianti al fine di confrontare le sequenze analizzate in una maniera significativa rispetto allo studio affrontato. Le principali invarianze che si possono ricercare quando si effettua una clusterizzazione vengono sintetizzate nei punti seguenti.

- Invarianza di scala e traslazione: permette di confrontare realizzazioni con ampiezze e fasi differenti, ammettendo che possano essere simili se confrontate con un'opportuna trasformazione del tipo $\mathbf{x}' = a + b\mathbf{x}$.
- Invarianza di fase dell'intera sequenza o di una sua parte: identifica simili anche sequenze o sotto sequenze di serie temporali nel caso in cui esista un disallineamento locale o globale.
- Invarianza di occlusione: la misura di similitudine è calcolata ignorando le sotto sequenze mancanti, ovvero omettendo il confronto fra le sotto sequenze in cui il dato non è presente.
- Invarianza di complessità: identifica le realizzazioni come simili anche se le complessità associate alle due serie temporali sono differenti. Per esempio nel caso di un segnale sonoro la realizzazione acquisita in uno spazio aperto avrà un certo rumore di fondo che addizionato al segnale produce una complessità maggiore di quella che si avrebbe nel caso in cui il segnale fosse stato registrato all'interno.

²³Federazione italiana per l'uso razionale dell'energia.

²⁴La Circolare MiSE del 18 Dicembre 2014 specifica di far riferimento ai valori della FIRE in mancanza di dati precisi sui combustibili utilizzati da ciascun centro (potere calorifico e densità).

Tabella 5.1: Coefficienti di conversione adottati da FIRE in base al punto al punto 13 della nota esplicativa della circolare MiSE del 18 Dicembre 2014.

Combustibile	Unità	Fattore di conversione in TEP
Gasolio ⁽¹⁾	t	1,02
	1.000 litri	0,860
Olio combustibile	t	0,98
Gas di petrolio liquefatti (GPL) ⁽⁶⁾ - stato liquido	t	1,1
Gas di petrolio liquefatti (GPL) ⁽²⁾⁽⁶⁾ - stato liquido	1.000 litri	0,616
Gas di petrolio liquefatti (GPL) ⁽³⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾ - stato gassoso	1.000 Smc	2,53
Gas di petrolio liquefatti (GPL) ⁽³⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾ - stato gassoso	1.000 Nmc	2,67
Benzine autotrazione ⁽⁴⁾	t	1,02
	1.000 litri	0,765
Oli vegetali	t	0,88
	1.000 litri	0,79
Pellet	t	0,4
Legna macinata fresca (cippato)	t	0,2
Gas naturale ⁽⁵⁾	1.000 Smc	0,836
	1.000 Nmc	0,882
Gas Naturale Liquefatto (GNL)	t	1,08
Biogas ⁽⁵⁾	1.000 Smc	0,52
	1.000 Nmc	0,55
Elettricità	MWh	0,187
Calore consumato da fluido termovettore acquistato	MWh	0,103
	GJ	0,029
è stato considerato un fattore di conversione pari a $4,19 \text{ KJ/kcal}$. (1) è stata adottata una densità di $0,84 \text{ kg/dm}^3$ (2) è stata adottata una densità di $0,56 \text{ kg/l}$ (3) è stata adottata una densità di $2,3 \text{ kg/m}^3$ a $T = 15,5 \text{ deg C}$ e pressione atmosferica (4) è stata adottata una densità di $0,74 \text{ kg/dm}^3$ (5) è stato adottato un fattore di conversione da Nm^3 a Sm^3 pari a: $1.000 \text{ Nm}^3 = 1.055 \text{ Sm}^3$ (6) è stata considerata una proporzione tra Butano e Propano rispettivamente pari a 70% e 30%		

In letteratura è stato dimostrato che le metriche che offrono un’invarianza in ampiezza e fase hanno performance migliori e di conseguenza sono utilizzate come metriche nelle clusterizzazione basate sulla forma (*shape-based clustering*). Nel presente caso di studio l’invarianza di ampiezza e fase è stata raggiunta attraverso la z-normalizzazione.

In Figura 5.5 si riportano i dati normalizzati al fine di eliminare l’ordine di grandezza dei consumi e confrontare i centri sulla base della forma di consumo durante l’anno. La normalizzazione è stata eseguita con la funzione *normalized* la quale implementa sulla matrice dei consumi (matrice $N_{centri \times 12}$) la funzione *zscores* su ciascuna riga. In questo modo si ottiene una matrice in cui ogni riga corrisponde al vettore del valore di consumo (energetico e termico insieme o di acqua) normalizzato con media zero e deviazione standard uno di un centro polisportivo. Matematicamente si calcola per ciascuna riga

$$z_i = \frac{X_i - \mu^*}{\sigma^*}$$

dove z_i è il valore di consumo del mese i-esimo normalizzato, X_i è il consumo i-esimo della riga, μ^* è la media campionaria della serie temporale; σ^* è la deviazione standard campionaria calcolata come segue:

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu^*)^2}{N - 1}}$$

Si aggiunge per chiarezza che la funzione *zscores* misura la distanza di un punto dalla media in termini di deviazione standard; di conseguenza il set di dati standardizzati ha media zero, deviazione standard uno e mantiene le proprietà di forma del set di dati originale come richiesto dall’invarianza.

5.3.1 Metriche per il *clustering* di serie temporali

Come è già stato accennato, gli algoritmi di *clustering* confrontano la similitudine fra elementi sulla base di una misura di distanza (che chiamiamo metrica). Se una misura di similarità non produce buoni risultati può essere utile aumentare i data set e se ciò non può essere fatto è buona pratica tentare il *clustering* con altre metriche [29, 38]. Le metriche maggiormente utilizzate nel campo della clusterizzazione di serie temporali sono: la distanza euclidea (ED), semplice e ragionevolmente efficiente e accurata (anche se poco robusta nel caso di serie temporali); cDTW (constrained Dynamic Time Warping) che permette allineamenti locali non lineari fra le realizzazioni e ottiene buoni risultati; infine, la metrica SBD (*shape-based distance*), competitiva ed efficiente in termini di tempo di calcolo, raggiunge risultati simili al cDTW.

La distanza Euclidea si definisce nel caso di serie temporali come la radice della somma dei quadrati delle distanze fra due realizzazioni di uguale lunghezza. Dati i vettori $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_m)$, $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_m)$ di lunghezza m si calcola ED come:

$$ED(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - y_i)^2}$$

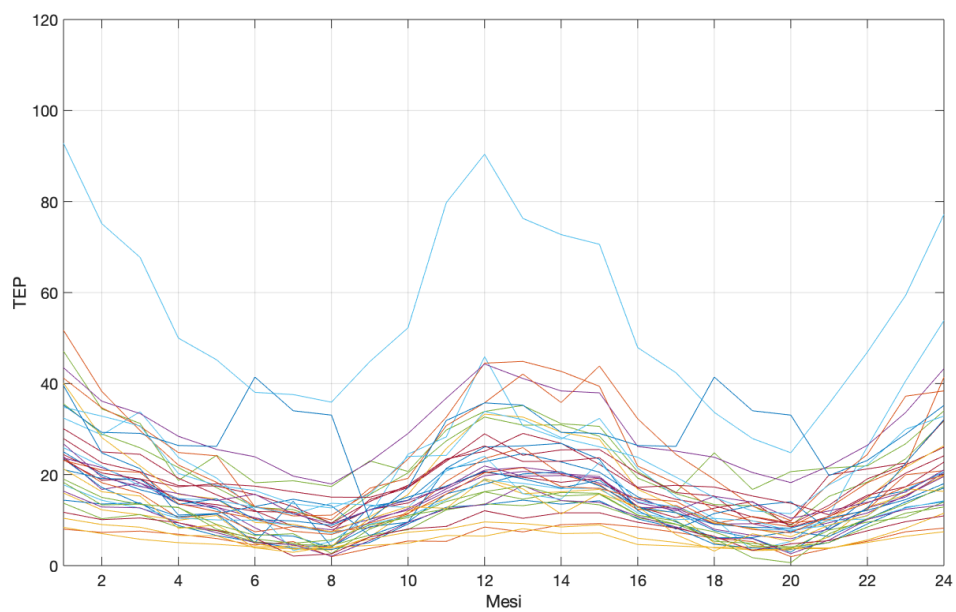


Figura 5.4: Dati mensili di consumo elettrico e termico in TEP dei centri natatori.

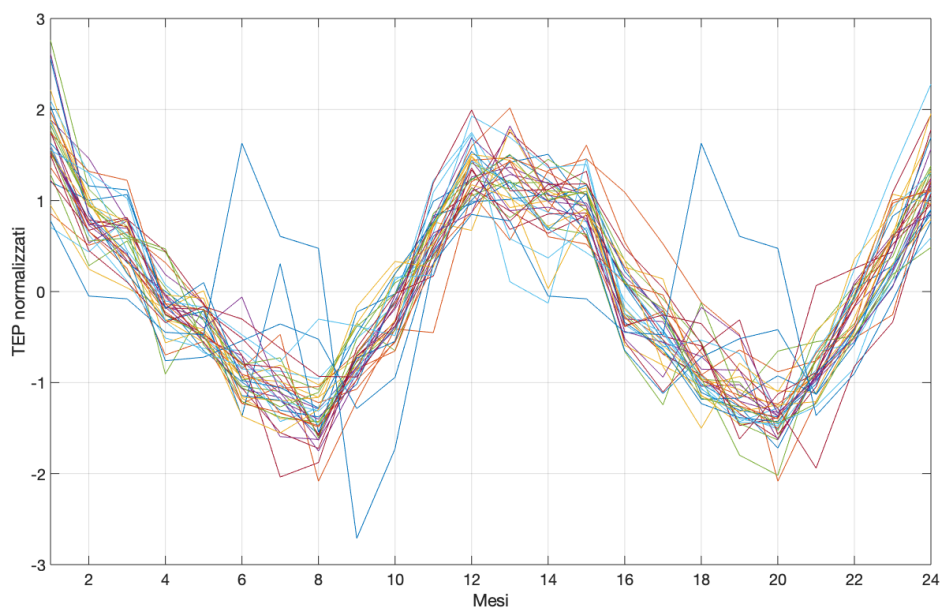


Figura 5.5: Dati mensili di consumo elettrico e termico normalizzati in TEP dei centri natatori.

La metrica cDTW si basa sulla distanza Euclidea ma ammette una finestra di indici (ovvero una banda) fra cui ricercare la minima distanza, lo spessore della banda è chiamato *warping window*. Matematicamente il problema consiste nel ricercare il minimo della radice della somma degli elementi di un vettore chiamato *warping path* $W = (w_1, \dots, w_k)$ con $k \geq m$ il quale comprende un set contiguo degli elementi della matrice delle distanze euclidee fra ogni coppia di punti (x_i, y_i) [33].

$$DTW(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sqrt{\sum_{i=1}^k w_i}$$

Questa metrica è stata approfonditamente studiata e ha il vantaggio di offrire invarianza alle distorsioni grazie alla possibilità di comparare un punto a più punti oppure, uno a nessuno; tuttavia risulta computazionalmente dispendiosa (nonostante i recenti progressi [31]). In particolare, nel nostro studio questa metrica non verrà utilizzata, poiché i dati disponibili sono effettivamente pochi e l'elasticità propria della metrica non avrebbe alcuno scopo. Un possibile sviluppo futuro potrebbe vedere un'efficace applicazione di quest'ultima in presenza di dati di consumo orari (in cui un'espansione o compressione lineare delle sequenze porterebbe a risultati insoddisfacenti).

La metrica SBD è basata su una misura di correlazione normalizzata che offre invarianza di traslazione e scala. Tale distanza, definita da Paparrizos per la caratterizzazione di serie temporali basate sulla forma, assume valori compresi fra 0 (similarità perfetta) e 2, ed è definita come segue:

$$SBD(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 1 - \max_w \left(\frac{CC_w(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{\sqrt{R_0(\mathbf{x}, \mathbf{x}) \cdot R_0(\mathbf{y}, \mathbf{y})}} \right)$$

Dove $CC_w(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ è la sequenza di cross-correlation di lunghezza $2m - 1$.

$$CC_w(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = (c_1, c_2, \dots, c_w) = R_{w-m}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad \text{con } w = 1, 2, \dots, 2m-1$$

dove (per $k = w - m$)

$$R_k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{cases} \sum_{i=1}^{m-k} x_{i+k} \cdot y_i & , \quad k \geq 0 \\ R_{-k} & , \quad k < 0 \end{cases}$$

Il calcolo di *cross correlation* può essere eseguito mediante l'utilizzo del teorema di convoluzione che permette di calcolare CC_w come la trasformata di Fourier inversa discreta del prodotto fra le trasformate di Fourier discrete delle due serie temporali $\mathbf{x}$ e $\mathbf{y}$. Per diminuire il tempo di calcolo Paparrizos propone l'utilizzo dell'algoritmo di trasformazione di Fourier veloce (Fast Fourier Transform).

$$CC_w = F^{-1}[F(\mathbf{x}) * F(\mathbf{y})]$$

In questo modo il tempo di calcolo di SBD supera in efficienza quello della metrica cDTW.

5.3.2 Algoritmi per il *clustering* di serie temporali

Nella presente sotto-sezione descriviamo i passaggi fondamentali di due algoritmi di *clustering* comunemente impiegati in questo tipo di problemi. Il primo è il classico *k-means*, padre degli algoritmi di *clustering* partizionale, il secondo è l'algoritmo *k-shape* che in letteratura è stato efficacemente utilizzato per clusterizzare serie temporali di consumo di edifici [39].

k-means

Dato l'insieme di osservazioni $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n)$, l'algoritmo di *clustering k-means* divide le realizzazioni in $k(< n)$ partizioni, $P = P_1, P_2, \dots, P_k$, in modo da minimizzare la somma delle distanze al quadrato degli elementi interni al cluster rispetto al rispettivo centroide, $\boldsymbol{\mu}_i$ (con $i = 1, \dots, k$).

$$\min \sum_{i=1}^k \sum_{\mathbf{x} \in P_i} \|\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_i\|^2$$

La fase di inizializzazione consiste nell'assegnazione casuale delle realizzazioni a una delle k famiglie; successivamente si ha il calcolo dei centroidi sulla base dell'inizializzazione e di seguito si ripetono gli step di assegnazione e aggiornamento sino al raggiungimento del numero massimo di iterazioni o fino a quando l'assegnazione alle famiglie non cambia (convergenza verso un ottimo locale).

Passo di assegnazione L'algoritmo assegna ciascuna osservazione temporale al centroide più vicino sulla base della metrica scelta.

Passo di aggiornamento L'algoritmo ricalcola i centroidi sulla base delle nuove appartenenze stabilite nel passo precedente.

k-shape

L'algoritmo *k-shape* è un processo di *clustering* per serie temporali che si appoggia su una metrica invariante per scalabilità e traslazione. L'algoritmo ha il vantaggio di essere indipendente dal dominio di applicazione, accurato e computazionalmente efficiente [35]. Il costo computazionale dipende prevalentemente dalla lunghezza delle serie temporali e quindi nel nostro caso il tempo di calcolo sarà ridotto date le brevi realizzazioni.

k-shape in primis assegna casualmente le serie temporali in k cluster, poi calcola i centroidi e raffina l'appartenenza ai cluster mediante la metrica adottata (gli autori definiscono per questa algoritmo la metrica SBD). In breve, si alternano due step: quello di assegnazione e quello di affinamento. Come nel caso precedente, la procedura si ripete sino a quando l'algoritmo converge oppure sino al raggiungimento del massimo numero di iterazioni.

Passo di assegnazione L'algoritmo aggiorna i membri del cluster comparando le serie temporali con tutti i centroidi e assegnando ciascuna serie temporale alla classe con il centroide più vicino secondo la metrica scelta.

Passo di raffinamento I centroidi dei cluster vengono aggiornati sulla base delle assegnazioni dello step di assegnazione.

Per quanto riguarda le tecniche di calcolo dei centroidi per le serie temporali, nel classico algoritmo *k-means* i centroidi delle classi vengono calcolati attraverso la media aritmetica delle coordinate delle realizzazioni appartenenti alla stessa famiglia. Tuttavia, questa metodologia non consente di catturare le caratteristiche della classe. Per superare questa criticità, nell'algoritmo *k-shape* il calcolo dei centroidi viene eseguito attraverso la risoluzione di un problema di ottimizzazione in cui si ricerca la serie temporale che minimizza la somma delle distanze al quadrato delle osservazioni appartenenti alla medesima famiglia. In breve, si cerca iterativamente il centroide che massimizza la seguente:

$$\mu_k^* = \min_{\mu_k} SBD(x, \mu_k) = \min_{\mu_k} \left(1 - \sum_{x \in P_k} \left(\frac{\max_w CC_w(x, \mu_k)}{\sqrt{R_0(x, x) \cdot R_0(\mu_k, \mu_k)}} \right)^2 \right)$$

Ovvero:

$$\mu_k^* = \max_{\mu_k} \sum_{x \in P_k} \left(\frac{\max_w CC_w(x, \mu_k)}{\sqrt{R_0(x, x) \cdot R_0(\mu_k, \mu_k)}} \right)^2$$

Con alcuni passaggi che non riportiamo, tale problema di ottimizzazione viene ricondotto dagli autori [35] al noto problema di massimizzazione del quoziente di Rayleigh, che trova soluzione nell'autovettore corrispondente all'autovalore massimo della matrice simmetrica reale M definita come:

$$M = Q^T \cdot S \cdot Q \quad \text{con} \quad Q = I - \frac{1}{m} O \quad e \quad S = \sum_{\mathbf{x}_i \in P_k} (\mathbf{x}_i) \cdot (\mathbf{x}_i)^T$$

Dove abbiamo indicato con I la matrice identità e con O la matrice in cui tutti gli elementi sono uno.

5.3.3 Score Function

La score function (SF) è un indice di validità del cluster che permette di caratterizzare la bontà della suddivisione delle osservazioni [36]. SF assume valori compresi fra 0 e 1 in base a due parametri che rispettivamente descrivono la vicinanza fra osservazioni appartenenti allo stesso cluster e la lontananza fra gli elementi di cluster differenti.

$$SF = 1 - \frac{1}{\exp(\exp(bcd - wcd))}$$

con

$$bcd = \frac{1}{nk} \sum_{i=1}^k \|\mathbf{z}_i - \mathbf{z}_{tot}\| \cdot n_i$$

$$wcd = \sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i} \sum_{\mathbf{x}_j \in P_i} \|\mathbf{x}_j - \mathbf{z}_i\|$$

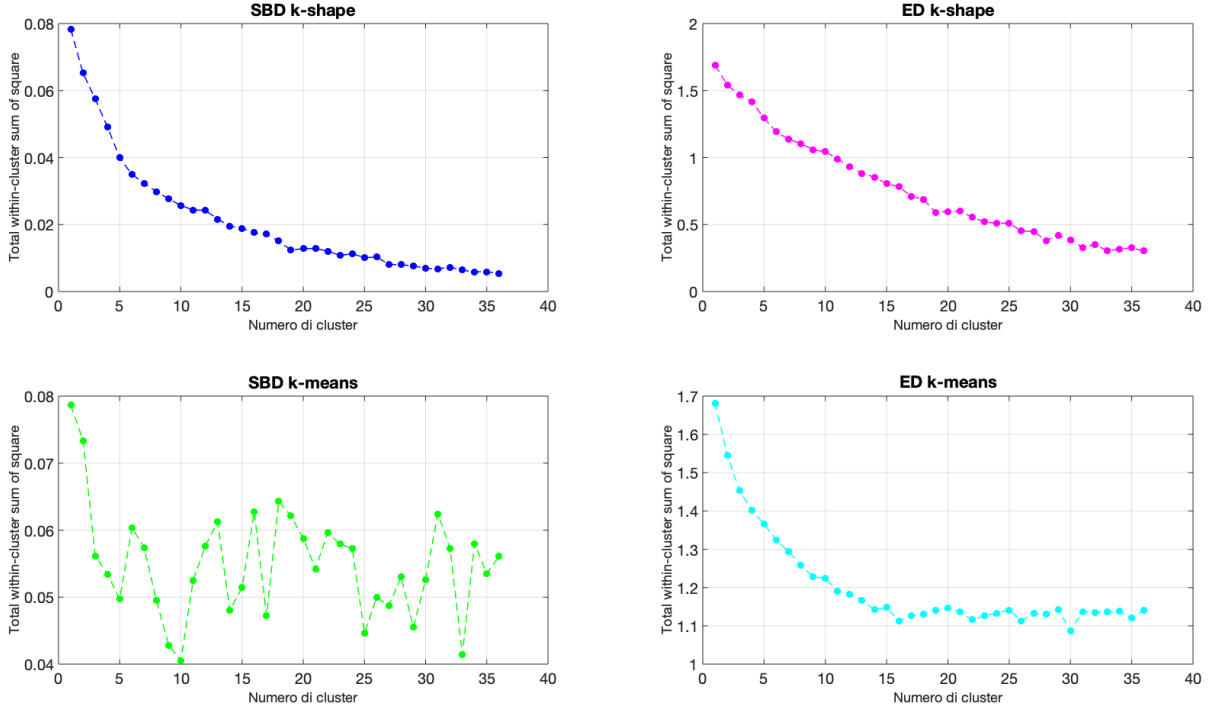


Figura 5.6: Ottimi locali delle analisi di *clustering* selezionate in base alla più piccola somma delle distanze di ciascuna realizzazione dal centroide della rispettiva famiglia a cui è stato assegnato.

dove k è il numero di famiglie in cui si vogliono dividere le n osservazioni; $\mathbf{z}_i$ è il centroide del cluster i -esimo; $\mathbf{z}_{tot}$ è il centroide di tutte le osservazioni; n_i è il numero di elementi nel cluster i -esimo e $\|\mathbf{a} - \mathbf{b}\|$ nel caso di serie temporali si calcola come $\|\mathbf{a} - \mathbf{b}\| = \sqrt{[a(t_1) - b(t_1)]^2 + \dots + [a(t_m) - b(t_m)]^2}$. In questo caso di studio abbiamo ritenuto utile riferirci a questo indice per valutare contemporaneamente la convergenza della distanza intra-cluster ma anche un valore che rappresentasse la dissimilarità fra cluster diversi.

