

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE
IN
INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

TESI DI LAUREA

**ANALISI DI INTERVENTI DI EFFICIENTAMENTO ENERGETICO PER PISCINE AD
USO SPORTIVO MEDIANTE MODELLI DI SIMULAZIONE DINAMICA:
IL CASO DEL C.U.S. NAPOLI**

RELATORI

CH.MO PROF. ING FRANCESCO CALISE

CH.MO PROF. ING LAURA VANOLI

CANDIDATI

MARCO CORTESE M67/218

FABIO FIORILLO M67/229

CORRELATORI

ING. RAFAL DAMIAN FIGAJ

ING. MARIA VICIDOMINI

ANNO 2015-2016

Introduzione

In Europa il mondo dello sport comprende oltre 1,5 milioni di immobili e il 10% circa del consumo energetico associato al settore delle costruzioni, il quale a sua volta è responsabile del consumo di circa il 40% dell'energia impiegata nell'intero continente. Tali consumi risultano in forte espansione e sono destinati ad aumentare notevolmente, pertanto, l'incremento dell'efficienza energetica e l'utilizzo di energia da fonti rinnovabili costituiscono misure necessarie per ridurre la dipendenza energetica dell'Europa e le emissioni di gas clima alteranti. Per rispettare gli ambiziosi obiettivi di risparmio energetico che l'Europa si è posta per il 2020 è perciò fondamentale non trascurare il settore degli impianti sportivi. Queste strutture per loro natura fortemente “energivore” per dimensione, tipologia e caratteristiche d'uso. La situazione è ulteriormente aggravata dalla vetustà di molti di essi, realizzati con criteri costruttivi ed impiantistici non improntati al concetto di risparmio energetico. In tale contesto, le piscine coperte rappresentano uno degli usi altamente energivori del settore sportivo. Esse sono caratterizzate da ingenti costi di gestione, associati principalmente al mantenimento dell'elevata temperatura di vasca e dell'ambiente circostante ed al controllo dell'umidità, in quanto vi è una notevole aliquota di evaporazione dell'acqua dalle vasche, dai corpi dei bagnanti e dalle docce. Non da meno bisogna considerare la complessità degli impianti di trattamento dell'aria, dell'acqua e la molteplicità di vettori energetici coinvolti per garantire il corretto funzionamento dell'impianto ed il benessere degli utenti. Quest'ultimo aspetto è cruciale per poter bilanciare il consumo di energia mantenendo le condizioni ideali allo svolgimento dell'attività sportiva. Valutare le condizioni di comfort termoigrometrico è una delle priorità per una gestione virtuosa di tali impianti. Occorre, infatti, far fronte a condizioni molto specifiche quali sono i grandi spazi da climatizzare, il benessere dei bagnanti dentro e fuori vasca, la qualità dell'aria e dell'acqua, solo per citarne alcune. Il controllo ottimale non può prescindere da questi aspetti.

Obiettivo della tesi

Il presente lavoro di tesi sperimentale ha riguardato l'analisi di interventi di upgrading energetico applicati a un caso reale mediante modellazione dinamica in ambiente TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation tool). Sono stati valutati da un punto di vista numerico e sperimentale alcune proposte di retrofit per l'efficientamento energetico della piscina coperta del *C.U.S. Napoli A.S.D.*, sito in via Campegna n° 267 (Figura 1) sfruttando un impianto solare termico al servizio dell'impianto.



Figura 1: C.U.S. Napoli A.S.D.

Si tratta di una piscina a sfioro (Figura 2) il cui volume ammonta a 855 m^3 , senza contare la vasca di compenso al servizio della stessa che si sviluppa lungo il lato corto della piscina con un volume di circa 54 m^3 ed è accessibile attraverso i locali interrati della centrale al servizio della piscina. L'intera struttura è aperta dal Lunedì alla Domenica coinvolgendo circa 1000 iscritti. La piscina viene svuotata una volta l'anno, ovvero nel mese di Agosto quando le attività sono sospese e l'impianto resta chiuso. Queste operazioni impiegano circa 15 giorni. Nel periodo di attività la temperatura dell'acqua è mantenuta sempre tra i 27°C e i 29°C e viene costantemente monitorata attraverso un sistema di controllo in tempo reale. L'energia solare nel caso in esame è utilizzata per la produzione di energia termica, attraverso 64 m^2 di collettori solari termici di tipo piano.