5.4 Clusterizzazione sulla base dei consumi energetici

Nella sezione che segue presentiamo i risultati dello studio di *clustering*, in particolare si confrontano le soluzioni ottenute attraverso la combinazione delle metriche e degli algoritmi presentati.

Non conoscendo a priori il numero ottimale k di classi in cui dividere i centri natatori, si è primariamente impostato uno studio comparativo fra metriche e algoritmi al variare del numero di famiglie. Poiché gli algoritmi di *clustering* convergono ad un ottimo locale fortemente dipendente dalla fase di inizializzazione dell'algoritmo, come si usa in letteratura, ciascuna simulazione per un numero fissato $\bar{k}$ di cluster è stata eseguita più volte selezionando solo il risultato migliore. Si aggiunge che il numero di inizializzazioni è stato definito in funzione di $\bar{k}$ per evitare di aumentare il costo computazionale senza alcun beneficio. Si nota infatti, che per $k = 1$ l'inizializzazione del *clustering* è unica (tutte le osservazioni sono assegnate alla stessa classe) quindi sarebbe inutile eseguire più di una inizializzazione; per $k = 2$ le possibili

Tabella 5.2: *Score Function* ottenuta al variare di k .

k	Score function	
	SBD kshape	ED kmeans
1	0.5180	0.5268
2	0.5461	0.5907
3	0.4243	0.4678
4	0.3439	0.3584
5	0.4545	0.1720
6	0.1511	0.1626
7	0.2716	0.1190
8	0.0877	0.0710
9	0.2122	0.0824
10	0.2471	0.0651
11	0.1925	0.0485
...	...	...

inizializzazioni sono $2^{36}/2$; in generale per $k = x$ le inizializzazioni possibili sono dell'ordine di x^{36} .

Quindi, ammettendo di non poter investigare tutte le possibilità, ma volendo comunque selezionare un ottimo almeno locale, il numero di simulazioni è stato fissato pari a k^2 . In questo modo per $\bar{k} = 1$ si ha $1^2 = 1$ iterazione; per $\bar{k} = 2$ si hanno $2^2 = 4$ iterazioni; per $\bar{k} = 3$ si hanno $3^2 = 9$ iterazioni ecc...

Scegliendo come criterio di selezione fra le diverse iterazioni il minimo della somma delle distanze delle realizzazioni dal centroide della famiglia a cui sono assegnate, si è composto un grafico formato dagli ottimi locali determinati al variare di k . Dato che all'aumentare delle famiglie la distanza intra-cluster diminuisce, il numero di famiglie ottimale si riconosce da un repentino cambio di pendenza (gomito); ovvero quando anche aumentando le classi la somma delle distanze intra-cluster non diminuisce più.

In Figura 5.6 si possono visualizzare i risultati ottenuti per ciascuna metrica e ciascun algoritmo.

In particolare, è possibile osservare che la combinazione della metrica SBD e dell'algoritmo k-means (SBD-m) dà risultati peggiori rispetto a SBD con algoritmo k-shape (SBD-s) e inoltre, per $k > 5$ SBD-m non converge. Anche ED-s se confrontato ai risultati di ED-m risulta peggiore (la distanza intra-cluster è più elevata). Per quanto riguarda i migliori individuati sinora (ED-k e SBD-s) entrambi gli algoritmi sembrano convergere e in entrambi i casi risulta abbastanza ostico individuare un vero e proprio gomito: potrebbe essere $k = 19$ per SBD-s e $k = 16$ per ED-k.

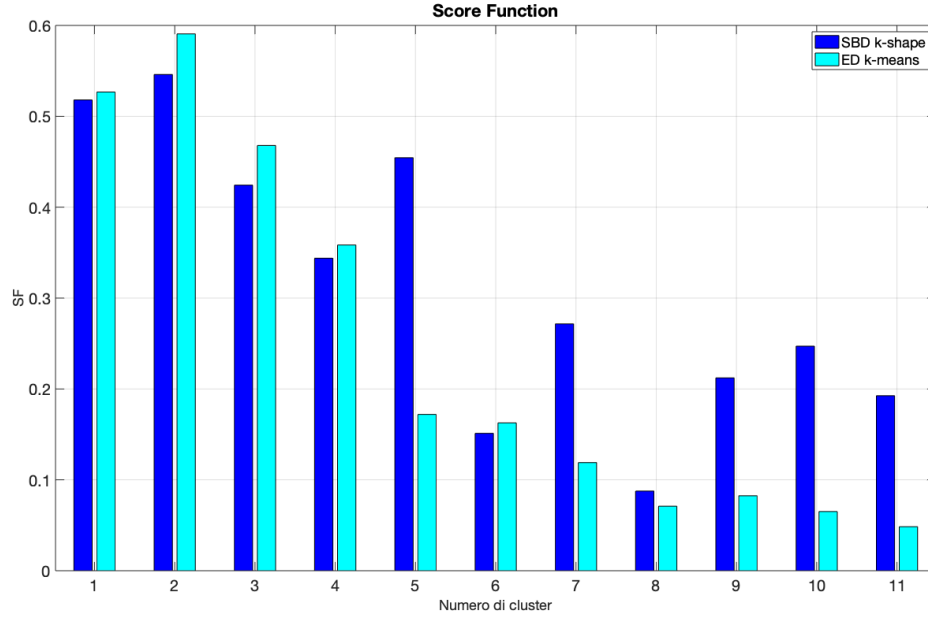


Figura 5.7: Ottimi locali delle analisi di *clustering* selezionate in base al migliore CVI determinato.

Per effettuare una scelta concreta e motivata si è deciso di sovrapporre all'analisi anche un indice di validità del cluster (la Score Function) in modo da valutare non solo quanto sono prossimi gli elementi di uno stesso cluster ma anche quanto sono distanziati gli elementi di famiglie diverse. In questo modo è possibile valutare contemporaneamente la similitudine intra-cluster (distanza fra gli elementi appartenenti alla stessa famiglia) e separazione fra cluster (distanza fra elementi appartenenti a famiglie diverse). In Tabella 5.2 mostriamo la Score Function prodotta dagli ottimi locali di SBD-s e ED-k fra $k = 1$ e $k = 11$. Per $k > 11$ non si è riportata alcuna rappresentazione dato che la Score Function risulta minore di 0,1: sicuramente troppo piccola. Ciò ragionevolmente accade dato che un numero elevato²⁵ di classi va ad assottigliare la distanza fra cluster diversi senza mantenerli ben separati.

In breve, in Figura 5.7 sono stati riportati i valori di SF ottenuti con un numero $\bar{k}$ fissato di famiglie. Il risultato stampato è quello corrispondente al cluster migliore ottenuto fra le k^2 inizializzazioni. Si osserva che la massima SF si ha per un numero di classi pari a due per entrambe le metriche. Tuttavia, sempre in Figura 5.7, si può osservare che l'algoritmo k-shape per $k = 5$ ha un aumento non indifferente del valore della score function che tende poi a diminuire. ED-k invece è caratterizzato da una progressiva riduzione della SF da $k = 2$ in avanti. Sovrapponendo i grafici di SF e distanza interna al cluster (vedi Figura 5.8) si osserva che per $k = 2$ la distanza ED con algoritmo k-means è ancora molto alta per cui questo ottimo locale non sembra una buona soluzione. Invece, per $k = 5$ la metrica SBD con algoritmo

²⁵Elevato rispetto al numero di oggetti: nel nostro caso 36 centri.

Tabella 5.3: Divisione in cluster ottenuta con la metrica SBD e l'algoritmo k-shape.

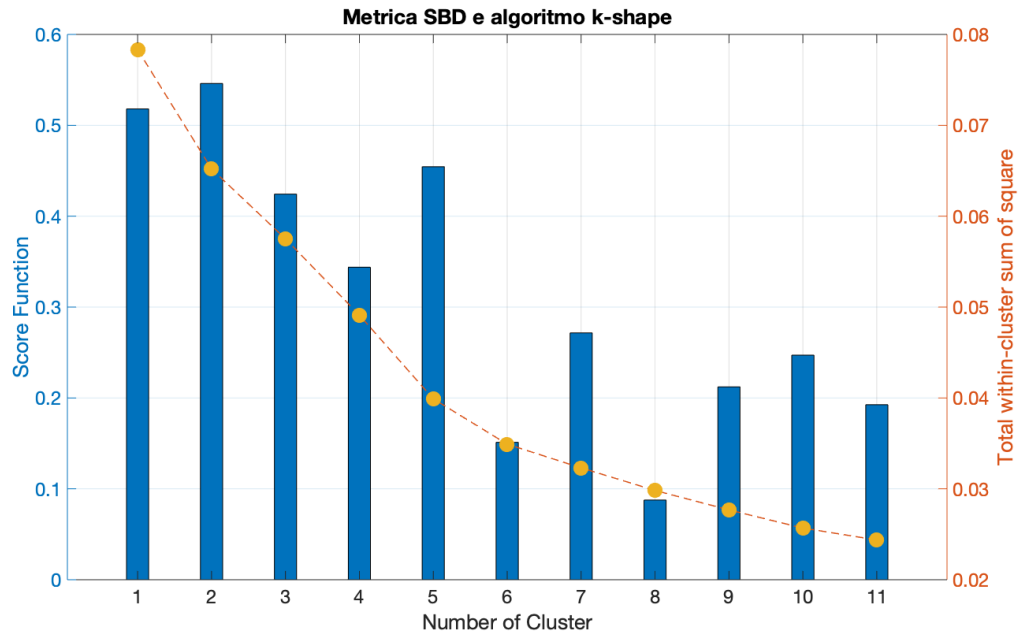
cluster 1	cluster 2	cluster 3	cluster 4	cluster 5
Lo_3	Lo_{25}	Lo_1	Lo_4	$Pi.1$
Lo_6		Lo_8	Lo_{24}	Li_1
ER_2		Ve_3	ER_1	Li_2
ER_3		Lo_{19}	Lo_7	Lo_5
Lo_{21}			Ve_1	Lo_9
Lo_{23}			Lo_{11}	To_1
Lo_{22}			Lo_{12}	Lo_{16}
FVG_2			Lo_{13}	To_2
Lo_{26}			Lo_{14}	Li_3
			Lo_{15}	
			Ve_7	
			Ve_4	
			Ve_5	

k-shape presenta una sorta di gomito e la distanza fra elementi dello stesso cluster è pressoché la metà di quella iniziale (riduzione considerevole).

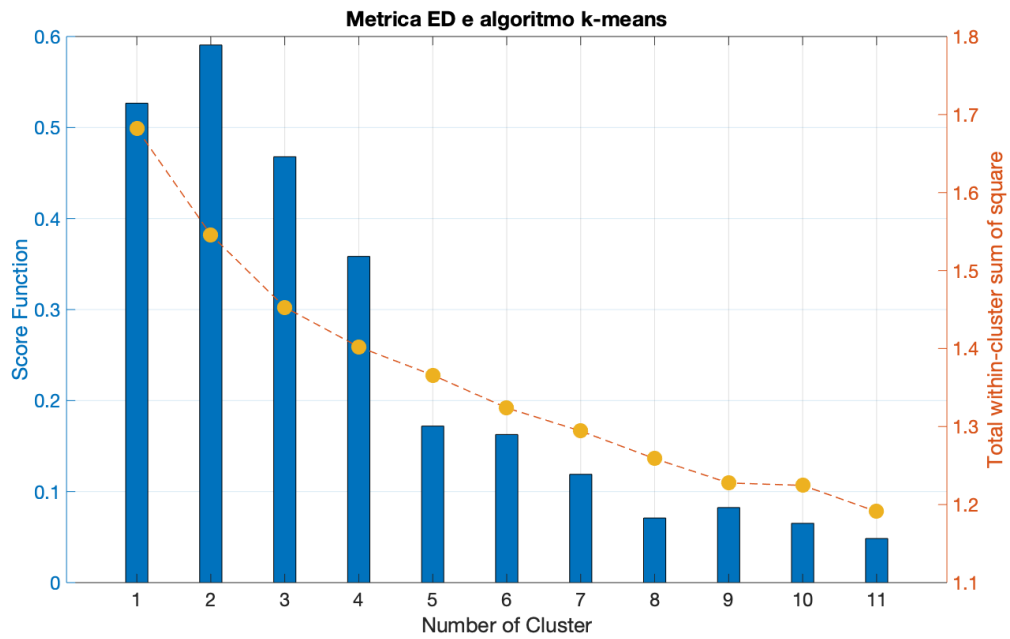
Da queste osservazioni deriverebbe la scelta di un numero di cluster pari a cinque. Tuttavia la divisione ottenuta (riportata in Tabella 5.3) evidenzia la presenza di un cluster formato da un unico elemento. In quanto *outlayer* l'elemento è stato eliminato dall'analisi, portata avanti con i quattro cluster rimanenti.

5.5 Risultati finali del *clustering*

Nel suo complesso, l'analisi ha permesso di individuare efficacemente i differenti profili di consumo energetico dei centri natatori e sportivi come possiamo vedere dalle Figura 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12. I risultati della presente analisi sono stati utilizzati con successo per l'apprendimento delle reti neurali nonostante la clusterizzazione prodotta non abbia una numerosità simile fra i cluster (come si può vedere dalla Tabella 5.3). Ciò è stato possibile grazie a tecniche di moltiplicazione dei dati implementate da Masvis srl al fine di ri-bilanciare la numerosità delle famiglie e aumentare il numero di strutture con cui addestrare le reti, come verrà spiegato nel Capitolo 7 a pagina 82.



(a) *Metrica SBD e algoritmo k-Shape*



(b) *Metrica ED e algoritmo k-Means*

Figura 5.8: Confronto fra la somma delle distanze al quadrato degli elementi interni al cluster ottenuto dall'analisi di ottimo locale e la rispettiva Score Function.

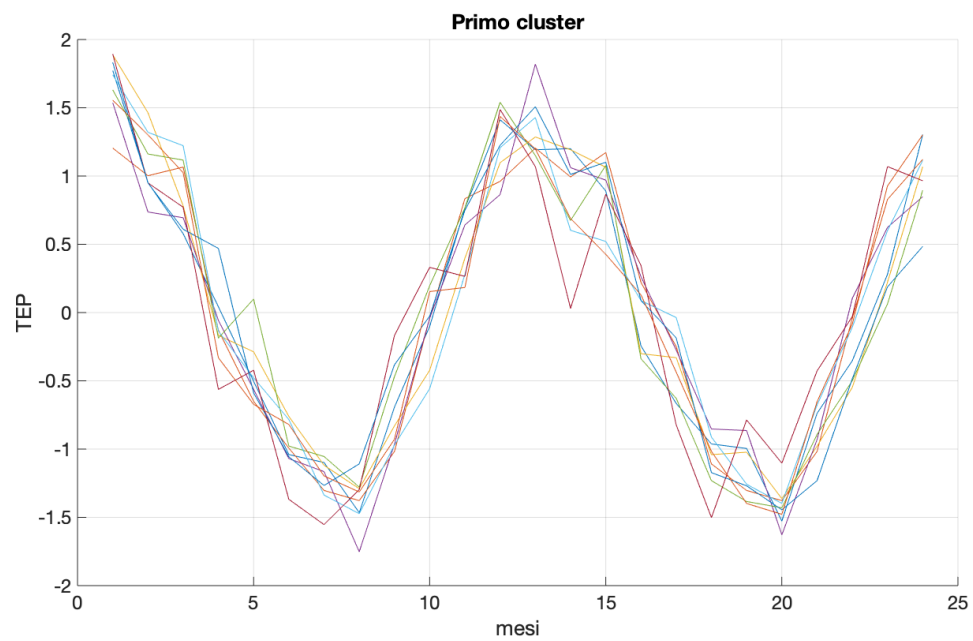


Figura 5.9: Cluster 1

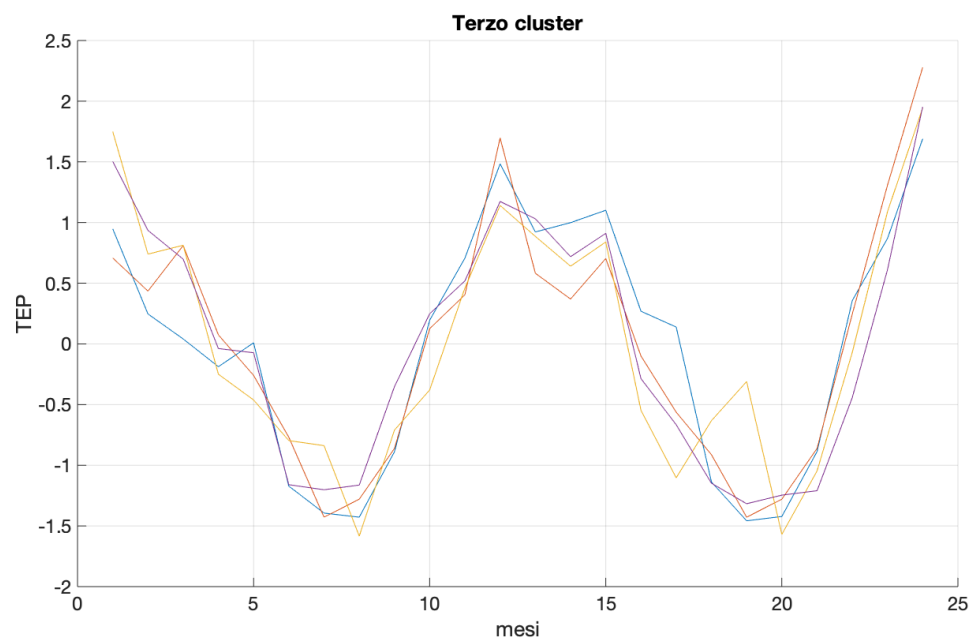


Figura 5.10: Cluster 3

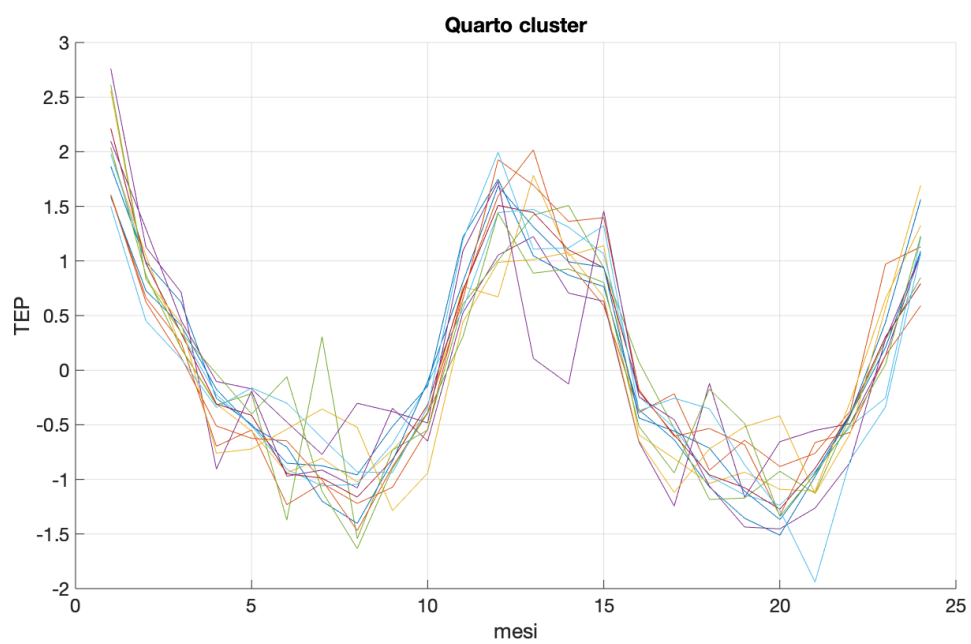


Figura 5.11: Cluster 4

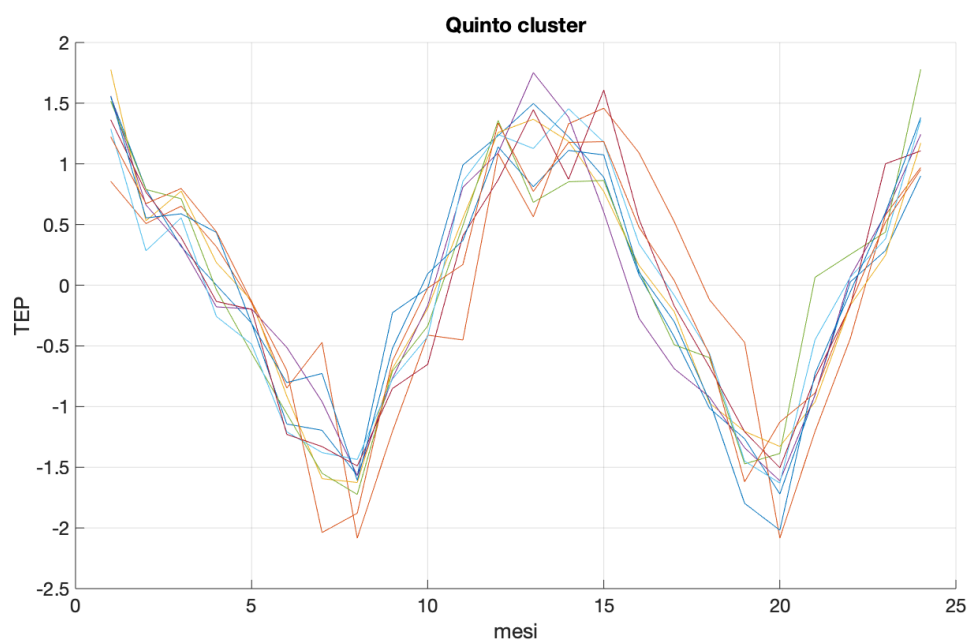


Figura 5.12: Cluster 5

Capitolo 6

Definizione dei parametri aggregati per la stima dei target di consumo

In maniera concorde alla procedura individuata nei capitoli precedenti, i target di consumo sono stati elaborati da tre reti neurali appositamente addestrate. Come è frequente in questo campo, si sono definiti dei parametri di informazione aggregata che, introdotti nella *machine learning*, insieme al valore di consumo registrato (lettura da contatore), consentono la formazione di una conoscenza in grado di stimare i consumi per nuovi centri natatori e sportivi. Le relazioni con cui il cervello compone la previsione di consumo futura rimangono ignote dato che la rete si comporta come un modello a scatola nera (*black box*). Tuttavia, questo processo presenta tre grossi vantaggi che hanno portato a prediligere l'approccio in questione. Innanzitutto, la rete neurale permette un miglioramento continuo dei target con l'acquisizione ed elaborazione di nuovi dati. In secondo luogo, il metodo individuato può gestire grossi *data base* che saranno presenti con il progressivo inserimento di contatori a lettura automatica. Infine, le reti neurali possono tenere conto di effetti/contributi non lineari (elemento molto importante quando ci si approccia ad un problema reale in cui interagiscono parametri fisico-tecnologici ma anche l'azione umana dell'utenza e dei gestori).

In gran parte, la definizione dei parametri è stata eseguita facendo riferimento alla procedura A3²⁶ della UNI 11300 [23]; alternativamente, in mancanza dei dati necessari, sono stati seguiti i prospetti forniti da normativa.

²⁶La UNI 11300 ammette valutazioni energetiche di calcolo differenti:

- A1, valutazione di progetto (campo di applicazione di *Design rating* nel caso di permesso di costruire; certificazione o qualificazione energetica del progetto),
- A2, valutazione standard (*Asset rating* per la certificazione o qualificazione energetica),
- A3, valutazione adattata all'utenza (*Tailored rating* per ottimizzazione, validazione, diagnosi e programmazione di interventi di riqualificazione).

Tabella 6.1: Struttura dati di esempio.

Mese	consumo kWh_e	E_1	E_2	...
01/01/2017	34.968	5.653	14.820	
01/02/2017	31.304	5.106	13.386	
01/03/2017	31.541	5.653	14.745	
01/04/2017	32.327	5.471	14.342	
...	...	...	...	...

Per l'implementazione del Tool si sono costruite per ciascun centro tre strutture dati comprendenti: (i) consumi mensili e (ii) parametri, calcolati mese per mese (Tabella 6.1). Ciascuna struttura è stata dedicata ad uno dei tre consumi: acqua, energia elettrica, energia termica. In totale si sono dunque ottenute 3 x 40 tabelle: 40 dedicate ai consumi di acqua, 40 dedicate ai consumi di energia elettrica e 40 dedicate ai consumi di energia termica.

I valori di consumo inseriti nella seconda colonna di ciascuna tabella, prima dell'elenco dei parametri, corrispondono ai consumi mensili ricavati da letture dirette dei rispettivi contatori che afferiscono alla rete di distribuzione. Poiché spesso non esiste corrispondenza fra l'energia contabilizzata e quella effettivamente utilizzata, inizialmente si sono definiti dei parametri (che chiameremo *parametri di correzione*) affinché la rete neurale possa tenere conto di questo fenomeno. I casi in cui può verificarsi questo disallineamento fra consumi reali e consumi contabilizzati si concretizzano negli impianti in cui sono presenti sistemi quali: solare-termico, fotovoltaico e cogenerazione.

Nel caso del solare-termico e del fotovoltaico se l'energia prodotta è contabilizzata con un contatore dedicato, è possibile aggiungere la produzione di energia (termica in un caso e elettrica nell'altro) al rispettivo consumo registrato dai contatori "paganti". Tuttavia, nella maggior parte dei casi la rilevazione di energia prodotta dal solare-termico e dal fotovoltaico di fatto non vengono memorizzate in uno storico. Di conseguenza, si sono impiegate approssimazioni e ipotesi per valutare l'energia prodotta di mese in mese seguendo le linee guida tracciate dalla UNI 11300-5: riportiamo i procedimenti seguiti nell'Allegato A a pagina 93. Il valore di energia prodotta dalle fonti rinnovabili è stato incluso nel parametro di correzione. In particolare, si è stabilito di non aggiungerlo al consumo registrato dal contatore per evitare di modificare il dato reale (lettura da contatore) con delle stime semplificative.

In presenza di sistemi di cogenerazione il consumo di combustibile va a produrre sia energia termica per il riscaldamento, sia energia elettrica. In questo caso tutta la spesa è attribuita alla bolletta del gas, ma genera una disponibilità elettrica. Per tenere conto di ciò, è stato definito un parametro di

correzione riferito al consumo di energia elettrica che incrementa il valore di consumo globale. In breve, per tenere conto della commistione fra generazione e disponibilità di energia termica ed elettrica, è stato necessario stimare la quota parte di potere calorifico del combustibile che, invece di produrre energia termica, produce energia elettrica. Il parametro identificato per il caso di cogenerazione è pari alla potenza elettrica sviluppata dal cogeneratore (P_u) moltiplicata per le ore di funzionamento del cogeneratore. Dove la potenza elettrica sviluppata è stata stimata in funzione del rendimento elettrico (η_e) del cogeneratore e della potenza termica ($\dot{Q}_1$) prodotta dal combustore.

$$P_u = \eta_e \cdot \dot{Q}_1 \quad \text{con} \quad \dot{Q}_1 = \eta_b \dot{m}_b H_i$$

Dove:

- η_e è il rendimento elettrico del cogeneratore,
- η_b è il rendimento del combustore (stimato pari a 0,98),
- $\dot{m}_b$ è la portata del combustibile (dato noto dai consumi mensili),
- H_i è il potere calorifico inferiore.

Specifichiamo che, nel caso di compresenza di cogeneratore e caldaia, si è calcolato il fabbisogno soddisfatto dal cogeneratore in funzione della portata di combustibile ammessa da quest'ultimo imputando la rimanente parte alla caldaia.

I restanti parametri vengono definiti nelle sezioni successive separatamente per acqua, energia elettrica ed energia termica. Si indica con W i parametri relativi al consumo di acqua, con E i parametri relativi al consumo di energia elettrica e con T i parametri relativi al consumo di energia termica. Riportiamo sinteticamente in Tabella 6.2 i parametri che saranno definiti nelle sotto sequenze successive.

Ricordiamo infine che, ai fini dell'apprendimento su scala temporale mensile, tutti i parametri definiti di seguito sono calcolati per ciascun centro mese per mese. La scelta di produrre un target mensile è stata in realtà un obbligo determinato dalla bassa e disuniforme frequenza di campionamento dei dati di consumo.

6.1 Consumo di acqua

I due elementi che influiscono sul consumo d'acqua sono:

1. l'acqua sanitaria,
2. l'acqua di approvvigionamento delle vasche.

Tabella 6.2: Elenco riassuntivo dei parametri identificati.

Acqua	Parametri
W_{acs}	Parametro riferito al consumo di acqua per usi sanitari
W_{vasche}	Parametro riferito al consumo di acqua per approvvigionamento delle vasche

Energia elettrica	Parametri
$E_{correzione}$	Parametro riferito all'erogazione di energia elettrica ausiliaria generata da sistemi fotovoltaici e/o cogenerativi
$E_{illuminazione}$	Parametro riferito all'assorbimento di energia elettrica per l'illuminazione
E_{pompe}	Parametro riferito all'assorbimento di energia elettrica per il sistema di pompaggio
$E_{ventilatori}$	Parametro riferito all'assorbimento di energia elettrica per il sistema di ventilazione
$E_{refrigerante}$	Parametro riferito all'assorbimento di energia elettrica per la produzione di vettori termici
E_{aux}	Parametro riferito all'assorbimento di energia elettrica per sistemi ausiliari

Energia termica	Parametri
$Q_{correzione}$	Parametro riferito all'erogazione di energia termica prodotta da sistemi di tipo solare-termico
Q_s	Parametro riferito all'assorbimento di energia termica per il riscaldamento e/o il rinfrescamento degli ambienti
$Q_{ventilazione}$	Parametro riferito all'assorbimento di energia termica per la ventilazione dell'edificio
Q_{ACS}	Parametro riferito all'assorbimento di energia termica per il riscaldamento dell'acqua calda sanitaria
Q_{vasche}	Parametro riferito all'assorbimento di energia termica per il riscaldamento dell'acqua di vasca

6.1.1 Acqua calda sanitaria

Il contributo relativo all'acqua sanitaria, indicato con W_{acs} , secondo la UNI/TS 11300, (Parte 2, Prospetto 13) può essere stimato per palestre e attività sportive conteggiando 100 l/gg per doccia installata. Tuttavia, in questo modo il calcolo non terrebbe assolutamente in conto della variabilità stagionale di affluenza degli utenti. Grazie ai dati raccolti dall'azienda HF srl, è stato possibile ottenere un dato indicativo di affluenza mensile per tutti i centri polisportivi. Si è scelto quindi di assegnare a W_{acs} il prodotto fra il numero di utenti che frequentano il centro e i litri d'acqua consumati in media da ciascuno di essi.

Definiamo quindi:

$$W_{acs} = n_{ut} \cdot \ell \cdot 10^{-3} \quad [m^3]$$

Dove:

- n_{ut} è l'utenza del mese in considerazione (dato fornito dai gestori dei centri);
- ℓ sono i litri di acqua sanitaria usati in media per 10 minuti di doccia con una portata di: 5 l per minuto se è presente un miscelatore ad aria (riduttore di flusso areato), 9 l per minuto se è presente un frangi getto, 15 l al minuto per sistemi assenti.

6.1.2 Acqua di approvvigionamento delle vasche

Per parametrizzare il contributo dell'acqua di approvvigionamento si sommano l'acqua di riempimento delle vasche (effettuata una volta l'anno), l'acqua di reintegro (determinata dalla quantità d'acqua persa per evaporazione, schizzi, trascinarsi dei bagnanti, prelievi per le analisi) e dell'acqua di rinnovo (ovvero, l'acqua immessa in vasca per diluire le impurezze).

$$W_{vasche} = W_{riempimento} + W_{reintegro} + W_{rinnovo}$$

Dove:
$$\begin{cases} W_{riempimento} = V_{vasche} \\ W_{reintegro} = \dot{w} \cdot \rho \cdot 24h \cdot gg \\ W_{rinnovo} = 0,025 \cdot (V_{vasche} + 0,6 \cdot V_{cvc}) \cdot (gg - gg_{cc}) \end{cases}$$

Il riempimento delle vasche è previsto una volta l'anno per cui il valore (in m^3) sarà nullo tutti i mesi eccetto quello in cui il gestore prevede tale fase (per le vasche estive ciò avviene in genere nel mese di maggio). Nella pratica molti centri non rispettano la normativa, perciò per conseguire l'obiettivo di *targeting* abbiamo dovuto adattare i parametri all'effettiva gestione del centro. Per quanto riguarda il volume d'acqua per il reintegro in prima approssimazione si ipotizza che tutti gli schizzi confluiscono nel sistema a sfioro di raccolta dell'acqua e che l'unico volume da rimpiazzare sia quello dell'acqua evaporata ($\dot{w}$), che può essere calcolata mediante la formula di Carrier. L'approssimazione sviluppata da Carrier, per stimare il volume d'acqua evaporato da una superficie d'acqua A caratterizzata da una pressione di vapore saturo alla temperatura dell'acqua p_w (kPa) e una pressione di saturazione del vapore alla temperatura di rugiada dell'aria ambiente p_a (kPa), risulta valida solo per velocità dell'aria compresa fra

0,05 e 0,15 m/s ed è quindi applicabile alle piscine coperte, dove la velocità a 0,3 m dal piano vasca è limitata al di sotto dei 0,10 m/s secondo l'Accordo Stato-Regioni a cui la norma CONI fa riferimento. Mentre, per le piscine scoperte si è assunto di poter fare altrettanto. Segue la formula di Carrier utilizzata nell'aggregazione del parametro:

$$\dot{w} = 4 \cdot 10^{-5} A \cdot (p_w - p_a) \cdot F_a \quad [kg/s]$$

Dove:

- $4 \cdot 10^{-5}$ è una costante empirica con unità di misura pari a $[s/m]$;
- p_w si calcola in funzione della temperatura dell'acqua t_w espressa in gradi centigradi, come [32]

$$p_w(t_w) = 0,0044 \cdot t_w^2 - 0,01 \cdot t_w + 0,7 \quad [kPa]$$

- p_a si calcola come

$$p_a = 0,611 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot t_r}{237,7 + t_r}} \quad (t_r \text{ è la temperatura dell'aria in gradi centigradi})$$

dove t_r è la temperatura di rugiada che è possibile ricavare dalla formula approssimata di Magnus-Tetens in funzione dell'umidità relativa e della temperatura dell'aria t_a

$$t_r = \frac{b \cdot \alpha(t_a, UR)}{a - \alpha(t_a, UR)} \quad \text{con} \quad \alpha(t_a, UR) = a \cdot \frac{t_a}{b + t_a}$$

dove $a = 17,27$ e $b = 237,7^\circ C$ con i seguenti intervalli di validità:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{temperatura ambiente} \rightarrow 0^\circ C < t_a < 60^\circ C \\ \text{umidità relativa} \rightarrow 0,01 < UR < 1,00 \\ \text{punto di rugiada} \rightarrow 0^\circ C < t_r < 50^\circ C \end{array} \right.$$

- F_a è il fattore di attività generalmente assunto pari a 1 per piscine pubbliche (in genere può variare fra 0,5 e 1,5).

Infine, l'acqua di rinnovo delle vasche può essere stimata secondo la normativa vigente [24]. La norma prevede 30 l per bagnante al giorno o, in mancanza di questa informazione, un rinnovo pari o superiore al 2,5% del volume delle vasche più il 60% del volume delle vasche di compenso; a meno che il centro non risulti chiuso per un periodo maggiore o uguale alle 48 ore, nel qual caso il rinnovo può essere interrotto. Nel caso non siano noti i volumi delle vasche di compenso delle vasche è possibile approssimarli facendo riferimento alla normativa. Come è stato già introdotto precedentemente, le vasche di compenso sono dimensionate per contenere: il volume spostato dal massimo numero di bagnanti e dal moto ondoso che generano rispetto alle attività e attrezzature previste, il volume di acqua contenuto nel canale e/o nei collettori di sfioro per una portata pari a quella di progetto, il volume per il lavaggio di almeno un filtro e il volume minimo affinché le pompe di ricircolo possano evitare la marcia a secco. La normativa

suggerisce in prima approssimazione di valutare il volume della vasca di compenso pari al volume d'acqua rimpiazzato dal massimo numero di utenti maggiorato per tenere conto anche degli altri effetti.

$$V_{cvc} = \left(ut_{sat} \frac{m}{\rho_{umano}} \right) \cdot FC$$

Dove:

- ut_{sat} è l'utenza massima contemporanea che satura la capienza delle vasche (calcolata conteggiando 1 utente per ogni $2 m^2$ di vasca per le aree natatorie come richiesto dalla Norma CONI (Paragrafo 7.14 - Affollamento degli spazi di attività);
- ρ_{umano} è la densità del corpo umano, pari a $985 kg/m^3$;
- m è la massa dell'utente medio ($80 kg$);
- FC è il fattore di maggiorazione che prendiamo pari a 1,5.

Concludendo, i dati raccolti per la definizione dei parametri aggregati relativi al consumo di acqua sono:

1. utenza mensile;
2. sistema frangi getto o di miscelazione presente nelle docce;
3. volume e superficie delle vasche aperte al pubblico mese per mese;
4. numero di giorni di chiusura consecutivi (gg_{cc}) mensili.

6.2 Assorbimento di energia elettrica

Gli assorbimenti elettrici che vanno a comporre il consumo complessivo possono essere ricondotti al funzionamento degli elementi elencati di seguito:

1. illuminazione interna e esterna;
2. pompe di ricircolo per il riscaldamento e per il rinfrescamento (pompe per i terminali ad acqua, pompe per le batterie calde/fredde di riscaldamento/rinfrescamento e post riscaldamento di unità di trattamento dell'aria o termoventilanti);
3. ventilatori di aspirazione, mandata e estrazione;
4. gruppi frigo e/o pompe di calore;
5. circolatori gemellari per gli impianti di filtrazione;
6. pompe accessorie di dosaggio di sostanze flocculanti, regolazione del pH e cloro;
7. elettronica di controllo;
8. macchine accessorie (phon, tapis roulant, schermi, distributori automatici di bevande calde o snack, generatori di vapore e stufe elettriche o a infrarossi per attività spa quali bagno turco e sauna).

Fornire dei parametri da cui stimare la potenza elettrica totale assorbita dall'attività dei centri natatori è più complesso rispetto a quanto fatto per i consumi di acqua, dato che gli apparecchi elettrici hanno un funzionamento intermittente e (in alcuni casi) un assorbimento variabile rispetto a quello nominale. Non essendo trascurabili le ore di funzionamento e la potenza assorbita, sarebbe necessario stimare mese per mese un fattore di utilizzo e uno di potenza. Tuttavia, per definire dei fattori di utilizzo e potenza sensati sarebbe necessario conoscere bene non solo le specifiche dei vari apparecchi, ma anche la gestione associata. Per esempio, se la pulizia dei filtri venisse eseguita raramente, la perdita di carico del filtro sarebbe alta e ciò chiaramente si rifletterebbe sul consumo della pompa di circolazione. Essendo molto complesso e dispendioso eseguire un *audit* così approfondito sulla gestione, si è rinunciato a utilizzare i fattori di funzionamento e di potenza. Perciò, sono stati considerati solo: i valori di assorbimento nominale e la presenza di inverter; lasciando che sia la rete neurale a pesare in maniera opportuna i termini associati alla gestione.

Di seguito si elencano i parametri scelti per definire il consumo mensile di elettricità. Si sottolinea che gli assorbimenti elettrici dell'elettronica di controllo e di pompe accessorie come quelle di dosaggio sono state completamente trascurate per ininfluenza.

6.2.1 Assorbimento elettrico dell'illuminazione

Definiamo il parametro relativo all'illuminazione del complesso natatorio come segue:

$$E_{\text{illuminazione}} = \sum_i \frac{S_i \cdot L_i}{j_i} \cdot h_i$$

Dove:

- S_i è la superficie (m^2) di una zona i –esima,
- L_i sono i *lux* richiesti dalla Norma CONI per l'ambiente i –esimo (Tabella 6.4),
- j_i è la resa (*lumen/W*) degli apparecchi illuminanti²⁷ (Tabella 6.3) utilizzati nell'ambiente i –esimo,
- h_i sono le ore di illuminazione mensile nella zona i –esima.

Per effettuare una buona stima, senza misurare area per area ogni locale dei 35 centri natatori, si è definita una suddivisione dell'intera superficie nelle seguenti macro zone: piano vasca interno, piano vasca esterno, spogliatoi e servizi del piano vasca, campetti esterni, sale di attività o palazzetti per lo sport, spogliatoi e servizi dei campetti esterni o delle palestre, aree accessorie (ovvero atrio, uffici, bar e ristorante). Per ciascuna di esse è stato assegnato un illuminamento medio tale da rispettare la normativa vigente (vedi normativa CONI, Tabella B: *Caratteristiche illuminotecniche consigliate per alcune attività*

²⁷Nei casi di illuminazione mista è stata valutata solo la tipologia di illuminazione dominante o in caso di quote simili o comunque non trascurabili è stata eseguita una proporzione.

Tabella 6.3: Efficienza luminosa (*lumen/W*) delle varie tipologie di apparecchi illuminanti.

Tipologia	Efficienza luminosa <i>lumen/W</i>
LED	100
Ioduri metallici	80
Induzione magnetica	80
Fluorescenti	80
Neon	60
Alogena	20
Incandescenza	15

sportive). Tenendo anche conto dell'esperienza acquisita dai tutor aziendali operanti nel settore, per le zone oggetto di studio, sono stati assegnati i valori di illuminamento riportati in Tabella 6.4.

6.2.2 Assorbimento elettrico delle pompe

Definiamo il parametro relativo all'assorbimento elettrico dei circolatori in funzione degli assorbimenti medi e delle ore mensili di funzionamento:

$$E_{pompe} = \sum_i P_{n,i} \cdot n_{c,i} \cdot h_{c,i} \cdot F_v$$

Dove:

- $n_{c,i}$ è il numero di circolatori con potenza $P_{n,i}$;
- $h_{c,i}$ sono le ore di funzionamento mensili stimate;
- F_v è un fattore dipendente dal tipo di funzionamento della pompa (Prospetto 26 della UNI 11300-2): per circolatori a velocità variabile è pari a 0,6; per circolatori a velocità fissa vale 1.

Per i circolatori gemellari dell'impianto di filtrazione e per le pompe che alimentano le batterie di riscaldamento del piano vasca, vista la normativa, è assegnato un valore pari a 24 ore per il numero di giorni del mese. Mentre le ore di funzionamento delle pompe dedicate al riscaldamento/rinfrescamento degli altri locali del centro natatorio sono assegnate mese per mese secondo quanto dichiarato dai gestori di ciascun centro.

Si aggiunge infine che in caso di mancanza del dato di potenza e in presenza dei dati di portata (Q in m^3/s) e prevalenza (H_u in m), chiaramente si è calcolata la potenza come $P_c = \gamma \cdot Q \cdot H_u$ [W] (dove γ è il peso specifico dell'acqua N/m^3).

Tabella 6.4: *Lumen* al m^2 richiesti dalla Norma CONI per le diverse aree dei centri polisportivi.

Zona	Illuminamento
	lux
Campetti esterni bocce	200
Campetti esterni calcio, pallacanestro, pallavolo, palla a mano, lotta, pesistica o judo	500
Campetti esterni golf	100
Sala attività	500
Palazzetto	750
Piano vasca interno o convertibile	500
Piano vasca esterno	500
Spogliatoi e servizi	200
Altri locali	300

6.2.3 Assorbimento elettrico dei ventilatori

Similmente al caso precedente, si è definito il parametro relativo all'assorbimento elettrico dei ventilatori in funzione degli assorbimenti medi e delle ore mensili di funzionamento.

$$E_{ventilatori} = \sum_i^{n_v} P_{v,i} \cdot h_{v,i} + \sum_i^{n_{UTA}} \left(P_{n,v.asp,i} + P_{n,v.man,i} \right) \cdot h_{UTA,i}$$

Dove:

- $P_{n,v.asp,i}$ e $P_{n,v.mand,i}$ sono le potenze nominali dei ventilatori di aspirazione e mandata dell'UTA (o termoventilante) i –esima;
- $P_{v,i}$ è la potenza elettrica ventilatori ausiliari (come quelli che si ritrovano in ventilconvettori, termocondizionatori, torrini di estrazione, ecc...);
- $h_{UTA,i}$, $h_{v,i}$ sono rispettivamente le ore di funzionamento mensili delle UTA e le ore di funzionamento mensili di eventuali ventilatori ausiliari.