Figura 2: Piscina coperta



Figura 3: Campo solare al servizio della piscina

Schema dell'impianto

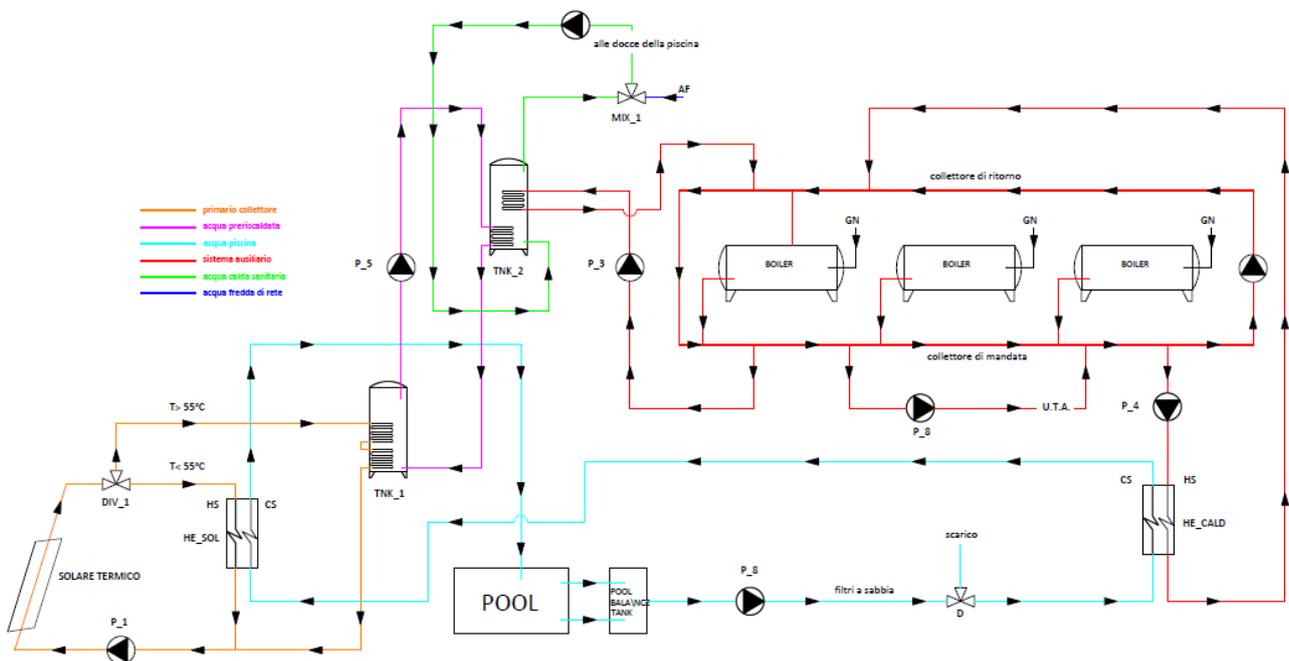


Figura 4: Schema di impianto del CUS Napoli

In Figura 4 è mostrato il layout di impianto, attraverso il quale possiamo distinguere:

- il circuito solare (linea arancio) nel quale il fluido termovettore viene riscaldato dalla radiazione solare ed è inviato con priorità allo scambiatore di calore per riscaldare l'acqua della piscina e al serbatoio per l'accumulo termico del circuito solare;
- il circuito del preriscaldamento (linea magenta) nel quale il fluido riscaldatosi nel serbatoio solare viene inviato alla serpentina inferiore di un secondo bollitore sanitario. L'acqua riscaldata in tale circuito serve l'utenza della piscina;
- Il circuito ausiliario (linea rossa) costituito da 3 caldaie a basemento di potenza nominale pari a 609 kW ciascuna che servono non solo la piscina ma anche tutte le altre utenze della struttura. Il fluido termovettore ausiliario riscalda la piscina attraverso uno scambiatore a piastra in cui i fluidi scorrono in controcorrente per massimizzare lo scambio termico. La caldaia provvede anche a riscaldare la batteria dell'UTA e la serpentina superiore del bollitore sanitario per la produzione di ACS. L'acqua della piscina viene quindi riscaldata da due scambiatori di calore al servizio del circuito solare e di quello ausiliario.
- il circuito della piscina (linea azzurra) in cui sono presenti la vasca di compenso, i filtri a sabbia quarzifera e le pompe di aspirazione che hanno due funzioni principali: garantire il processo di fisico-chimico di filtrazione e assicurare il ricircolo dell'acqua stessa della piscina assicurando un livello costante dell'acqua della piscina. Il processo di ricircolo

dell'acqua dovrebbe garantire il filtraggio dell'acqua contenuta in piscina più il 60% dell'acqua contenuta nella vasca di compenso ai sensi della NORMA UNI 10637/2006.