In mancanza di dati relativi a ventilconvettori, generatori pensili, generatori a basamento e roof top si è fatto riferimento al Prospetto 25 della UNI/TS 11300-2. In particolare per il ventilconvettori si sono assunte le potenze elettriche di: (i) 40 W fino a 200 m^3/h ; (ii) 50 W fra 200 e 400 m^3/h (iii) 60 W fra 400 e 600 m^3/h .

Infine, si aggiunge che in caso di mancanza del dato di potenza e in presenza dei dati di portata ($\dot{m}_a$ in m^3/s) e pressione totale (H in mm c.a.), chiaramente si è ricavata la potenza aeraulica in prima approssimazione come $P_v = \dot{m}_a \cdot H/10$ [W].

6.2.4 Assorbimento elettrico dei gruppi frigo e pompe di calore

L'assorbimento elettrico dei gruppi frigo dipende dai carichi sensibili e latenti. Nei centri sportivi in genere vengono raffrescate in estate le palestre e le zone ristoro, mentre piano vasca e area spa si avvalgono solo di una ventilazione forzata per controllare l'umidità. Dato che è difficile valutare zona per zona il carico latente (soprattutto nelle zone ristoro in cui non esiste un controllo degli accessi), il parametro definito per descrivere l'assorbimento elettrico dei gruppi frigo dipende unicamente dal carico sensibile.

Questa scelta è imposta dalla mancanza di informazioni che potrebbero essere ipotizzate ma che rischierebbero di introdurre nel modello dei valori casuali non giustificati. Segue la definizione del parametro:

$$E_{refrigerante} = \frac{1}{EER_k} \cdot \left(\sum_{k=1}^N \frac{h_k \cdot f'_k}{\eta_{e,k} \cdot \eta_{d,k}} + E_{irr} \right)$$

con $f'_k = (U_c A_k + U_p A_{p,k} + U_v A_{v,k}) \cdot (T_{ext} - T_{int,k})$

Dove:

- h_k sono le ore mensili di funzionamento nella zona climatica k –esima (si nota che tale valore sarà nullo nel caso di assenza del gruppo di refrigerazione);
- U_c , U_p e U_v sono rispettivamente le trasmittanze di copertura, pareti verticali perimetrali esterne e serramenti;
- $A_{p,k}$, $A_{v,k}$ e A_k sono le superfici delle pareti verticali perimetrali esterne, dei serramenti e della superficie della zona climatica k –esima;
- $T_{int,k}$, T_{ext} sono le temperature richieste nella zona climatica k –esima e la temperatura esterna media;
- $\eta_{e,k}$ è l'efficienza di emissione dei terminali presenti nella zona climatica k –esima (UNI/TS 11300, Parte 3, Prospetto 6);
- $\eta_{d,k}$ è il rendimento di distribuzione dell'energia termica che raggiunge la zona k –esima identificato seguendo la norma UNI 11300 - Parte 3;
- EER_k è l'indice di efficienza energetica del gruppo frigo o della pompa di calore adibita al rinfrescamento (o riscaldamento) della zona climatica k –esima;
- E_{irr} è l'energia associata all'irraggiamento attraverso le pareti vetrate.

Il carico legato all'irraggiamento, attraverso i serramenti, è stato valutato solo per superfici vetrate importanti, tenendo conto delle tipologie di vetro (singolo, doppio o triplo, basso-emissivi o standard) e della radiazione incidente I (vedi UNI 10349). La trasmittanza di energia solare delle superfici vetrate (g_{gl}) è stata identificata grazie al Prospetto 13 della UNI 11300-1 mentre le superfici (A) sono state valutate dai dwg. In breve, si è calcolata, per ciascun mese, l'energia trasmessa dai serramenti come:

$$E_{irr} = A \cdot g_{gl} \cdot I$$

Tabella 6.5: Potenza apparecchi ausiliari.

Tipologia	Potenza
Phon	0,3 kW
Tapis Roulant	1 kW
Bagno turco	0,9 kW/m ³
Sauna	1 kW/m ³

6.2.5 Assorbimento elettrico di macchine accessorie

Infine, il parametro legato alle macchine accessorie legate all'attività del centro è stato definito come:

$$E_{aux} = \sum_i n_i \cdot P_{n,i} \cdot h_i$$

Dove:

- $P_{n,i}$ è la potenza nominale dell'apparecchio i –esimo (alcuni valori indicativi sono riportati in Tabella 6.5);
- n_i sono il numero di apparecchi i –esimi;
- h_i sono le ore di funzionamento mensili degli apparecchi i –esimi.

Concludendo, i dati raccolti per la definizione dei parametri aggregati relativi al consumo di energia elettrica sono:

- planimetrie e prospetti verticali per il calcolo delle superfici;
- trasmittanze termiche;
- numero e potenza di ventilatori di aspirazione e mandata;
- numero e potenza di circolatori e numero di circolatori gemellari;
- numero e tipologie di macchine accessorie;
- tipologia di terminali per il rinfrescamento;
- emissività pareti vetrate o tipologia di vetro;
- ore di funzionamento dell'impianto di riscaldamento (solo nel caso di pompa di calore) e di rinfrescamento;
- indice di efficienza energetica del gruppo frigo o della pompa di calore;
- numerosità e tipologie di macchine accessorie.

6.3 Assorbimento di energia termica

I principali elementi che influiscono sul consumo termico di un centro natatorio sono: il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento e la ventilazione dell'edificio; il fabbisogno di energia termica per il rinfrescamento nel caso di impianto ad assorbimento; il fabbisogno di energia termica per l'acqua calda sanitaria; il fabbisogno di energia termica per l'acqua delle vasche; la tipologia e le caratteristiche dei sottosistemi di generazione, accumulo, distribuzione, regolazione ed emissione di potenza termica.

Di seguito riprendiamo questi termini cercando di definire un set di parametri aggregati che quantifichino insieme il fabbisogno e i sistemi che lo soddisfano.

Prima di iniziare si ricorda che ai successivi parametri si aggiunge il parametro di correzione determinato dall'apporto termico degli eventuali sistemi solari-termici presenti.

6.3.1 Assorbimento di energia termica per il riscaldamento e/o il rinfrescamento degli ambienti

Tipicamente, l'impianto di riscaldamento di un centro natatorio può risultare piuttosto complesso, data la varietà di zone climatiche presenti. In più, ciascuna zona climatica differisce dalle altre per i sistemi di generazione, di emissione, di regolazione e di distribuzione. Come evidenziato nel Capitolo 3 in inverno gli ambienti vengono riscaldati a temperature differenti; il piano vasca e gli spogliatoi vengono riscaldati in maniera continua, mentre uffici, bar, palestre e sale di attività, in genere, sono caratterizzati da un funzionamento intermittente notte-giorno. In estate, la parte riscaldata comprende solo il piano vasca, spesso e volentieri solo nelle ore notturne. Infatti, la gestione operativa della piscina ammette illecitamente, nelle ore diurne, lo spegnimento della termoventilazione sul piano vasca date le alte temperature esterne. Questo tipo di gestione non prevede un controllo analitico della temperatura e dell'umidità dell'aria, tuttavia riesce a mantenere delle condizioni simili a quelle richieste dalla normativa tramite l'apertura di finestre e porte-finestre così da garantire il ricambio d'aria ed evitare la condensa (almeno in parte).

Per effettuare una stima dei consumi termici, risulta evidentemente importante la registrazione dei comportamenti della gestione operativa di ciascun centro, eseguita attraverso delle interviste con il fine di calcolare coerentemente i parametri su cui si baserà la conoscenza della rete neurale.

Come è noto il fabbisogno effettivo di energia termica dipende: dalla stratigrafia dell'edificio; dalle superfici disperdenti verso ambienti non climatizzati e ambienti climatizzati ad una temperatura diversa; dalla temperatura di set-point; dalle temperature esterne; da ponti termici; da fenomeni di accumulo del calore; da carichi sensibili interni; dalla tipologia di regolazione, distribuzione, emissione e accumulo degli impianti. Per la costituzione dei parametri si sono trascurati: ponti termici, superfici disperdenti verso ambienti climatizzati ad una temperatura diversa, gradiente termico, fenomeni di accumulo del calore e carichi sensibili interni. In questo modo è stato possibile concentrare il processo di ricerca e aggregazione sugli elementi che influiscono maggiormente sul fabbisogno termico, ovvero: trasmittanze e superfici verso

ambienti non climatizzati, temperature medie e tipologia impiantistica.

Per quanto riguarda il reperimento dei valori geometrici (superfici disperdenti), grazie alla collaborazione aziendale e, in alcuni casi, alla disponibilità dei Comuni è stato possibile reperire tutte le planimetrie necessarie alla raccolta dei dati.

La difficoltà maggiore, invece, è stata riscontrata nella ricerca delle trasmittanze delle varie superfici.

Inizialmente, è stata fatta richiesta scritta ai Comuni proprietari dei centri natatori richiedendo la rispettiva Legge 10, ma solo in pochi casi questo documento è stato trovato e reso disponibile. Perciò, per molte strutture natatorie, le trasmittanze sono state ipotizzate in base alla zona climatica e in base all'anno di costruzione (tenendo anche conto delle ristrutturazioni successive). Per anni di costruzione compresi fra il 1976 e il 1991 si è fatto riferimento ai valori di trasmittanza consigliati dalla UNI 11300-2, in funzione dello spessore delle murature ricavate da planimetrie e prospetti. Per costruzioni (o ristrutturazioni) comprese fra il 2006 e il 2021 si sono adottati i valori massimi richiesti dalla normativa vigente valida nell'anno di costruzione (o ristrutturazione), distinguendo edifici nuovi e riqualificati. Fra il 2006 e il 1991 si sono utilizzati i valori di trasmittanza dei prospetti A.1, A.2, A.3, A.4, A.5, A.6 della UNI 11300-2, che in funzione dei materiali da costruzione definiscono la trasmittanza o, alternativamente, sono stati assunti i valori del prospetto A.7 della UNI. Tutti i valori sopra citati sono stati riportati, in forma tabellare, nell'Allegato B a pagina 104 della presente tesi.

Infine, per quanto riguarda le temperature, quelle interne sono state assegnate sulla base dei valori richiesti dalle normative vigenti; mentre per le temperature esterne si è scelto di fare riferimento ai valori medi mensili storici reperibili sul web, in modo tale da soddisfare la procedura A3 della UNI 11300.

Il parametro relativo al fabbisogno di energia termica sensibile per il riscaldamento (e/o rinfrescamento nel caso sia presente un impianto ad assorbimento) mensile è stato calcolato secondo la seguente espressione:

$$Q_s = \begin{cases} \sum_{k=1}^N \frac{h_k \cdot f_k}{\eta_{e,k} \cdot \eta_{g,k} \cdot \eta_{d,k}} & \text{per i mesi invernali} \\ \sum_{k=1}^N \frac{h_k \cdot f_k}{\eta_{e,k} \cdot \eta_{g,k} \cdot \eta_{d,k} \cdot \eta_{ass,k}} & \text{per i mesi estivi in presenza di un impianto ad assorbimento} \end{cases}$$

con $f_k = (U_c A_k + U_p A_{p,k} + U_s A_{s,k}) \cdot (T_{int,k} - T_{ext}) + (U_t A_k) \cdot (T_{int,k} - T_t)$

Dove:

- N è il numero di zone climatiche;
- h_k sono le ore di funzionamento medio dell'impianto di riscaldamento (o rinfrescamento) nella zona climatica k – *esima*;
- U_c , U_t , U_p e U_s sono rispettivamente le trasmittanze di copertura, pavimentazione, pareti verticali perimetrali esterne e serramenti;
- $A_{p,k}$, $A_{s,k}$ e A_k sono le superfici delle pareti verticali perimetrali esterne, dei serramenti e della superficie della zona climatica k – *esima*;

- $\eta_{e,k}$ è l'efficienza di emissione dei terminali presenti nella zona climatica $k -esima$ (UNI/TS 11300, Parte 2, Prospetti 17-18 e UNI/TS 11300, Parte 3, Prospetto 6);
- $\eta_{g,k}$ è il rendimento di generazione dell'energia termica che raggiunge la zona $k -esima$;
- $\eta_{d,k}$ è il rendimento di distribuzione dell'energia termica che raggiunge la zona $k -esima$ identificato seguendo la norma UNI 11300-2 (Prospetto 21 e 22 corretti in funzione delle temperature di mandata e ritorno nell'impianto, Prospetto 30);
- $\eta_{ass,k}$ è il rendimento di assorbimento medio mensile determinato dai dati prestazionali forniti dal fabbricante o dai dati effettivi di esercizio della macchina ad assorbimento²⁸ che asserva la zona climatica $k -esima$;
- $T_{int,k}$ è la temperatura richiesta nella zona climatica $k -esima$;
- T_t è la temperatura dell'ambiente confinante alla pavimentazione $k -esima$;
- T_{est} è la temperatura esterna media.

Si evidenzia che il rendimento di regolazione non è stato investigato, poiché non sono state rese disponibili le informazioni sulle tipologie di regolazione presenti. Per lo stesso motivo, non è stato possibile definire le perdite per accumulo (come nel caso dell'acqua calda sanitaria).

Per quanto riguarda il rendimento di generazione si sottolinea che: nel caso di fonti rinnovabili l'efficienza di generazione è stata assunta pari a 1; nel caso di teleriscaldamento è stato usato il valore d'efficacia dello scambiatore di calore della sottostazione di scambio termico ϵ_{ss} ; nel caso di cogeneratore il rendimento termico η_t fornito dal produttore; infine, per le caldaie, sono stati usati i valori dichiarati nei libretti di impianto dei centri o, alternativamente, i valori tabellari estrapolati dalle normative per il risparmio energetico che si sono susseguite negli anni: allegato E del D.P.R. 26 agosto 1993, n.412; allegato VI del D.P.R. 15 novembre 1996, n. 660; Art.12 del D.P.R. 21 dicembre 1999, n. 551; Allegato I 19 agosto 2005, n. 192; Allegato H del D.L. 29 dicembre 2006, n. 311; Allegato B del D.P.R. 16 aprile 2013, n. 74 . Riportiamo in Tabella 6.6 quanto previsto dal D.P.R. n.74 che riassume i progressivi avanzamenti della normativa sul rendimento di generazione. Dove il $\log P_n$ è il logaritmo in base 10 della potenza utile nominale espressa in kW sino a $P_n = 400 \text{ kW}$; per valori di potenza nominale superiori a 400 kW si applica la stessa formula con $P_n = 400 \text{ kW}$.

Per semplificare ulteriormente il calcolo sono state adottate due ulteriori semplificazioni: (i) gli infissi sono stati valutati unicamente in presenza di pareti vetrate; (ii) le zone climatizzate sono state ricondotte alle principali aree (piano vasca, spogliatoi dell'area piscina, palazzetto e/o sala di attività, spogliatoi palestre, locali accessori). A ciascuna di esse è stata associata la temperatura stabilita dalla UNI 11300 (salvo diverse indicazioni da parte dei gestori dei centri), rispettivamente per inverno e estate:

²⁸Nei casi in cui il dato è risultato irreperibile, il rendimento di assorbimento è stato assunto in funzione della temperatura di mandata del fluido refrigerante e della temperatura di ingresso dell'acqua calda oppure in funzione della temperatura in ingresso al condensatore seguendo le disposizioni della UNI 11300-4 per gli assorbitori a bromuro di litio (Prospetto 35).

Tabella 6.6: Valore minimo di rendimento di combustione consentito dalla normativa vigente.

Tipologie di generatori di calore	Data di installazione	Valore minimo consentito del rendimento di combustione
Generatore di calore (tutti)	prima del 29 ottobre 1993	$82 + 2 \cdot \log P_n$
Generatore di calore (tutti)	dal 29 ottobre 1993 al 31 dicembre 1997	$84 + 2 \cdot \log P_n$
Generatore di calore standard	dal 1 gennaio 1998 al 7 ottobre 2005	$84 + 2 \cdot \log P_n$
Generatore di calore a bassa temperatura	dal 1 gennaio 1998 al 7 ottobre 2005	$87,5 + 1,5 \cdot \log P_n$
Generatore di calore a gas a condensazione	dal 1 gennaio 1998 al 7 ottobre 2005	$91 + 1 \cdot \log P_n$
Generatore di calore a gas a condensazione	dall'8 ottobre 2005	$89 + 2 \cdot \log P_n$
Generatore di calore (tutti, salvo generatore di calore a gas a condensazione)	dall'8 ottobre 2005	$87 + 2 \cdot \log P_n$
Generatore ad aria calda	prima del 29 ottobre 1993	$77 + 2 \cdot \log P_n$
Generatori ad aria calda	dopo il 29 ottobre 1993	$80 + 2 \cdot \log P_n$

- piano vasca (interno) $T = 29^\circ C$;
- spogliatoi e servizi piano vasca $T = 24^\circ C$;
- palestre e sale di attività $T = (18 - 20)^\circ C$;
- servizi per attività sportiva $T = (20 - 24)^\circ C$;
- atrio, bar, uffici $T = (22 - 24)^\circ C$.

Osserviamo infine che nel caso di impianto a tutt'aria (spesso presente sul piano vasca o nei palazzetti sportivi) si è posto $Q_s = 0$, dato che i carichi, sensibile e latente, vengono soddisfatti entrambi dalla portata di progetto dell'unità di termoventilazione e saranno dunque compresi nel parametro definito per la ventilazione dei diversi ambienti. Mentre, nel caso in cui il fabbisogno di energia termica venga soddisfatto da una pompa di calore (anche solo in una singola zona del centro), il contributo in Q_s sarà nullo (per la suddetta zona) dato che non ne deriva un consumo termico, ma ne deriva un consumo elettrico durante tutto l'anno.

6.3.2 Assorbimento di energia termica per la ventilazione dell'edificio

Nei centri natatori la climatizzazione del piano vasca è conseguita mediante un impianto ad aria che soddisfa: i carichi latenti se l'impianto è di tipo misto aria-acqua e i carichi latenti e sensibili se l'impianto è a tutt'aria. Il trattamento dell'aria garantisce una temperatura ambiente uguale o maggiore della temperatura dell'acqua delle vasche (come richiesto da normativa) e controlla l'umidità relativa ($UR < 70\%$ vedi Norma Coni). In più, è frequente ritrovare anche unità di trattamento dell'aria dedicate ad altri locali, quali: spogliatoi, atrio, palestra, uffici. . .

Di conseguenza, la definizione del parametro di ventilazione è stata eseguita sommando più contributi: il primo riferito alla ventilazione del piano vasca, i successivi riferiti alla ventilazione delle altre aree.

$$Q_{ventilazione} = \sum_k \frac{Q_{v,k}}{\eta_e \cdot \eta_d \cdot \eta_g}$$

Come è noto dalla letteratura, il carico termico per la ventilazione può essere valutato moltiplicando la portata massica trattata e la somma dei salti entalpici in ciascuna batteria.

L'energia termica associata risulta di conseguenza:

$$Q_{v,k} = (m^* \cdot \rho_a \cdot \sum_i \Delta h_i) \cdot gg \cdot h$$

Dove:

- m^* è la portata d'aria di progetto elaborata dalla termoventilante nel mese in questione (m^3/h);
- ρ_a è la densità dell'aria (kg/m^3);
- Δh_i è la differenza di entalpia fra l'ingresso e uscita della batteria i - esima (kJ/kg);
- gg numero di giorni del mese;
- h ore di accensione dell'UTA k - esima nel mese in questione.

Risulta evidente che l'energia termica necessaria è funzione della composizione dell'UTA (Figura 6.1), ovvero: del tipo di umidificazione (isoentalpica o adiabatica), delle batterie presenti (riscaldamento, rinfrescamento, post-riscaldamento), della portata ricircolata, della portata mandata e dell'eventuale presenza di un recuperatore di calore.

La parametrizzazione adottata nel presente studio è stata identificata per stimare il carico termico unicamente conoscendo la portata mandata dall'unità di trattamento dell'aria. Questa definizione del parametro si è resa necessaria a causa di un'importante mancanza di dati relativi all'impianto di ventilazione che spesso è risultato parecchio datato. In particolare, è stato necessario, in quasi tutti i casi, ipotizzare la portata di rinnovo, la presenza del recuperatore di calore e l'efficienza di quest'ultimo.

La portata di rinnovo è stata definita sulla base della normativa UNI 10339 [21] - prospetto III - che in funzione dell'attività svolta stabilisce le portate minime di rinnovo d'aria per m^2 di superficie o per persona (dove il numero di persone è definito dall'indice di affollamento, prospetto VIII della UNI 10339).

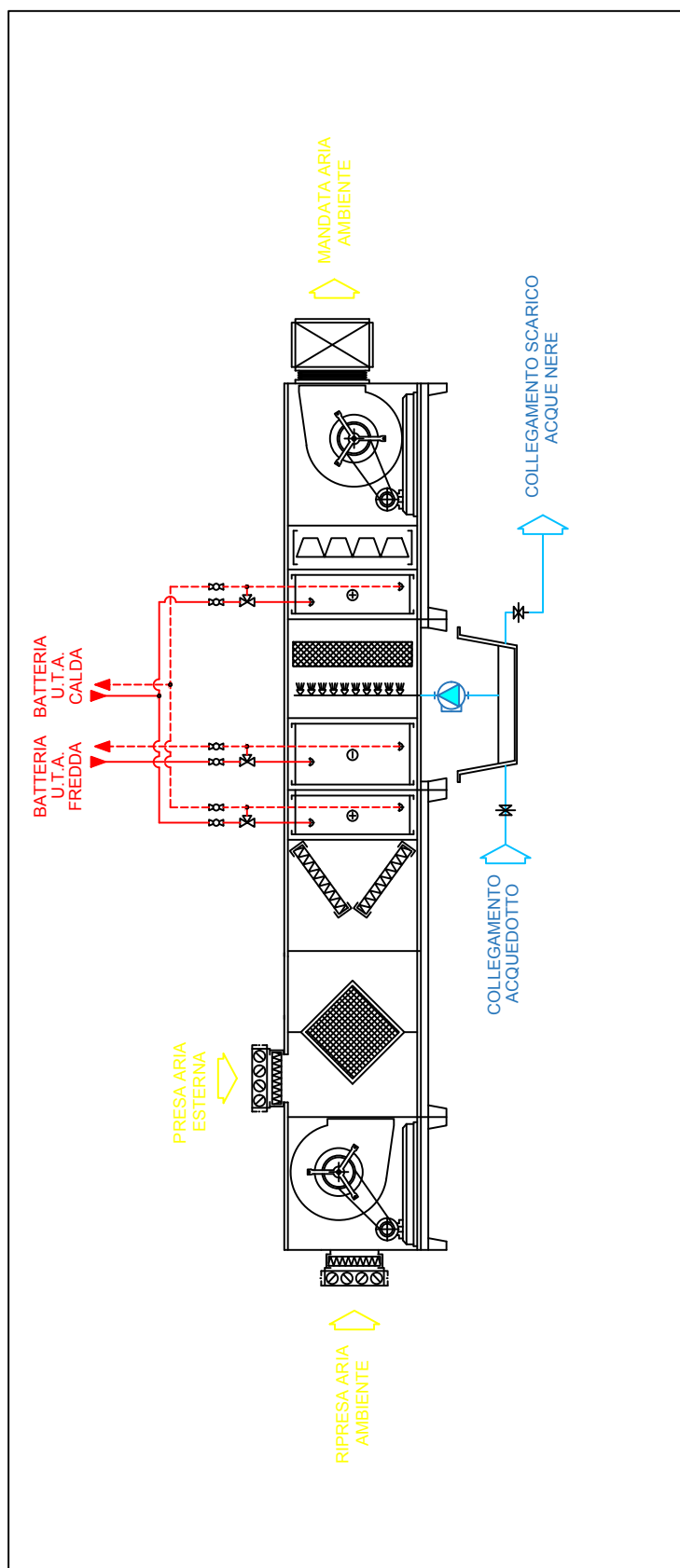


Figura 6.1: Schema di un'unità di trattamento dell'aria.

Tabella 6.7: Allegato C del Decreto del Presidente della Repubblica n.412 del 1993.

Portata d'aria mc/h	Ore annue di funzionamento	
	Da 1400 a 2100 gradi giorno	oltre i 2100 gradi giorno
2.000	4.000	2.700
5.000	2.000	1.200
10.000	1.600	1.000
30.000	1.200	800
60.000	1.000	700

Per quanto riguarda la presenza di un recupero di calore fra aria espulsa dall'ambiente e immessa nell'UTA, si è fatto riferimento alla normativa vigente. Per impianti successivi al 1993 (di nuova installazione o ristrutturati) è d'obbligo un recupero del calore disperso per il rinnovo dell'aria, se la portata totale dell'aria di ricambio e il numero di ore annue di funzionamento dei sistemi di ventilazione risultano superiori ai valori limite riportati nell'Allegato C del DPR n. 412 [20] che per completezza riportiamo in Tabella 6.7. In definitiva, stabilita la portata d'aria, se le ore di funzionamento dell'impianto di ricambio risultano superiori al valore limite corrispondente indicato in Tabella 6.7, allora è obbligatorio l'utilizzo di un sistema di recupero del calore.

A questo proposito, sul piano vasca l'impianto ad aria rimane acceso 24 ore su 24 da metà settembre a metà maggio, sia per una questione legata all'eccessivo transitorio termico che si avrebbe se il piano vasca non venisse riscaldato nelle ore notturne, sia a causa dei pochi giorni di chiusura dei centri (in genere quasi tutti i centri natatori durante l'anno rimangono chiusi due giorni a Natale e due a Pasqua). Contando 24 ore di apertura giornaliera per circa 240 giorni e 12 ore di apertura giornaliera per circa 120 giorni estivi si hanno 7200 ore all'anno, per cui sicuramente, comunque siano i gradi giorno della località, i sistemi di ventilazione delle piscine dovranno essere predisposti (se installati dopo il 1993) con sistemi di recupero del calore. Nel caso degli altri ambienti, la ventilazione avviene nelle ore diurne di apertura del centro (circa 12) moltiplicandole per 240 giorni all'anno (circa 8 mesi), si hanno 2880 ore annuali che sono sempre maggiori delle ore massime ammissibili nel caso in cui nella località si superino i 2100 gradi giorno (come accade per esempio a Milano), ma non è sempre così per valori di gradi giorno inferiori. Di conseguenza, caso per caso, è stata stabilita la presenza di un recuperatore di calore e gli è stato assegnato un rendimento sulla base dell'esperienza aziendale: per UTA con meno di 10 anni si sono assegnati rendimenti da 0,85 e 0,6; per installazioni di data compresa fra il 2010 e il 2000 il rendimento è stato assegnato fra 0,6 e 0,3; per UTA con più di 20 anni il rendimento è stato scelto fra 0 e 0,3 in funzione anche dell'esperienza del manutentore e delle informazioni che sono state rese disponibili.

Entrando nello specifico, per effettuare una stima della potenza termica richiesta dalle unità di trattamento dell'aria si può generalizzare l'analisi sotto alcuni aspetti che esplichiamo di seguito.

Per quanto riguarda il piano vasca, la ventilazione e il riscaldamento vengono garantiti tramite una o più termoventilanti che, a differenza delle unità di trattamento dell'aria, non hanno la sezione di umidificazione e la batteria di rinfrescamento. Questa soluzione impiantistica è la più diffusa nel caso delle piscine per due principali ragioni: innanzitutto l'ambiente è scaldato tutto l'anno e quindi non necessita della batteria di rinfrescamento e, in secondo luogo, all'interno del piano vasca il tasso d'umidità è elevato a causa dell'evaporazione dell'acqua di vasca, per cui anche la sezione di umidificazione è priva di utilità.

Infine, specifichiamo che, date le alte temperature da mantenere sul piano vasca, le termoventilanti dedicate a questa zona, in genere, sono dotate di parziale ricircolo e in teoria dovrebbero avere un recuperatore di calore funzionante se installate dopo il 1993.

Vediamo innanzitutto il caso di una termoventilante dedicata al piano vasca avente un recuperatore di efficienza ϵ e una portata di ricircolo $\dot{m}' = \dot{m} - \dot{m}^*$, dove $\dot{m}$ è la portata d'aria di rinnovo (nel caso non sia nota, può essere stimata facendo riferimento all'Accordo Stato-Regioni che stabilisce una portata minima di rinnovo paria a $20 \text{ m}^3/\text{h}$ per m^2 di vasca). Il calcolo del Δh si può assumere in prima approssimazione pari alla differenza fra l'entalpia che caratterizza il piano vasca e quella all'uscita dal recuperatore. In questo modo, ovvero approssimando l'entalpia dell'aria immessa con l'entalpia ambiente, diventa possibile non ricorrere al diagramma psicrometrico per individuare il punto di immissione che comunque sarà vicino a quello ambiente.

L'entalpia dell'ambiente piano vasca si calcola in funzione della temperatura e dell'umidità relativa di *set point* da mantenere all'interno; mentre l'entalpia all'ingresso del gruppo di trattamento dell'aria è calcolata attraverso il bilancio dato dalla miscelazione delle due portate d'aria $\dot{m}$ e $\dot{m}^*$, ovvero:

$$\dot{m} \cdot h_B + \dot{m}' \cdot h_A = \dot{m}^* \cdot h_M$$

Dalla presente espressione si ricava:

$$h_M = \frac{\dot{m} \cdot h_B + \dot{m}' \cdot h_A}{\dot{m}^*}$$

dove l'entalpia h_B si calcola in funzione dell'umidità relativa dell'aria esterna e della temperatura raggiunta a valle del recuperatore di calore. In particolare, sapendo che:

$$\epsilon = \frac{T_B - T_E}{T_A - T_F}$$

si ricava $T_B = T_E + \epsilon \cdot (T_A - T_F)$, dove la temperatura T_F può essere assunta pari alla temperatura dell'aria esterna in prima approssimazione.

Si ricorda per completezza che le entalpie possono essere calcolate in maniera analitica con la seguente:

$$h_j = c_{P,a}T_j + x_j \cdot (r + c_{P,v}T_j) \quad \text{con} \quad x_j = \frac{R_a}{R_v} \frac{UR_j \cdot p_s(T_j)}{p_t - UR_j \cdot p_s(T_j)}$$

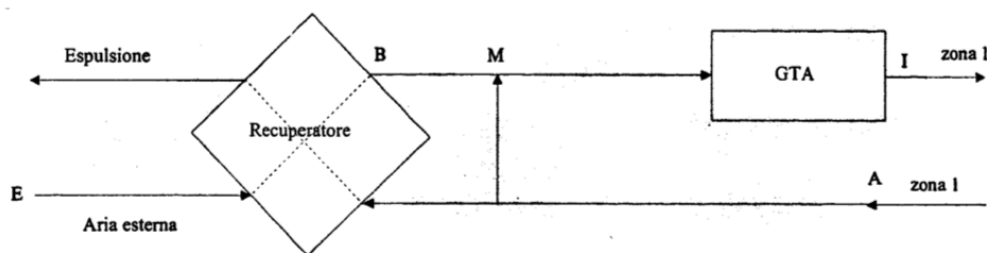


Figura 6.2: Schema funzionale di un gruppo di trattamento dell'aria generico con recupero e ricircolo.

Dove:

- il pedice j identifica le condizioni termodinamiche dall'aria in considerazione,
- $c_{P,a} = 1,005 \text{ kJ/kg}$ è il calore specifico dell'aria,
- $c_{P,v} = 1,875 \text{ kJ/kg}$ è il calore specifico del vapore,
- $R_a = 287 \text{ J/kgK}$ è la costante dell'aria,
- $R_v = 462 \text{ J/kgK}$ è la costante del vapore,
- $r = 2501 \text{ kJ/kg}$ è il calore latente di vaporizzazione dell'acqua.

Nel caso in cui la termoventilante non abbia un recuperatore di calore è sufficiente porre $\epsilon = 0$; invece nel caso in cui non ci sia una miscelazione data dal ricircolo di una portata di aria allora il punto M coinciderà con il punto B e basterà imporre $m' = 0$.

Per ambienti diversi dal piano vasca l'analisi dell'energia spesa può comprendere recuperatori, ricircolo e controllo dell'umidità con la classica composizione dell'UTA: batteria di riscaldamento; sezione di umidificazione adiabatica, batteria di rinfrescamento e deumidificazione e batteria di post-riscaldamento. La determinazione di un parametro che caratterizzi l'energia termica spesa per il condizionamento dell'aria si rivela di fatto più complesso in quanto non sono note le temperature intermedie fra le batterie e non è nota la temperatura di immissione dell'aria. Di conseguenza si eseguono alcune semplificazioni al fine di definire un parametro indicativo della spesa energetica.

Per i mesi di climatizzazione estiva la UNI 11300-3 suggerisce di utilizzare alcune formule empiriche per il calcolo del fabbisogno per il trattamento dell'aria (riportate in Tabella 6.8). Tali formule sono il risultato di uno studio statistico che ha ricavato uno strumento semplificato per la valutazione dei fabbisogni connessi ai trattamenti dell'aria di ventilazione. Nel caso invernale invece la normativa consiglia di far riferimento alla differenza di temperatura fra esterno e interno per valutare l'energia termica assorbita dal gruppo di trattamento dell'aria. Il carico di ventilazione per ambienti diversi del

Tabella 6.8: Formulazione semplificata del fabbisogno per trattamento dell'aria in funzione dell'entalpia dell'aria esterna, Prospetto F.1 della UNI 11300-3.

Ore di accensione giornaliera h	Intervallo orario di accensione	Fabbisogno orario medio $Q_{v,m} \text{ kJ/kg}$
24	0-24	$1,3615 \cdot h_E - 58,540$
12	7-18	$1,5187 \cdot h_E - 63,438$
10	8-17	$1,5338 \cdot h_E - 63,519$
8	9-16	$1,5853 \cdot h_E - 65,492$
6	10-15	$1,5807 \cdot h_E - 64,751$

piano vasca può quindi essere calcolato come segue:

$$Q_{ventilazione} = \begin{cases} gg \cdot h \cdot \rho_a c_a \sum_k \dot{m}_k^* \cdot (T_k^* - T_E) & \text{per i mesi invernali } m = 1, 2, 3, \dots, 5, 9, \dots, 12 \\ gg \cdot h \cdot \sum_k \dot{m}_k^* \cdot Q_{v,m,k} & \text{in quelli estivi } m = 6, 7, 8 \end{cases}$$

Dove:

- h è il numero di ore di accensione giornaliera;
- gg è il numero di giorni di funzionamento nel mese considerato;
- $\rho_a c_a$ è la capacità termica volumica dell'aria, pari a $1200 \text{ J/(m}^3 \text{ K)}$;
- $\dot{m}_k^*$ è la portata d'aria di progetto della zona climatica k –esima;
- T_E temperatura media mensile dell'ambiente esterno;
- T_k^* temperatura interna di regolazione per il riscaldamento della zona k –esima;
- $Q_{v,m,k}$ è il fabbisogno orario medio in kJ/kg (Tabella 6.8) della zona climatica k –esima.

Infine si nota che, similmente al caso precedente, in caso di miscelazione o ricircolo è possibile calcolare la temperatura all'ingresso delle batterie e sostituirla al posto della temperatura esterna con le formule riportate sopra.

6.3.3 Assorbimento di energia termica per il riscaldamento dell'acqua calda sanitaria

Il parametro relativo al fabbisogno di energia termica utile per l'acqua calda sanitaria è stato definito in funzione della portata d'acqua stimata nella prima sezione del presente capitolo (W_{ACS}).

Segue l'espressione adottata:

$$Q_{ACS} = \frac{\rho \cdot c \cdot W_{ACS} (T_{er} - T_{acq})}{\eta_{er} \cdot \eta_s \cdot \eta_d \cdot \eta_g} \cdot (1 - f_d)$$

Dove:

- ρ è la densità dell'acqua (1000 kg/m^3);
- c è il calore specifico dell'acqua pari a $4186 \text{ J/kgK} = 1,162 \text{ Wh/kg}$;
- W_{ACS} è il volume d'acqua usata nel mese analizzato (m^3);
- $(T_{er} - T_{acq})$ è la differenza fra la temperatura di erogazione (40°C) e quella dell'acquedotto (15°C);
- η_{er} è il rendimento di erogazione, assunto pari a 0,95 (secondo quanto indicato nella UNI-TS 11300-2 al Prospetto 16);
- η_s , η_d e η_g sono l'efficienza dello scambiatore di calore, l'efficienza di distribuzione e quella di generazione;
- f_d è il coefficiente di perdita per distribuzione e viene assegnato come descritto nella UNI-TS 11300-2 al Prospetto 30.

Si evidenzia che, a differenza di quanto riportato nella normativa, in questa parametrizzazione non è stato valutato il coefficiente di perdita per accumulo, in quanto sarebbero stati necessari dati difficilmente reperibili: superficie serbatoio, spessore e conduttività dell'isolante, lunghezza della tubazione che collega l'accumulo alla caldaia, presenza di isolanti sulla tubazione ecc. . .

6.3.4 Assorbimento di energia termica per il riscaldamento dell'acqua di vasca

Infine, in maniera abbastanza analoga, il parametro relativo al fabbisogno di energia termica per il riscaldamento delle vasche è definito come segue:

$$Q_{vasche} = \frac{\rho \cdot W_{vasche} \cdot c \cdot (T_{imm} - T_{acq})}{\eta_s \cdot \eta_d \cdot \eta_g} + Q_{evap}$$

Dove:

- ρ è la densità dell'acqua 1000 kg/m^3 ;
- c è il calore specifico dell'acqua pari a $4186 \text{ J/kgK} = 1,162 \text{ Wh/kg}$;
- W_{vasche} sono i m^3 dell'acqua di riempimento, reintegro e rinnovo delle vasche riscaldate nel mese considerato;
- $(T_{imm} - T_{acq})$ è la differenza fra la temperatura di immissione²⁹ e quella dell'acquedotto (15°C);
- η_s , η_d e η_g sono l'efficienza dello scambiatore di calore, l'efficienza di distribuzione e quella di generazione;

²⁹ Assunta pari a 29°C secondo quanto riportato dall'accordo Stato-Regioni (vedi Capitolo 3 della tesi).

- Q_{evap} è l'energia che viene dispersa per evaporazione dell'acqua di vasca³⁰ [32] calcolata come:

$$Q_{evap} = A \cdot (1,41 \cdot (3,1 + 4,1 \cdot v)(p_w - p_a)) \cdot 24h \cdot gg$$

Dove:

- A è la superficie d'acqua delle piscine presenti sul piano vasca considerato;
- p_w è la pressione di saturazione del vapor d'acqua alla temperatura dell'acqua di vasca t_w

$$p_w = 0,0044 t_w^2 - 0,01 t_w + 0,7 \quad [kPa]$$

- p_a è la pressione parziale del vapore nell'aria calcolata come

$$p_a = UR \cdot p_v(t_a) \quad \text{dove} \quad p_v(t_a) = 0,611 \cdot 10^{\frac{7,5 t_w}{237,7 + t_w}} \quad [kPa]$$

- v è la velocità dell'aria all'altezza di 0,3 m sopra la piscina (assunta pari a 0,08 m/s date le direttive dell'Accordo Stato Regioni, dove si richiede che la velocità dell'aria in corrispondenza delle zone utilizzate dai frequentatori non sia superiore a 0,10 m/s);
- gg sono il numero di giorni del mese di riferimento.

In conclusione, i dati raccolti dai centri per la definizione dei parametri aggregati relativi al consumo di energia termica sono:

- tipologia di generatore di calore con la relativa efficienza di generazione o efficienza termica ed elettrica nel caso di cogeneratore;
- anno di costruzione dell'immobile o trasmittanze delle superfici disperdenti;
- planimetrie e prospetti (per il calcolo delle superfici);
- tipologia di pareti vetrate;
- schemi funzionali dell'impianto e delle UTA;
- tipologia di terminali per il riscaldamento.

³⁰Non si valutano le trasmissioni di energia per convezione, conduzione e irraggiamento sulla superficie delle vasche perchè questi fenomeni complessivamente risultano trascurabili. Secondo [41], le perdite energetiche per evaporazione coprono circa il 60% del calore da fornire; il riscaldamento dell'acqua di rinnovo circa il 38% e solo il 2% circa ricopre le perdite di calore per convezione e conduzione.

Capitolo 7

Reti neurali

Le tecniche di *machine learning* vengono generalmente applicate dove sono presenti una moltitudine di dati da cui è possibile estrapolare la conoscenza di un fenomeno. L'informatica ha permesso la costruzione di neuroni artificiali che ricercano collegamenti fra mix di variabili fornite come input per ottenere il risultato richiesto. Nel nostro caso, nonostante i centri natatori e sportivi siano pochi rispetto al numero di oggetti teoricamente necessari per applicare queste tecniche, è stato possibile istruire le reti grazie a strategie di moltiplicazione dei dati che permettono di supplire al numero limitato di centri analizzati evitando l'*overfitting*. In questo capitolo introduciamo le reti neurali per poi approfondire la topologia delle reti implementate, le criticità maggiori riscontrate in questo caso di studio e i risultati ottenuti. Nell'ultima sezione del presente Capitolo si riportano le considerazioni sui risultati e sugli sviluppi futuri per i quali l'intero lavoro di tesi pone le basi.

7.1 Funzionamento di una rete neurale

Il funzionamento delle reti neurali si basa sull'interazione di tre elementi fondamentali che le compongono:

1. *Input dimension*,
2. *Black box*,
3. *Output dimension*.

L'*Input dimension* sono le variabili che caratterizzano il fenomeno che vogliamo descrivere, queste molto spesso sono ridotte attraverso un'analisi delle componenti principali (PCA - *Principal Component Analysis*), ovvero attraverso uno studio che proietti l'insieme di variabili in uno spazio dimensionale caratterizzato da meno dimensioni. In questo modo è possibile ridurre le variabili di ingresso in un numero inferiore di componenti principali che andranno ad alleggerire il costo computazionale della rete e lo studio relativo alla sua topologia. L'elemento identificato come scatola nera (*Black box*) può essere pensato come un insieme di nodi divisi in strati (chiamati *hidden layers*) che rappresentano, con un'approssimazione artificiale, i neuroni del cervello. L'*Output dimension* è il risultato fornito dalla rete.

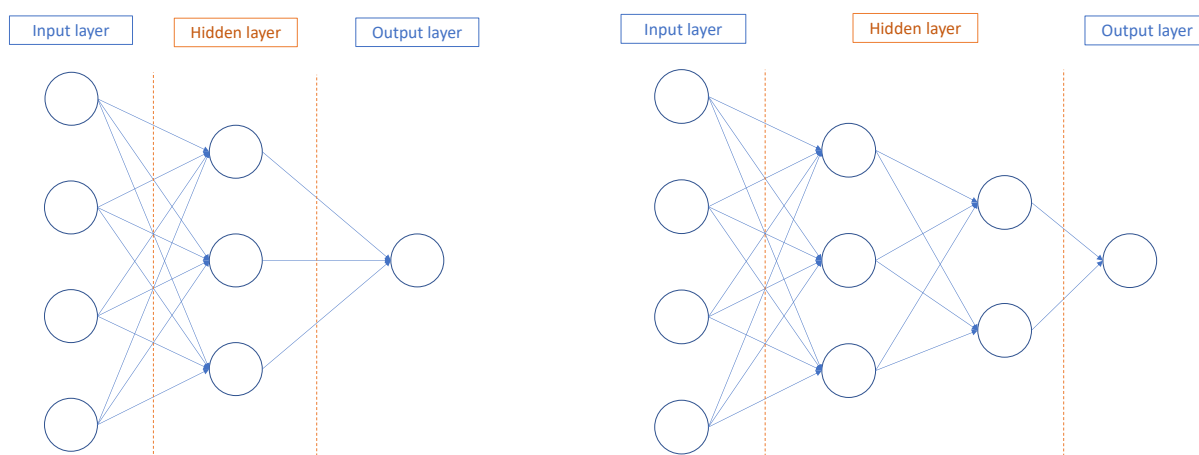


Figura 7.1: A sinistra una rete neurale con un layer composto da tre neuroni; a destra una rete neurale con due layer composti in totale da 5 neuroni.