Sviluppo del modello di simulazione

Per poter avere delle risposte in tempo reale sulle performance dell'impianto è stato possibile avvalersi di un particolare software: TRNSYS (Transient System Simulation) un ambiente di simulazione completo ed estensibile pensato per l'analisi e la simulazione, con notevole grado di dettaglio, delle prestazioni transitorie di sistemi energetici e termici il cui comportamento sia variabile nel tempo. Mediante tale software è stato definito il sistema di riferimento (Figura 5) e sono state elaborate, con differenti strategie di controllo, i sistemi proposti.

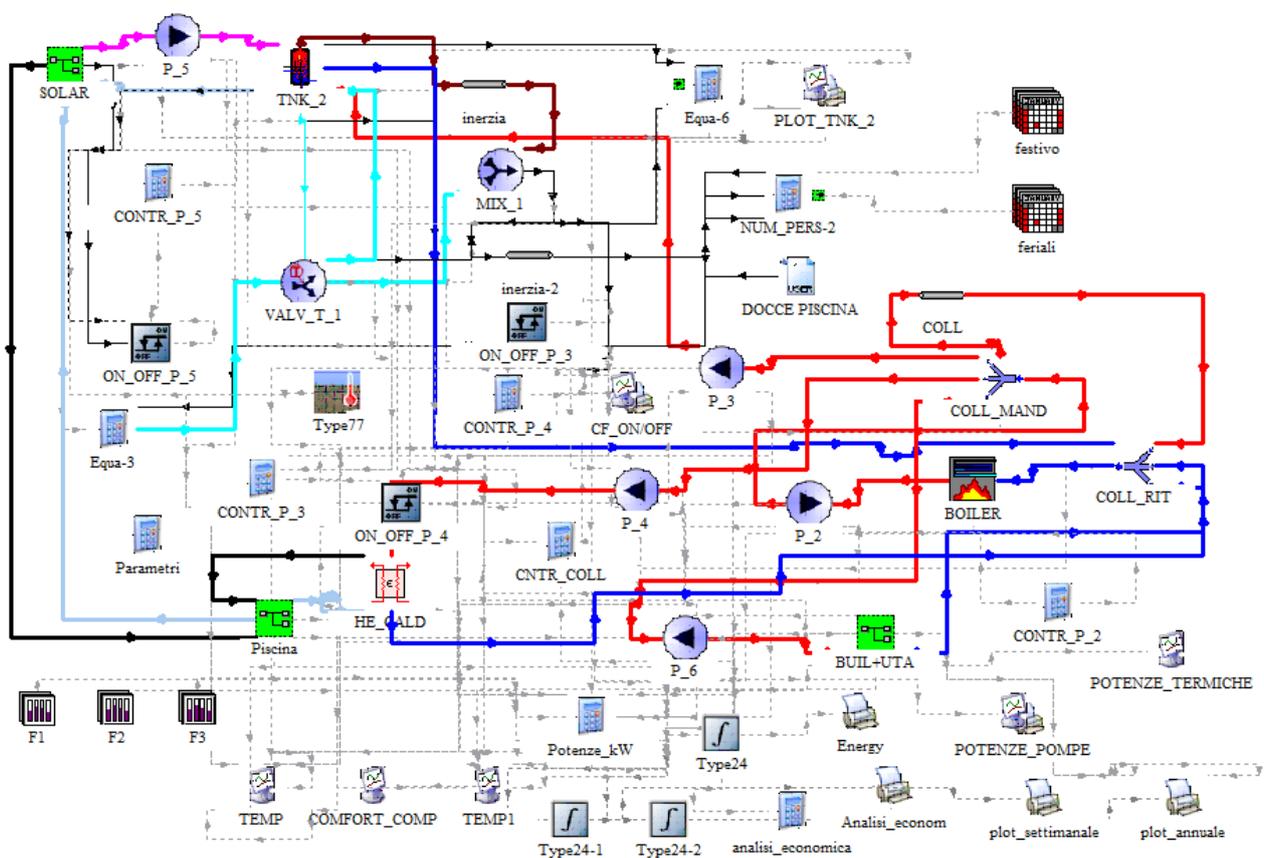


Figura 5: Sistema di riferimento

Utilizzando l'ultima versione del programma, TRNSYS 17, e il plug-in TRNBUILD è stato inoltre possibile di simulare il comportamento termico dell'edificio, le prestazioni energetiche e il livello di comfort termico degli occupanti. Preliminarmente, grazie all'applicazione Google SketchUp è stato possibile modellare la geometria dell'edificio in 3D generando un file di estensione *.idf che successivamente è stato importato in TRNSYS 3D model generando così un nuovo file in formato .b17.