L'implementazione di una rete neurale consiste nella programmazione di un procedimento iterativo che porta alla convergenza di una funzione capace di calcolare l'output desiderato in funzione delle variabili presenti nell'*input dimension*.

Per ottenere questo, le reti neurali vengono sottoposte a due importanti fasi che determinano la bontà dei risultati: la fase di apprendimento e la fase di validazione. Per eseguire queste due fasi innanzitutto il data set deve essere diviso in *training set* e *validation set*, ovvero: si selezionano un certo numero di oggetti per la fase di apprendimento (fase in cui la rete fissa i pesi e i bias ipotizzando una funzione descrittiva del fenomeno in questione) e un certo numero per la fase di validazione (fase in cui si valuta l'accuratezza del lavoro proposto dalla rete). L'apprendimento della rete viene interrotto quando l'*accuracy* (calcolata sul campione di validazione) ha raggiunto la convergenza; ovvero, quando anche iterando più volte, la rete non riuscirebbe ad ottenere risultati migliori.

Il *training set* è necessario per istruire la rete, mentre il *validation set* è necessario per valutare l'efficacia della ANN ed eventualmente modificarne la topologia per ottenere dei risultati migliori. La numerosità dei due set di dati fa parte della progettazione della rete ed è importante calibrarla perché la scelta di un *training set* troppo grande comporta l'*overfitting*³¹; mentre, se il *training set* è troppo piccolo, potrebbe non essere sufficiente a compiere l'addestramento: se i dati del training sono pochi per una calibrazione accurata dei pesi e del bias la funzione trovata dalla rete sarà poco precisa nelle sue previsioni. Le percentuali che in genere risultano essere efficaci sono circa 70% – 30% (rispettivamente per il *training set* e *validation set*) ma possono variare a seconda del caso di studio e del data set disponibile.

³¹La rete va in *overfitting* perché non riesce a generalizzare l'apprendimento (ovvero, non riesce a comprendere la natura del fenomeno) e quindi cerca di imparare a memoria come comportarsi in ogni situazione ottenendo scarsi risultati sul data set di validazione.

Le reti neurali artificiali (come tutte le tecniche di *machine learning*) possono essere classificate in due grandi categorie che si distinguono nella fase di apprendimento: non supervisionata o supervisionata. Nel primo caso i dati oggetto di studio non necessitano di un'etichetta per l'istruzione della rete, ma il data set deve essere molto grande per produrre dei buoni risultati: con questa tecnica è necessario avere intrinsecamente una ridondanza dei pattern in ingresso affinché la rete riesca ad apprendere correttamente la funzione desiderata. Nel secondo caso l'apprendimento necessita di un "esperto" che fornisca il risultato (valore di *training*), con il vantaggio di ammettere un set di dati inferiore rispetto all'approccio non supervisionato.

Nel presente studio di tesi è stato adottato un processo di apprendimento supervisionato, poiché lo scarso numero di dati non avrebbe consentito di ottenere dei buoni risultati procedendo diversamente. Nel nostro caso lo studio di *clustering*, illustrato precedentemente, fornisce il valore di *training*. Perciò, le reti indicate nella prossima Sezione sono istruite in maniera tale da assegnare un nuovo impianto natatorio alla giusta classe in funzione dei suoi parametri. Riportiamo la procedura che viene eseguita nel caso di apprendimento di una rete neurale artificiale supervisionata.

- Step 0: la rete assegna valori casuali ai pesi associati a ciascun parametro e ai bias.
- Step 1 (*Feedforward*, Figura 7.2):
 - per ogni nodo dell'*hidden layer* si somma il bias del nodo con i parametri di input moltiplicati per il rispettivo peso definito nello Step 0;
 - i valori così ottenuti vengono elaborati dalla funzione di attivazione (*activation function* caratteristica dei nodi dell'*hidden layer* (tale funzione è essenziale per modellizzare la non linearità del problema);
 - i risultati ottenuti dal primo layer di neuroni vengono a loro volta moltiplicati per i pesi e sommati ai bias dei neuroni del layer successivo, viene applicata la funzione di attivazione e così via... sino all'*Output dimensions*.
- Step 2 (*Back propagation*):
 - viene calcolato l'errore fra il risultato e il valore di *training* fornito dall'"esperto",
 - se l'errore è maggiore di quello stabilito si aggiornano i pesi e i bias e si segue nuovamente lo Step 1.

Conclusa la fase di apprendimento della rete segue la fase di validazione. Questa fase è essenziale in quanto consente di verificare l'affidabilità e la precisione della *machine learning*, andando a definire se lo studio è stato efficace. Si fornisce il data set di validazione alla rete e si verifica quanto si discostano i valori predetti (in funzione dei pesi e dei bias ottenuti dalla convergenza del procedimento di apprendimento) da quelli reali.

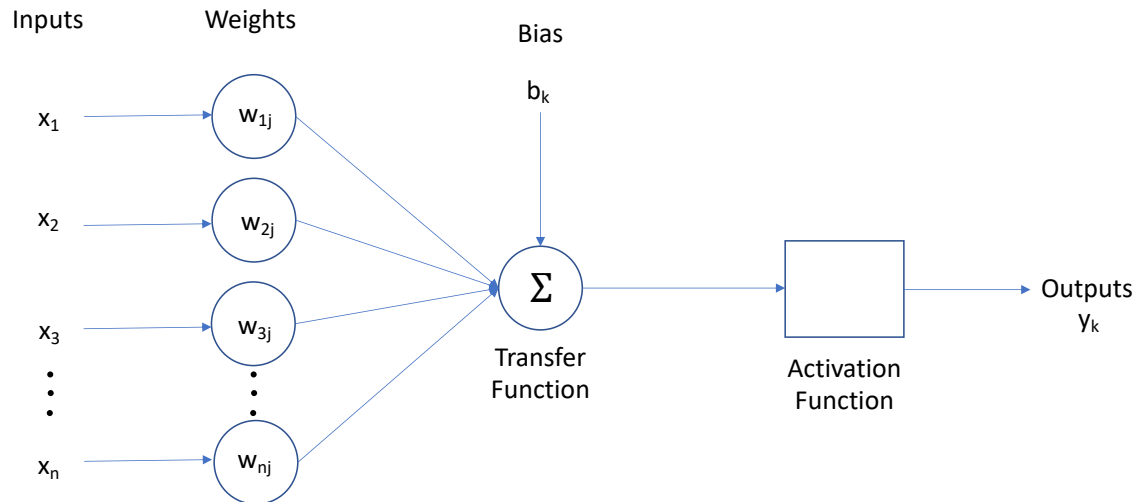


Figura 7.2: Struttura operativa dell'apprendimento di un singolo neurone artificiale.

7.2 ANN di classificazione per i consumi di centri sportivi

Nel presente caso di studio sono state implementate tre differenti reti neurali supervisionate.

Alcune caratteristiche e tecniche delle reti implementate vengono riassunte per completezza in Tabella 7.1.

Ciascuna rete è stata studiata e implementata dall'azienda Masvis srl attraverso i seguenti passi:

1. *Pre-processing*

- PCA dei parametri definiti nel Capitolo 6 a pagina 58 in modo da proiettare il data set in uno spazio dimensionale inferiore (in tutti e tre i casi è stato scelto uno spazio bidimensionale descritto da 2 variabili principali - PC1 e PC2 - che vanno a formare *input dimension* delle reti);
- standardizzazione;

2. *Data argumentation*, ovvero simulazione di centomila centri fittizi ottenuti perturbando i valori delle strutture reali;

3. Divisione del data set in *training set* e *validation set*;

4. Addestramento e definizione della topologia delle reti cercando di massimizzare l'*accuracy*³² (procedura iterativa ottenuta addestrando più reti e selezionando quella con i risultati migliori).

Oltre alle informazioni riportate in Tabella 7.1, a proposito dei metodi impiegati, è stato necessario eseguire la tecnica di *dropout* per evitare il fenomeno di *overfitting* durante la fase di implementazione delle reti neurali artificiali.

³²L'*accuracy* è il rapporto fra gli elementi classificati correttamente e gli elementi totali. Se tutte le strutture vengono classificate in maniera corretta, la rete restituisce un'*accuracy* pari a 1.

Tabella 7.1: Modi e metodi per la costruzione delle reti neurali.

ANN		elettrica	termica	acqua
training set		0,9	0,8	0,8
test set		0,1	0,2	0,2
validazione		k-fold cross-validation		
funzione di attivazione	hidden layer	ReLU		
	output layer	softmax		
accuracy		>0,99	>0,95	>0,95

Tabella 7.2: Topologia delle reti neurali.

Topologia ANN	input layer	hidden layer		output layer
	n° neuroni	n° layer	n° neuroni	n° neuroni
elettrica	2	3	24,20,16	4
termica	2	3	1,1,1,1	4
acqua	2	2	1,1	4

La topologia delle tre reti implementate da Masvis srl può essere schematizzata con i valori riportati in Tabella 7.2. Come si può notare dalla tabella, tutte e tre le reti sono state implementate con un *hidden layer* composto da tre strati di neuroni e tutte e tre hanno un *input dimension* formato da due neuroni che rappresentano PC1 e PC2, ovvero i parametri definiti nel Capitolo 6 a pagina 58 sottoposti alla *Principal Component Analysis*. Il numero di neuroni del *output dimension* corrisponde invece al numero di cluster, dato che la rete deve apprendere come dividere in classi il data set.

Le ANN così istruite possono assegnare nuove strutture a una delle classi esistenti usando i parametri definiti e quindi predire il consumo elettrico, termico e di acqua tramite una media pesata dei consumi delle strutture appartenenti alla stessa classe. Per valutare i risultati dello studio abbiamo usato la parametrizzazione di cinque centri natatori, analizzando le differenze fra il target di consumo prodotto dalle reti neurali e quello reale monitorato dalla piattaforma attuale di *energy monitoring* di HF srl. Riportiamo in Tabella 7.3, 7.4 e 7.5 gli errori percentuali fra il target di consumo predetto dall'Analytic Tool e il consumo reale mensile registrato da contatore calcolati come segue:

$$errore = \frac{\text{consumo reale} - \text{target}}{\text{consumo reale}} \cdot 100$$

I risultati ottenuti sono solo in parte significativi dell'efficacia del metodo, in quanto sarebbe necessario un campione maggiore di strutture sportive e natatorie per affermare il funzionamento del predittore proposto. Tuttavia, aumentare i centri per quest'ultima fase di *testing* del Tool avrebbe sottratto elementi importanti per l'apprendimento delle reti neurali. Infatti, i centri impiegati per la formazione della

Tabella 7.3: Errore percentuale del target di consumo di energia elettrica.

Errore del target di energia elettrica					
mese	Ve_6	Lo_{20}	Ve_2	Lo_2	Pi_2
gennaio	6%	-4%	0%	14%	2%
febbraio	2%	-15%	6%	16%	0%
marzo	4%	6%	6%	1%	0%
aprile	11%	7%	4%	5%	-3%
maggio	-6%	7%	1%	2%	-4%
giugno	-6%	12%	15%	10%	2%
luglio	-7%	14%	5%	-2%	-12%
agosto	16%	9%	-9%	-7%	5%
settembre	7%	0%	-4%	-12%	4%
ottobre	0%	8%	9%	-8%	-4%
novembre	-10%	4%	-14%	-1%	8%
dicembre	-17%	0%	11%	-4%	0%

conoscenza delle reti non possono essere utilizzati per osservare i risultati finali, in quanto la topologia della rete è stata studiata proprio per ottimizzare le predizioni di quest'ultimi. Eseguire il *testing* finale sulle strutture dedicate all'estrapolazione della conoscenza, porterebbe a ottimi risultati dal punto di vista della predizione, ma tali risultati non avrebbero valore. Infatti, la bontà del Analytic Tool deve essere misurata sulla sua capacità di generalizzazione della conoscenza e non sulla risoluzione specifica di strutture già analizzate dalla rete.

Premesso ciò, è possibile apportare alcune considerazioni sui risultati riportati nelle tabelle sopracitate che costituiscono un valido indice per considerare lo studio eseguito nonostante siano risultati relativi ad un campione molto ristretto. Innanzitutto, è possibile osservare che l'errore percentuale dei target sui consumi in modulo è sempre inferiore a: 18% per l'energia elettrica, 21% per l'energia termica e 9% per il consumo di acqua.

I risultati migliori sono stati ottenuti sul target di acqua: la rete riesce ad effettuare delle previsioni migliori perché questo consumo ha un andamento abbastanza costante durante l'anno ed è fortemente dipendente dal volume d'acqua nelle vasche.

Al contrario i target di energia elettrica e termica assumono degli errori maggiori, imputabili a: una mala parametrizzazione dovuta alla mancanza di alcune informazioni (per esempio l'efficienza dei recuperatori delle UTA fortemente incidenti sul target termico), una disfunzione delle ANN nel clusterizzare una nuova

Tabella 7.4: Errore percentuale del target di consumo di energia termica.

Errore del target di energia termica					
mese	Ve_6	Lo_{20}	Ve_2	Lo_2	Pi_2
gennaio	-5%	9%	7%	6%	13%
febbraio	-8%	-4%	13%	1%	9%
marzo	-10%	6%	8%	-7%	-9%
aprile	-6%	0%	-3%	-10%	-13%
maggio	-6%	-2%	-5%	-15%	-5%
giugno	-20%	18%	-11%	-17%	20%
luglio	-15%	-17%	-14%	2%	5%
agosto	-17%	5%	-12%	-19%	18%
settembre	9%	4%	-9%	-5%	-17%
ottobre	7%	9%	-13%	-2%	-14%
novembre	8%	7%	-7%	-7%	9%
dicembre	5%	10%	0%	0%	5%

struttura (l'*accuracy* non è mai unitaria), un'erronea informazione legata all'utenza e/o alla gestione stessa degli impianti natatori. Probabilmente nella realtà della gestione degli impianti sportivi gli elementi che dovrebbero essere accesi in determinate ore non sempre sono in funzione e viceversa, non sempre sono spenti quando dovrebbero. L'azione degli operatori che si dimenticano di accendere o spegnere determinati assorbitori elettrici o termici influenza poi il consumo globale in maniera rilevante. Per migliorare questi target sarebbe necessario filtrare i dati al fine di eliminare dimenticanze e comportamenti legati a una mala gestione della struttura. Questo sarà un passo successivo che potrà essere implementato con un controllo più stretto dei consumi e con l'introduzione delle tecniche di *Fault Detection and Diagnosis*.

Per quanto riguarda i consumi termici è probabile che agli elementi elencati si sovrapponga la criticità di aver utilizzato nella parametrizzazione solo una temperatura media mensile senza considerare l'escursione termica. Nel caso del target termico, potrebbe essere interessante introdurre nei parametri un gradiente di temperatura caratteristico, anche in vista di un possibile sviluppo di un target giornaliero oltre che mensile.

Infine, osserviamo che l'utenza è stata valutata secondo i dati riportati dai gestori dei singoli centri, i quali in realtà molte volte non hanno un controllo ingressi predisposto e quindi conoscono solo indicativamente quali sono gli ingressi di mese in mese. Per futuri miglioramenti dei target sicuramente una contabilizzazione effettiva dell'utenza potrebbe aiutare ad affinare il predittore e i target di conseguenza.

Tabella 7.5: Errore percentuale del target di consumo di acqua.

Errore del target di acqua					
 mese	Ve_6	Lo_{20}	Ve_2	Lo_2	Pi_2
gennaio	2%	-1%	-1%	-3%	-1%
febbraio	7%	3%	-2%	5%	-4%
marzo	0%	3%	-5%	-2%	-2%
aprile	1%	0%	1%	-8%	0%
maggio	-5%	7%	-5%	2%	-2%
giugno	3%	1%	0%	4%	1%
luglio	-1%	1%	-1%	-1%	2%
agosto	0%	-3%	-1%	2%	0%
settembre	-1%	2%	2%	3%	-4%
ottobre	-1%	0%	-1%	-1%	2%
novembre	2%	-1%	-2%	-3%	4%
dicembre	1%	2%	0%	2%	3%

Conclusioni e sviluppi futuri

Il presente lavoro di tesi pone le basi fondamentali per lo sviluppo di un Tool analitico per l'*energy monitoring and targeting* al fine di diminuire l'impatto ambientale dovuto ad attività inefficienti.

Nonostante siano necessari futuri aggiornamenti nell'apprendimento delle reti neurali artificiali e sia auspicabile un approfondimento legato alle caratteristiche tecniche che in questo studio sono state ipotizzate per mancanza di dati di targa, i risultati raggiunti nella tesi, presentati nel Capitolo precedente, hanno dimostrato l'efficacia dell'approccio adottato compatibilmente alla qualità e quantità di dati.

In particolare, per lo studio in questione, si otterranno importanti miglioramenti grazie alla progressiva acquisizione di nuove strutture sportive e alla disponibilità di nuovi dati che, con l'installazione dei lettori automatici, potranno fornire dei campionamenti con una frequenza costante e soprattutto superiore a quella attuale, aprendo la strada a successive analisi per la predizione di target giornalieri con un procedimento simile a quello adottato per il target mensile.

Infatti i contatori con lettura automatica possono restituire misure intervallate addirittura di pochi minuti, migliorando le predizioni prodotte dalle reti neurali e introducendo sistemi rapidi di rilevamento dei guasti in modo tale da agire tempestivamente evitando effetti collaterali.

I principi di *data mining*, che hanno accompagnato la costruzione del Tool, consentiranno progressivamente di migliorare la conoscenza delle reti neurali, fornendo ottime predizioni e diventando uno strumento incredibilmente versatile e utile nella gestione imprenditoriale.

Nel prossimo futuro l'Analytic Tool verrà inglobato in un'applicazione pensata per i gestori e i nutrientori dei centri natatori e sportivi con le funzioni di *energy monitoring, targeting and reporting*.

La funzione di monitoraggio energetico sarà compilabile manualmente o automaticamente in funzione della presenza degli strumenti di contabilizzazione dell'energia; mentre il target verrà mostrato dall'applicazione stessa in automatico dopo averle fornito i dati necessari per la costruzione dei parametri.

Inoltre, dall'applicazione sarà possibile accedere ai dati riassuntivi di monitoraggio (semestrali, mensili e settimanali) e visualizzare tutto il materiale utile alla fase di *reporting*: consumo energetico reale, consumo energetico target, rapporto fra consumo effettivo e consumo atteso, *heat map* di consumo energetico, *overspend league table*...

L'azienda HF s.r.l. ha in programma ulteriori evoluzioni e miglioramenti per l'Analytic Tool; in particolare si può affermare che il lavoro continuerà con i seguenti passi fondamentali:

- miglioramento delle predizioni di consumo utilizzando nuovi centri e nuovi dati acquisiti negli anni successivi, si prevede un aggiornamento semestrale del Tool, poiché un aggiornamento *real time* sarebbe dispendioso in termini di server e potenza di calcolo;
- programmazione dell'App di *Targeting & Real Time Energy Visibility*;
- introduzione di avvisi di *Fault Detection and Diagnosis* - FDD - individuando anomalie, malfunzionamenti, assorbimenti inaspettati di energia e determinando le cause che le hanno generate;
- costituzione di una linea diretta fra il Tool e la piattaforma di manutenzione ordinaria degli impianti;
- espansione del modello proposto a differenti tipologie impiantistiche civili e industriali concentrando il lavoro sulle realtà più energivore nel parco immobiliare italiano (edifici residenziali, centri commerciali, catene alberghiere, centri direzionali, uffici, magazzini dell'*e-commerce*...).

Rispetto a quest'ultimo proposito è interessante notare che secondo gli ultimi dati della Commissione Europea circa il 50% del consumo dell'energia finale in Europa è dedicato al riscaldamento e al rinfrescamento, di cui l'80% negli edifici [25].

Concludiamo la presente tesi con una citazione di Peter Drucker, molto comune quando si parla di *energy monitoring*, ma allo stesso tempo molto significativa:

“You cannot manage what you cannot measure.”

Allegati

Appendice A

Calcolo per la stima dell'energia fornita da fonti rinnovabili

A.1 Impianto solare-termico

I sistemi solari termici sono una delle fonti rinnovabili maggiormente presente negli impianti natatori. In genere questa tipologia impiantistica si può ritrovare per far fronte al riscaldamento degli ambienti o per il riscaldamento dell'acqua sanitaria; tuttavia negli impianti natatori può anche essere usata per supplire al fabbisogno termico dell'acqua delle vasche.

I componenti principali di un impianto solare termico sono:

1. i collettori solari;
2. il serbatoio di accumulo;
3. il circuito di collegamento fra i collettori e il serbatoio;
4. la pompa di circolazione;
5. i dispositivi di controllo, sicurezza e regolazione.

per cui le prestazioni di questa tipologia di impianto dipendono dalle caratteristiche dei collettori solari, dalla geometria e dalle proprietà termo-fisiche dei serbatoi di accumulo, dalle perdite termiche nel circuito solare, dalle modalità di regolazione e dai dati climatici.

La UNI 11300 Parte 4 propone due metodi per il calcolo dell'energia termica fornita da impianti solari termici. La prima è definita per sistemi prefabbricati di dimensioni (area dei collettori) inferiori ai $6m^2$, la seconda per impianti assemblati su progetto. L'ambito di applicazione (centri natatori) richiede ovviamente uno sviluppo di questa seconda tipologia.

Il metodo di calcolo *F-Chart*, proposto da normativa, può essere impiegato solo per collettori ad acqua uguali, collegati in parallelo, omogenei per orientazione e inclinazione. Nei casi studiati è stato sempre possibile applicare questo procedimento nonostante i limiti applicativi.

Tabella A.1: Metodo di calcolo per sistemi solari termici.

F-Chart	
1	Fabbisogno applicato all'impianto solare termico e calcolo dei rapporti p_H e p_W
2	Calcolo del fattore adimensionale X
3	Calcolo del fattore adimensionale Y
4	Calcolo dell'energia solare prodotta mensilmente per riscaldamento di ambienti e/o per acqua calda sanitaria
5	Calcolo del fabbisogno di energia degli ausiliari
6	Calcolo delle perdite termiche
7	Calcolo delle perdite recuperabili

Tabella A.2: Caratteristiche dei collettori solari (Prospetto C.2 della UNI/TS 11300-4).

Tipologia di collettore	η_{I0}	a_1	a_2	IAM
	-	$W/(m^2 K)$	$W/(m^2 K^2)$	-
collettori a tubi sottovuoto con assorbitore piano	0,9	1,8	0,008	0,97
collettori a tubi sottovuoto con assorbitore circolare	0,9	1,8	0,008	1
collettori piani vetrati	0,78	3,5	0,015	0,94
collettori non vetrati	0,76	15	0	1

A.1.1 Metodo F-Chart

Riportiamo in Tabella A.1 la procedura di calcolo seguita secondo normativa e sintetizziamo in questa sezione i calcoli eseguiti per valutare l'energia termica prodotta mensilmente dal solare termico e il fabbisogno degli ausiliari. Per quanto riguarda le perdite termiche e quelle recuperabili verranno valutate complessivamente sui serbatoi utilizzati nell'impianto.

Come dati di input si utilizzano: i fabbisogni termici mensili calcolati nel capitolo dei parametri ($Q_{need,w}$ e $Q_{need,h}$), l'area di captazione netta (superficie di apertura del collettore solare, indicata con A), l'inclinazione del collettore e l'orientamento dei pannelli, il tipo di sistema (diretto o collegato ad accumulo), il volume nominale dell'accumulo (se presente), la tipologia d'impianto (preriscaldamento solare oppure con riscaldatore ausiliario e integrazione di sola emergenza/ integrazione notturna/ integrazione permanente). A queste informazioni si aggiungono:

- I coefficienti (a_1, a_2) di perdita globale, il modificatore dell'angolo di incidenza (IAM) e il rendimento del collettore a perdite nulle η_{I0} (determinati secondo la UNI EN 12975-2 o assunti sulla base della tipologia di collettore, come indicato del Prospetto C.2 della normativa, vedi Tabella A.2).

Tabella A.3: Valori del coefficiente di controllo definiti nella UNI/TS 11300-4.

Tipologia di impianto		x
impianto con riscaldatore ausiliario	integrazione di sola emergenza	0,3
	integrazione notturna	0,7
	integrazione permanente	1

- Il rendimento del circuito η_{loop} calcolato come

$$\eta_{loop} = 1 - \frac{\eta_{I0} \cdot A \cdot a_1}{U_{st}}$$

dove U_{st} è il coefficiente di scambio termico dello scambiatore di calore (W/m^2). Nel caso in cui i dati per il calcolo non siano noti, la normativa consiglia di assumere il rendimento del circuito pari a 0,8.

- La potenza nominale complessiva dei circolatori, se ignota viene calcolata con la formula empirica

$$W_{aux,st} = 50 + 5 \cdot A$$

- La capacità dell'accumulo solare calcolata come

$$V_{sol} = V_{nom}(1 - f_{aux})$$

dove f_{aux} è la frazione dell'accumulo usata per sistemi ausiliari. Nel caso in cui f_{aux} non sia nota se l'impianto è a preriscaldamento solare, allora $V_{sol} = V_{nom}$ altrimenti in presenza di riscaldatori ausiliari si calcola:

$$f_{aux} = x \frac{V_{bu}}{V_{nom}}$$

Dove:

- V_{bu} è il volume riscaldato dal sistema di back up (volume contenuto tra la sommità del serbatoio e il filo inferiore del riscaldatore: resistenza elettrica o scambiatore);
- x è il coefficiente di controllo ed assume i valori riportati in Tabella A.3.

Calcolo del fabbisogno termico soddisfatto dal sistema solare termico

Definiti i dati, si calcolano in primis p_W e p_H che stabiliscono la frazione di potenza termica dedicata al riscaldamento degli ambienti e quella dedicata al riscaldamento dell'acqua calda sanitaria (e/o di vasca nel caso di centri natatori).

$$p_W = \frac{Q_{need,w}}{Q_{need,w} + Q_{need,h}} \quad p_H = \frac{Q_{need,h}}{Q_{need,w} + Q_{need,h}}$$

Tabella A.4: Coefficienti di correlazione (Prospetto C.1 della UNI/TS 11300-4).

coefficienti di correlazione	Tipo di sistema	
	Sistema collegato ad accumulo	Sistema diretto (riscaldamento a pannelli)
a	1,029	0,863
b	-0,065	-0,147
c	-0,245	0,263
d	0,0018	0,008
e	0,0215	0,029
f	0	0,025

Di seguito si calcolano X e Y , i quali permettono di ricavare l'energia termica prodotta dall'impianto solare termico con la seguente:

$$Q_{sol} = (aY + bX + cY^2 + dX^2 + eY^3 + fX^3) \cdot Q_{need}$$

Dove:

- Q_{need} è il fabbisogno mensile applicato all'impianto solare termico ($[kWh]$);
- X e Y sono fattori adimensionali (definiti nei prossimi sotto paragrafi);
- a, b, c, d, e, f sono coefficienti di correlazione che dipendono dalle caratteristiche del serbatoio di accumulo; la normativa fornisce alcuni valori (vedi Tabella A.4) dividendo gli impianti in cui il sottosistema di generazione solare è collegato a un serbatoio di accumulo da quelli in cui questo è direttamente collegato all'impianto di riscaldamento.

Calcolo di X Il calcolo del fattore X differisce leggermente fra la potenza termica fornita per il riscaldamento e quella fornita per l'acqua calda sanitaria. Nel caso di sistemi coniugati, i fattori p_H e p_W permettono di separare i due contributi. Nel caso in cui solo uno sia presente chiaramente si possono utilizzare le medesime relazioni dato che uno dei due fattori (p_H o p_W) risulta nullo. Riportiamo di seguito le espressioni:

$$X_H = A \cdot p_H \cdot U_{loop} \cdot \eta_{loop} \cdot \Delta T \cdot f_{st} \cdot t_m / (Q_{need,h} \cdot 10^3)$$

$$X_W = A \cdot p_W \cdot U_{loop} \cdot \eta_{loop} \cdot \Delta T \cdot f_{st} \cdot t_m / (Q_{need,w} \cdot 10^3)$$

Dove:

- A è la superficie di apertura del collettore solare
- U_{loop} è il coefficiente di perdita del circuito solare $W/(m^2K)$, calcolato come

$$U_{loop} = a_1 + 40a_2 + \frac{5 + 0,5A}{A}$$

;

- η_{loop} è il rendimento del circuito solare
- ΔT è la differenza di temperatura di riferimento $\Delta T = T_{rif} - T_{est}$ dove
 - T_{est} è la temperatura media dell'ambiente esterno nel periodo considerato [deg C] (vedi sezione A.1.2);
 - $T_{rif} = 100 \text{ deg C}$ per sistemi solari termici per il riscaldamento;
 - $T_{rif} = 11,6 + 1,18T_w + 3,86T_{cw} - 1,32T_{ext}$ per sistemi solari termici per l'acqua calda sanitaria, dove
 - * T_w è la temperatura di utilizzo dell'acqua e
 - * T_{cw} è la temperatura di ingresso dell'acqua nell'accumulo (in genere 15 deg C)
- t_m è la durata del periodo di calcolo [h]
- $Q_{need,h}$ e $Q_{need,w}$ sono i fabbisogni mensili rispettivamente per il riscaldamento e per l'acqua calda sanitaria [kWh];

Calcolo di Y Anche in questo caso si separano i contributi di energia termica destinata al riscaldamento e all'acqua sanitaria, per cui le espressioni del fattore Y sono le seguenti:

$$Y_H = A \cdot p_H \cdot IAM \cdot \eta_{I0} \cdot \eta_{loop} \cdot I_m \cdot t_m / (Q_{need,h} \cdot 10^3)$$

$$Y_W = A \cdot p_W \cdot IAM \cdot \eta_{I0} \cdot \eta_{loop} \cdot I_m \cdot t_m / (Q_{need,w} \cdot 10^3)$$

Dove:

- A è la superficie di apertura del collettore solare [m^2];
- IAM è il modificatore dell'angolo di incidenza;
- η_0 è il rendimento del collettore a perdite nulle;
- η_{loop} è il rendimento del circuito solare;
- I_m irradianza media sul piano del collettore [W/m^2] (vedi sezione);
- t_m è la durata in ore del mese considerato [h];
- $Q_{need,h}$ e $Q_{need,w}$ sono i fabbisogni mensili rispettivamente per il riscaldamento e per l'acqua calda sanitaria [kWh].

Calcolo del fabbisogno elettrico degli ausiliari del sistema solare termico.

Il fabbisogno elettrico degli ausiliari viene ricavato moltiplicando la potenza nominale complessiva dei circolatori per le ore di funzionamento.

$$Q_{sol,aux} = P_{aux,nom} \cdot t_{aux}$$

Nel caso in cui non siano note le potenze nominali degli ausiliari, la normativa fornisce una formula empirica per stimarne il valore. Per cui risulta complessivamente la seguente.

$$P_{aux,nom} = (50 + 5 \cdot A) \quad [W]$$

A.1.2 Calcolo delle temperature medie esterne mensili

Per quanto riguarda le temperature esterne in questo lavoro si è deciso di far riferimento alle temperature riportate nella UNI-TR 11328-1: 2009 corrette tenendo conto della differenza di dislivello fra la stazione di rilevazione dei dati climatici dove sono stati registrati i dati e il centro polisportivo in questione. Per ciascun centro e mese per mese sono state calcolate le temperature esterne come segue:

$$T_{ext} = T_{ext,rif} - (z - z_{rif}) \cdot d$$

Dove:

- $T_{ext,rif}$ è la temperatura esterna di riferimento;
- z è la quota del centro polisportivo (il dato è stato ricavato da Google Earth);
- z_{rif} è la quota della stazione di rilevazione più vicina al centro;
- d è il fattore correttivo (coefficiente che caratterizza il gradiente verticale di temperatura nella località; anche questo è fornito da normativa).

A.1.3 Calcolo dell'irradianza giornaliera media mensile

Nella UNI 11300-4 per il calcolo riferito ai sistemi solari termici e fotovoltaici è suggerita la determinazione dell'irradianza media mensile secondo quanto indicato nella UNI-TR 11328-1: 2009 che tuttavia è stata recentemente sostituita dalla UNI 10349-1: 2016. La procedura riportata in questa sezione si riferisce all'ultimo aggiornamento compreso di errata corrige (EC 1-2017 UNI 10349-1: 2016). Riportiamo di seguito i passaggi seguiti per calcolare l'irradiazione media mensile per una superficie inclinata di un angolo β rispetto all'orizzontale e orientata con un angolo γ (azimut³³), vedi Figura A.1.

Innanzitutto, la normativa definisce l'irradiazione media mensile ($\overline{H}$) in funzione dell'irradiazione media mensile su un piano orizzontale ($\overline{H}_h$) che a sua volta può essere ricondotta al valore di irradiazione solare orizzontale extra-atmosferica tramite un coefficiente $\overline{K}_t$ definito proprio come il rapporto fra queste due grandezze.

$$\begin{cases} \overline{H} = \overline{R} \cdot \overline{H}_h \\ \overline{K}_t = \frac{\overline{H}_h}{\overline{H}_{h0}} \end{cases}$$

³³Angolo compreso fra il Sud e la direzione verso cui è rivolta la superficie: γ è pari a 0 deg quando questa è rivolta a sud, 90 deg quando è rivolta a ovest, 180 deg quando è rivolta a nord e 270 deg quando è rivolta a Est.

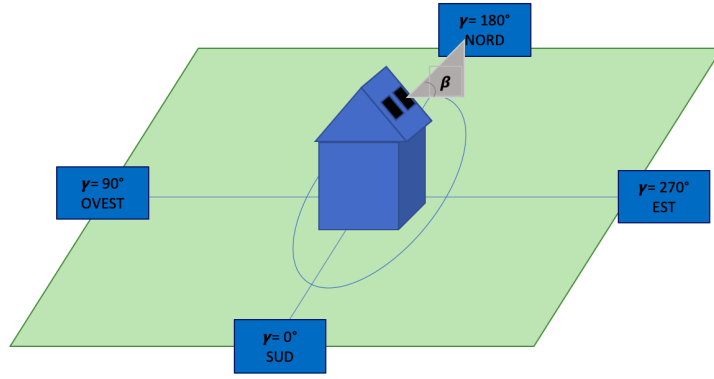


Figura A.1: Superficie inclinata di un angolo β rispetto all'orizzontale e orientata con un angolo γ .

Da cui $\bar{H} = \bar{R} \cdot \bar{K}_t \cdot \bar{H}_{h0}$

La normativa riporta H_{h0} nel prospetto C.1 e calcola $\bar{H}_h$ sommando l'irradiazione solare diffusa media su piano orizzontale ($\bar{H}_{dh}$) e quella diretta su piano orizzontale ($\bar{H}_{bh}$) registrate dalle stazioni di rilevazione dei dati climatici italiane (prospetto 6 della UNI 10349-1).

Il coefficiente R è calcolato attraverso una formula approssimata che va a sommare il soleggiamento diretto, il soleggiamento diffuso e quello riflesso:

$$R = \left(1 - \frac{\bar{H}_{dh}}{\bar{H}_h}\right) \cdot \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_{dh}}{\bar{H}_h} \cdot \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + \rho \cdot \frac{(1 - \cos \beta)}{2}$$

Dove:

- ρ è il valore di riflettanza delle superfici circostanti (alcuni valori indicativi sono riportati nella UNI 10349-1, prospetto C.1, vedi Tabella A.5) e
- $\bar{R}_b$ è il valore medio mensile del rapporto fra l'irradiazione diretta su una superficie (comunque inclinata e orientata) e l'irradiazione diretta su un piano orizzontale.

$\bar{R}_b$ si calcola in funzione di tre parametri puramente geometrici (T , U e V) e degli angoli orari dell'apparire e scomparire del sole per la superficie considerata: ω' , ω'' . Questi sono determinati, a loro volta, in funzione dei tre parametri geometrici (T , U , V) e in funzione di ω_s . I parametri geometrici sono calcolati come segue:

$$\begin{cases} T = \sin \bar{\delta} \cdot (\sin \phi \cdot \cos \beta - \cos \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma) \\ U = \cos \bar{\delta} \cdot (\cos \phi \cdot \cos \beta - \sin \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma) \\ V = \cos \bar{\delta} \cdot (\sin \beta \sin \gamma) \end{cases}$$

Dove:

- ϕ è la latitudine a cui si trova la superficie considerata;
- β è l'inclinazione della superficie rispetto all'orizzontale;
- γ è l'azimut.

Tabella A.5: Valori di riflettanza ρ per diverse superfici.

Tipo di superficie	ρ
Neve	0,75
Superfici acquose	0,07
Suolo (creta, marne)	0,14
Strade sterrate	0,04
Bosco di conifere	0,07
Bosco in autunno/ campi con raccolti e piante	0,26
Asfalto invecchiato	0,1
Calcestruzzo invecchiato	0,22
Foglie morte	0,3
Erba secca	0,2
Erba verde	0,26
Tetti o terrazzi in bitume	0,13
Pietrisco	0,2
Superfici scure di edifici	0,27
Superfici chiare di edifici	0,6

Gli angoli orari dell'apparire e scomparire del sole per la superficie considerata (ω', ω'') vengono assegnati seguendo il diagramma riportato in Figura A.2, dove:

- $\pm\omega_s$ è l'angolo orario del sorgere e del tramonto astronomico;
- ω_1 e ω_2) possono essere definiti dopo aver risolto l'equazione seguente.

$$\tan \frac{\omega}{2} = \frac{-V \pm \sqrt{U^2 + V^2 - T^2}}{T - U}$$

Chiamando le due soluzioni $\bar{\omega}_a$ e $\bar{\omega}_b$, il valore della $\bar{\omega}$ che soddisfa $V \cos \bar{\omega} > U \sin \bar{\omega}$ è assegnato a ω_1 , angolo orario dell'apparire del sole (alba); mentre il valore dell'altra $\bar{\omega}$ verrà assegnata all'angolo orario dello scomparire del sole (tramonto), ovvero a ω_2 .

Se $U^2 + V^2 - T^2 > 0$ si ottengono due soluzioni reali e si calcola $\bar{R}_b$ come segue.

$$\bar{R}_b = \frac{T \cdot \frac{\pi}{180} (\omega'' - \omega') + U \cdot (\sin \omega'' - \sin \omega') - V \cdot (\cos \omega'' - \cos \omega')}{2 \cdot (T_h \cdot \frac{\pi}{180} \omega_s + U_h \cdot \sin \omega_s)}$$

Altrimenti, nel caso in cui risulti $U^2 + V^2 - T^2 < 0$, si ottengono quattro soluzioni di cui 2 numeri complessi; in questo caso $\bar{R}_b$ si determina con la seguente espressione.

$$\bar{R}_b = \frac{T \cdot \frac{\pi}{180} (\omega''_1 - \omega'_1) + U \cdot (\sin \omega''_1 - \sin \omega'_1) - V \cdot (\cos \omega''_1 - \cos \omega'_1)}{2 \cdot (T_h \cdot \frac{\pi}{180} \omega_s + U_h \cdot \sin \omega_s)} + \quad (\text{A.1})$$

$$+ \frac{T \cdot \frac{\pi}{180} (\omega''_2 - \omega'_2) + U \cdot (\sin \omega''_2 - \sin \omega'_2) - V \cdot (\cos \omega''_2 - \cos \omega'_2)}{2 \cdot (T_h \cdot \frac{\pi}{180} \omega_s + U_h \cdot \sin \omega_s)} \quad (\text{A.2})$$

Tabella A.6: Fattore di efficienza dell'impianto fotovoltaico in funzione del grado di ventilazione (Prospetto 10 UNI/TS 11300-4).

Grado di ventilazione dei moduli fotovoltaici	f_{pv}
	-
moduli non ventilati	0,7
moduli moderatamente ventilati	0,75
moduli molto ventilati o con ventilazione forzata	0,8

A.2 Impianto fotovoltaico

Il calcolo dell'energia prodotta mensilmente da un impianto fotovoltaico è preso da norma UNI/TS 11300:2016 e prevede una stima dell'energia elettrica prodotta in funzione della radiazione solare media mensile, dalla potenza di picco installata e dal fattore di efficienza dell'impianto.

$$E_{el,pv} = E_{pv} \cdot P_{pv} \cdot f_{fv} / I_{ref}$$

Dove:

- E_{pv} è l'irradiazione media mensile incidente sull'impianto fotovoltaico [kWh/m^2];
- P_{pv} è la potenza di picco per l'irradianza di riferimento [kW];
- $I_{ref} = 1$ [kW/m^2] è l'irradianza solare di riferimento;
- f_{fv} è il fattore di efficienza dell'impianto che tiene conto della conversione della corrente da continua ad alternata, della temperatura operativa reale e dell'integrazione nell'edificio dei moduli fotovoltaici. Il valore di questo parametro è assegnato in base al grado di ventilazione dei moduli fotovoltaici (vedi Tabella A.6).

Nel caso in cui la potenza di picco dell'impianto fotovoltaico non fosse nota la normativa permette comunque di fornirne una stima conoscendo la superficie dei pannelli fotovoltaici A_{pv} e la tipologia dei moduli (vedi Tabella A.7).

$$P_{pv} = A_{pv} \cdot k_{pv}$$

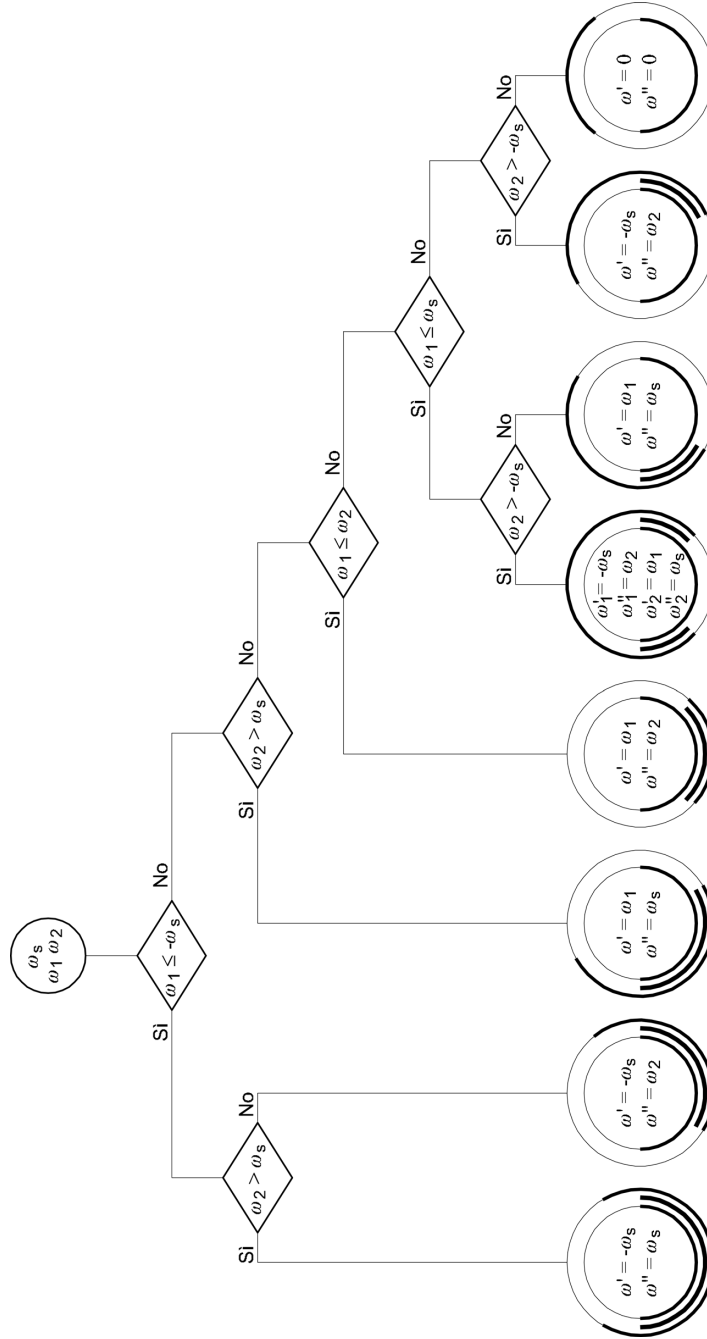


Figura A.2: Schema di calcolo.

Tabella A.7: Coefficiente di potenza in funzione della tipologia di modulo fotovoltaico.

Tipo di modulo fotovoltaico	K_{pv}
	kW/m^2
Silicio mono cristallino	0,150
Silicio multi cristallino	0,130
Film sottile di silicio amorfo	0,060
Altri strati di film sottile	0,035
Film sottile di diseleniuro di indio-rame-gallio (CIGS)	0,105
Film sottile di telluro di cadmio (CdTe)	0,095

Appendice B

Valori di trasmittanza termica

Come indicato nel Capitolo 5, per molte strutture natatorie è risultato necessario fornire una stima delle trasmittanze termiche delle superfici possibilmente tenendo conto di informazioni note quali: materiali di costruzione, spessore dei muri perimetrali esterni, anno di costruzione dell'immobile, storia dell'immobile (eventuali ristrutturazioni) e zona climatica.

Per anni di costruzione compresi fra il 1976 e il 1991 si è fatto riferimento ai valori di trasmittanza consigliati dalla UNI 11300-2 Tabella B.4, in funzione dello spessore delle murature ricavate da planimetrie e prospetti.

Fra il 2006 e il 1991 si sono utilizzati i valori di trasmittanza dei prospetti A.1, A.2, A.3, A.4, A.5, A.6 della UNI 11300-2 (Tabella B.5, Tabella B.6, Tabella B.7, Tabella B.8) che in funzione dei materiali da costruzione definiscono la trasmittanza. Se anche i materiali da costruzione non sono noti, allora si usano ancora i valori del prospetto A.7 (Tabella B.4).

Per costruzioni comprese fra il 2006 e il 2021 si fa riferimento all'evoluzione di normative vigenti distinguendo edifici nuovi e riqualificati (rispettivamente in Tabella B.1 Tabella B.2).

Tabella B.1: Trasmittanze minime richieste dalle normative per edifici di nuova costruzione ($W/(m^2K)$).

Superfici verticali opache					
zona climatica	Dal 1° gennaio 2006	Dal 1° gennaio 2008	Dal 1° gennaio 2010	Dal 1° luglio 2015	Dal 1° gennaio 2019/2021
A	0,85	0,72	0,62	0,45	0,43
B	0,64	0,54	0,48	0,45	0,43
C	0,57	0,46	0,4	0,38	0,34
D	0,5	0,4	0,36	0,34	0,29
E	0,46	0,37	0,34	0,3	0,26
F	0,44	0,35	0,33	0,28	0,24
Copertura					
zona climatica	Dal 1° gennaio 2006	Dal 1° gennaio 2008	Dal 1° gennaio 2010	Dal 1° luglio 2015	Dal 1° gennaio 2019/2021
A	0,8	0,42	0,38	0,38	0,35
B	0,6	0,42	0,38	0,38	0,35
C	0,55	0,42	0,38	0,36	0,33
D	0,46	0,35	0,32	0,3	0,26
E	0,43	0,32	0,3	0,25	0,22
F	0,41	0,31	0,29	0,23	0,2
Pavimentazioni					
zona climatica	Dal 1° gennaio 2006	Dal 1° gennaio 2008	Dal 1° gennaio 2010	Dal 1° luglio 2015	Dal 1° gennaio 2019/2021
A	0,8	0,74	0,65	0,46	0,44
B	0,6	0,55	0,49	0,46	0,44
C	0,55	0,49	0,42	0,4	0,38
D	0,46	0,41	0,36	0,32	0,29
E	0,43	0,38	0,33	0,3	0,26
F	0,41	0,36	0,32	0,28	0,24
Chiusure trasparenti comprese di infissi					
zona climatica	Dal 1° gennaio 2006	Dal 1° gennaio 2008	Dal 1° gennaio 2010	Dal 1° luglio 2015	Dal 1° gennaio 2019/2021
A	5,5	5	4,6	3,2	3
B	4	3,6	3	3,2	3
C	3,3	3	2,6	2,4	2,2
D	3,1	2,8	2,4	2	1,8
E	2,8	2,4	2,2	1,8	1,4
F	2,4	2,2	2	1,5	1,1

Tabella B.2: Trasmittanze minime richieste dalle normative per edifici riqualificati ($W/(m^2K)$).

Superfici verticali opache		Coperture	
Dal 1° luglio 2015	Dal 1° gennaio 2021	Dal 1° luglio 2015	Dal 1° gennaio 2021
0,45	0,4	0,34	0,32
0,45	0,4	0,34	0,32
0,4	0,36	0,34	0,32
0,36	0,32	0,28	0,26
0,3	0,28	0,26	0,24
0,28	0,26	0,24	0,22
Pavimentazioni		Chiusure trasparenti comprese di infissi	
Dal 1° luglio 2015	Dal 1° gennaio 2021	Dal 1° luglio 2015	Dal 1° gennaio 2021
0,48	0,42	3,2	3
0,48	0,42	3,2	3
0,42	0,38	2,4	2
0,36	0,32	2,1	1,8
0,31	0,29	1,9	1,4
0,3	0,28	1,7	1

Tabella B.3: Trasmittanza termica ($W/(m^2K)$) suggerita dalla UNI 11300-1 per costruzioni precedenti alla Legge 10 coibentate, prospetto A.7 della UNI.

Spessore	Zona climatica			
	C o D		E o F	
m	Anno di costruzione			
	1976-1985	1986-1991	1976-1985	1986-1991
Chiusure verticali opache				
0,25	1,2	0,81	0,81	0,61
0,30	1,15	0,79	0,79	0,6
0,35	1,1	0,76	0,76	0,59
0,40	1,1	0,76	0,76	0,59
Coperture piane				
0,20	1,85	1,06	1,06	0,75
0,25	1,7	1,01	1,01	0,72
0,30	1,5	0,93	0,93	0,68
0,35	1,35	0,88	0,88	0,65
Coperture a falde				
0,20	2,2	1,17	1,17	0,8
0,25	2,1	1,14	1,14	0,78
0,30	1,8	1,05	1,05	0,74
0,35	1,6	0,97	0,97	0,7
Solai sotto ambienti non climatizzati				
0,20	1,7	1,01	1,01	0,72
0,25	1,6	0,97	0,97	0,7
0,30	1,4	0,9	0,9	0,66
0,35	1,3	0,86	0,86	0,64

Tabella B.4: Trasmittanza termica ($W/(m^2K)$) suggerita dalla UNI 11300-1 per costruzioni precedenti alla Legge 10 coibentate, prospetto A.7 della UNI.

Spessore	Zona climatica			
	C o D		E o F	
m	Anno di costruzione			
	1976-1985	1986-1991	1976-1985	1986-1991
Basamenti su vespaio o cantina				
0,20	1,45	1,06	1,06	0,84
0,25	1,35	1	1	0,81
0,30	1,25	0,95	0,95	0,77
0,35	1,15	0,9	0,9	0,73
Basamenti su pilotis				
0,20	1,75	1,22	1,22	0,93
0,25	1,65	1,17	1,17	0,9
0,30	1,5	1,1	1,1	0,86
0,35	1,3	0,98	0,98	0,79
Basamento su terreno				
0,20	2	1,33	1,33	1
0,25	1,8	1,24	1,24	0,95
0,30	1,65	1,17	1,17	0,9
0,35	1,5	1,1	1,1	0,86

Tabella B.5: Trasmissione termica ($W/(m^2K)$) delle chiusure verticali opache suggerite dalla UNI 11300-1, prospetto A.1 della UNI.

Spessore m	Muratura di pietrame intonacata	Muratura di mattoni pieni intonacati sulle due facce	Muratura in mattoni semipieni o tufo	Pannello prefabbricato in calcestruzzo non isolato	Parete a cassa vuota con mattoni forati
0,15	-	2,59	2,19	3,59	-
0,20	-	2,28	1,96	3,28	-
0,25	-	2,01	1,76	3,02	1,20
0,30	2,99	1,77	1,57	2,80	1,15
0,35	2,76	1,56	1,41	2,61	1,10
0,40	2,57	1,39	1,26	2,44	1,10
0,45	2,40	1,25	1,14	-	1,10
0,50	2,25	1,14	1,04	-	1,10
0,55	2,11	1,07	0,96	-	-
0,60	2,00	1,04	0,90	-	-

Tabella B.6: Trasmittanza termica ($W/(m^2K)$) delle coperture piane e a falde suggerite dalla UNI 11300-1, prospetto A.4 della UNI.

Spessore m	Soletta piana in latero-cemento	Tetto a falda in laterizio	Tetto in legno
0,20	1,85	2,20	1,80
0,25	1,70	2,10	
0,30	1,50	1,80	
0,35	1,35	1,60	

Tabella B.7: Trasmittanza termica ($W/(m^2K)$) dei solai sotto ambienti non climatizzati suggerite dalla UNI 11300-1, prospetto A.5 della UNI.

Spessore m	Soletta in latero-cemento	Solaio prefabbricato in calcestruzzo tipo Predalles
0,20	1,70	2,15
0,25	1,60	2,00
0,30	1,40	1,85
0,35	1,30	1,75

Tabella B.8: Trasmittanza termica ($W/(m^2K)$) dei solai a terra, su spazi aperti o su ambienti non climatizzati suggerite dalla UNI 11300-1, prospetto A.6 della UNI.

Spessore m	Soletta in latero-cemento su cantina	Soletta in latero-cemento su vespaio o pilotis	Basamento in calcestruzzo su terreno
0,20	1,45	1,75	2,00
0,25	1,35	1,65	1,80
0,30	1,25	1,50	1,65
0,35	1,15	1,30	1,50

Bibliografia

- [1] *Accordo tra il Ministro della salute, le regioni e le province autonome di Trento e di Bolzano sugli aspetti igienico-sanitari per la costruzione, la manutenzione e la vigilanza delle piscine a uso natatorio.* Accordo Stato-Regioni. Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 51 del 3 marzo 2003.
- [2] *Aggiornamenti agli allegati F e G del decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412, recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici, ai fini del contenimento dei consumi di energia.* D.M. 17 marzo 2003. (Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 86 del 12-04-2003 - Suppl. Ordinario n. 60).
- [3] *Aggiornamento dei coefficienti di dispersione termica degli edifici.* Decreto 30 luglio 1986. (Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 244 del 20-10-1986).
- [4] *Aggiornamento della disciplina per l'incentivazione di interventi di piccole dimensioni per l'incremento dell'efficienza energetica e per la produzione di energia termica da fonti rinnovabili.* (Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 51 del 02-03-2016).
- [5] *Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici.* Decreto 26 giugno 2015, n. 162. (Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 162 del 15-07-2015 - Suppl. Ordinario n. 39).
- [6] *Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE.* Decreto Legislativo 3 marzo 2011, n. 28. (Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 71 del 28-03-2011 - Suppl. Ordinario n. 81).
- [7] *Attuazione della direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE.* Decreto Legislativo. 4 luglio 2014, n. 102. (Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 165 del 18-07-2014).
- [8] *Attuazione della Direttiva 2020/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia.* Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192. (Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 222 del 23-09-2005 - Suppl. Ordinario n. 158).

- [9] *Determinazione delle zone climatiche e dei valori minimi e massimi dei relativi coefficienti volumetrici globali di dispersione termica.* Decreto Ministeriale 10 marzo 1977. (Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 36 del 06-02-1978 - Suppl. Ordinario).
- [10] *Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia.* Decreto Legislativo 29 dicembre 2006, n. 311. (Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 26 del 01-02-2007 - Suppl. Ordinario n. 26).
- [11] *Norma CONI.*
- [12] *Norme Federazione Italiana Nuoto.* FINA.
- [13] *Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici.* Legge 30 aprile 1976, n. 373. (Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 148 del 07-06-1976).
- [14] *Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici.* Decreto del Presidente della Repubblica 28 giugno 1977, n. 1052. (Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 36 del 06-02-1978 - Suppl. Ordinario).
- [15] *Norme per l'attuazione del Piano Energetico Nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia.* Legge 9 gennaio 1991, n. 10. (Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 13 del 16-01-1991).
- [16] *Norme sul contenimento dei consumi energetici, lo sviluppo delle fonti rinnovabili di energia e l'esercizio di centrali elettriche alimentate con combustibili diversi dagli idrocarburi.* Legge 29 maggio 1982, n. 308. (Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 154 del 07-06-1982).
- [17] *Regolamento per l'attuazione della direttiva 92/42/CEE concernente i requisiti di rendimento delle nuove caldaie ad acqua calda, alimentate con combustibili liquidi o gassosi.* D.P.R. 15 novembre 1996, n. 660. (Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 302 del 27-12-19 - Suppl. Ordinario n. 231).
- [18] *Regolamento recante definizione dei criteri generali in materia di esercizio, conduzione, controllo, manutenzione e ispezione degli impianti termici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici e per la preparazione dell'acqua calda per usi igienici sanitari, a norma dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e c), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192.* Decreto del presidente della Repubblica. 16 aprile 2013, n. 74. (Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 149 del 27-06-2013).
- [19] *Regolamento recante modifiche al decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412, in materia di progettazione, installazione, esercizio e manutenzione degli impianti termici degli edifici, ai fini del contenimento dei consumi di energia.* Decreto del Presidente della repubblica 21 dicembre 1999, n. 551. (Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 81 del 06-04-2000).

- [20] *Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'articolo 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10.* Decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412. (Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 242 del 14-10-1993 - Suppl. Ordinario n. 96).
- [21] *Impianti aeraulici ai fini di benessere. Generalità , classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura.* UNI 10399. Ente Italiano di Normazione, 1995.
- [22] State of the art in building modelling and energy performances prediction: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier*, 23:272 – 288, 2013.
- [23] *Prestazioni energetiche degli edifici.* UNI/TS 11300. Ente Italiano di Normazione, 2014.
- [24] *Piscine -Requisiti degli impianti di circolazione, filtrazione, disinfezione e trattamento chimico dell'acqua di piscina.* UNI 10637. Ente Italiano di Normazione, 2016.
- [25] *Risparmio ed efficienza energetica.* 1104554. Camera dei deputati, XVIII Legislatura, 2020.
- [26] M. Dash and H. Liu. Feature selection for clustering.
- [27] C. Deba, F. Zhangb, J. Yanga, S. E. Lee, and K. W. Shaha. A review on time series forecasting techniques for building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74:902–924, 2017.
- [28] O. M. della Sanità. *Guidelines for safe recreational waters: Volume 2, Swimming pools, spas and similar recreational-water environments.* 2005.
- [29] H. Ding, G. Trajcevski, P. Scheuermann, X. Wang, and E. Keogh. Querying and mining of time series data: Experimental comparison of representations and distance measures. *PVLDB*, 1(2):1542–1552, 2008.
- [30] S. Fan and L. Chen. Short-term load forecasting based on an adaptive hybrid method. *IEEE Trans Power Syst*, 21(1):392–401, 2006.
- [31] O. Gold and M. Sharir. Dynamic time warping and geometric edit distance: Breaking the quadratic barrier. *ACM Transactions on Algorithms*, 14(4), 2018.
- [32] M. Jordaan and R. Narayanan. A numerical study on various heating options applied to swimming pool for energy saving. *Energy Procedia*, 160:131–138, 2019.
- [33] E. Keogh and C. A. Ratanamahatana. Exact indexing of dynamic time warping. *Knowledge and Information Systems*, 7(3):358–386, 2005.
- [34] J. Massana, C. Pous, L. Burgas, J. Melendez, and J. Colomer. Short-term load forecasting in a non-residential building contrasting models and attributes. *Energy and Buildings*, 92:322–330, 2015.

- [35] J. Paparrizos and L. Gravano. k-shape: Efficient and accurate clustering of time series. *SIGMOND*, 15, 2015.
- [36] S. Saitta, B. Raphael, and I. F. Smith. A bounded index for cluster validity. *MLDM 2007*, LNAI 4571:174–187, 2007.
- [37] J. L. Suarez, S. Garcia, and F. Herrera. A tutorial on distance metric learning: Mathematical foundations, algorithms and software. 2018.
- [38] X. Wang, A. Mueen, and e. a. Hui Ding. Experimental comparison of representation methods and distance measures for time series data. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 26(2):275–309, 2013.
- [39] J. Yang, C. Ning, C. Deb, F. Zhang, D. Cheong, S. E. Lee, C. Sekhara, and K. W. Tham. K-shape clustering algorithm for building energy usage patterns analysis and forecasting model accuracy improvement. *Energy and Buildings*, 146:27–37, 2017.
- [40] H. Zhao and F. Magoules. A review on the prediction of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6):3586–3592, 2012.
- [41] F. Zuccari, A. Santiangeli, and F. Orecchini. Energy analysis of swimming pools for sports activities: cost effective solutions fo efficiency improvement. *Energy Procedia*, 126:123–130, 2017.

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare innanzitutto l'Ing. Raffaele Tardi che mi ha permesso di coronare gli studi universitari con un'esperienza davvero ricca e ambiziosa. Insieme a lui vorrei ringraziare anche l'Ing. Carmen Spinelli per avermi seguito e indirizzato con costanza. La ringrazio per il supporto e l'impegno che ha dedicato a questo progetto, ma soprattutto per la passione e la dedizione che è stata capace di imprimere.

Un ringraziamento speciale va al relatore di questa tesi, il prof.re Maurizio Schenone, che si è sempre reso disponibile per la riuscita del lavoro. Lo ringrazio per avermi guidata nella scelta della tesi e lo ringrazio per la sua immancabile puntualità e precisione.

Vorrei ringraziare anche il team di Masvis srl che ha affiancato l'intero progetto e le ragazze e i ragazzi (stagisti, tesisti, personale...) di HF che mi hanno accolto con loro nell'azienda fino a quando è stato possibile causa Covid.

Ringrazio Tommaso, il mio "compagno di banco", insieme al quale ho condiviso la mia prima esperienza in un contesto lavorativo; lo ringrazio per la compagnia, gli scambi di idee e la disponibilità. Ringrazio Chiara e Nicolas per le piccole consulenze di tutti i giorni, per avermi guidato in questo ambiente per me nuovo. Ringrazio Christian, Angela, Yoana, Nicolò, Luca P., Edgardo, Kamdin, Martina e Mirko per l'immancabile simpatia e le vivaci pause pranzo; ringrazio Ivano e Lelenia per la pazienza e il supporto che mi hanno fornito nella fase di raccolta dei dati; ringrazio Pietro, Luca C. e Stefania per la loro gentilezza, comprensione e disponibilità. Un grazie a tutti per avermi inclusa in questo gruppo variegato che, nonostante le difficoltà, le incomprensioni e le divergenze di idee, ho sempre visto cooperare e risolvere i problemi insieme con il lavoro di squadra.

Non voglio mancare di ringraziare il Collegio Nuovo fondazione Sandra ed Enea Mattei insieme alla sua rettrice, Paola Bernardi, che mi ha accolto sin dal primo anno universitario. Lo ringrazio per la meravigliosa esperienza e per la moltitudine di amicizie che vi ho trovato. In particolare, vorrei ringraziare alcune novine che nonostante gli anni e la distanza continuano a essere presenti. Ringrazio Cristina, Lara, Arianna, Irene, Barbara, Elena per avermi fatto uscire dal guscio e per avermi motivata a scendere in biblioteca ad ogni ora del giorno e della notte. Vi ringrazio per aver cercato con me la voglia di studiare dentro la lavatrice del collegio, vi ringrazio per avermi fatto ubriacare ad ogni festa, vi ringrazio

di essere state le mie complici incondizionatamente (cartelli stradali, orsetti russi abusivi, scheletri...).

Vi ringrazio per ogni risata, per ogni momento di sconforto o disperazione, per ogni volta che mi avete detto ce la puoi fare.

Infine, vorrei aggiungere un ringraziamento alla famiglia della quale sento sempre la mancanza. Ringrazio i miei genitori - Carlo e Stefania - e i nonni - Mario, Michelina, Evi e Benedetto - per avermi fatto crescere, per avermi insegnato a pensare e ad amare. Ringrazio le mie sorelle - Gaia e Matilde - e mio fratello - Matteo - per le spinte (figurate e meno) che mi hanno fatto arrivare qui oggi con le ossa ancora intere. Vorrei ringraziare in particolare Gaia per la responsabilità che ha sempre avuto come sorella maggiore; Matilde per essere stata la mia piccola alleata e sostenitrice nelle battaglie; Matteo per essere sempre stato quello buono, paritario e giusto (avevi solo qualche anno eppure già ti sentivi escluso perché nella lingua italiana non potevi essere il nostro sorello o noi le tue fratelle). Vorrei includere in questo ringraziamento alla famiglia anche Silvia e Alessandro che in cuor mio da qualche tempo ne fanno parte. Ringrazio Silvia per tutti i momenti fantastici condivisi durante e dopo la nostra convivenza in Casa Macca (recentemente trasformata in Reggia Macca), la ringrazio per essermi stata accanto in ogni momento, per avermi fatto sentire compresa. Ringrazio Alessandro per essere sempre stato presente, lo ringrazio perché nonostante tutte le difficoltà e la distanza ha creduto in me e in quello che desideravo raggiungere, lo ringrazio per i consigli, per l'appoggio, per l'amore e la fiducia.