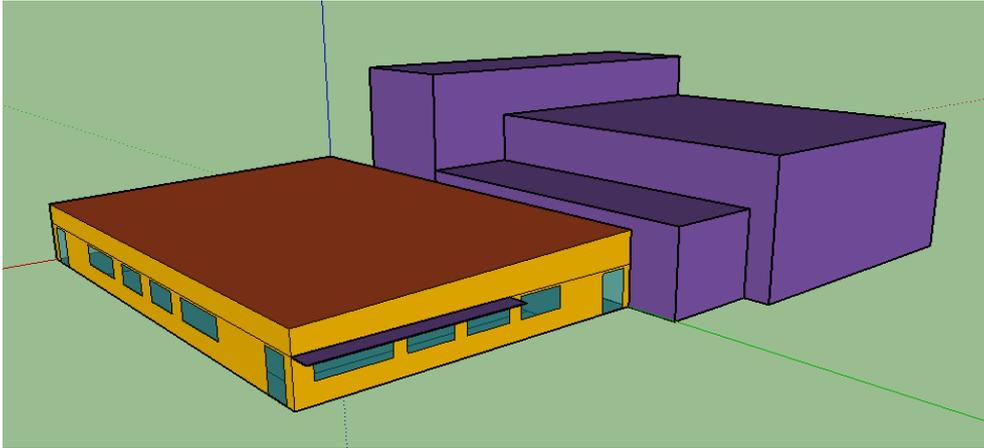


Figura 6: Modello geometrico in 3D della piscina del C.U.S. Napoli

In TRNBUILD è stato possibile definire le caratteristiche dell'edificio, mediante definizione dei layers delle pareti e il loro spessore, e caricare nel modello una serie di input (comfort, ventilazione, infiltrazione, apporti interni) oltre a fornire un set-up delle condizioni termoisometriche iniziali.

Campagne Sperimentali

Al fine di verificare la correttezza dei bilanci energetici, di stabilire le condizioni di comfort e di simulare i molteplici scambi termici che interessano il volume di controllo, oggetto dell'analisi energetica, nell'ambito del lavoro di tesi, sono state svolte alcune campagne di misura mirate alla conoscenza dei principali parametri fluidodinamici e termoisometrici che interessano i circuiti dell'impianto al servizio della piscina. Poiché risultava necessario conoscere la consistenza delle portate di acqua in gioco all'interno dei vari circuiti del sistema, onde evitare interventi troppo invasivi, ci si è orientati verso tecniche di misura ad elevata affidabilità e a basso impatto sugli impianti, mediante misuratori di portata ad ultrasuoni di tipo clamp-on (Figura 7 e Figura 8).

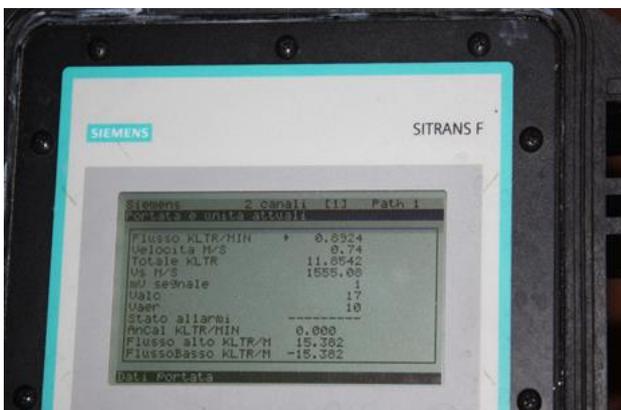


Figura 7: Misuratore di portata CLAMP-O



Figura 8: Misurazione di portata del circuito solare

Per mezzo di trasduttori montati esternamente alla tubazione il misuratore di portata invia impulsi ultrasonici al fluido che attraversa lo spessore della tubazione. Il tempo di transito di un impulso che

percorrendo la tubazione forma un angolo con la direzione del flusso, è funzione del diametro della condotta, della velocità di propagazione dell'energia vibrazionale e della velocità media del fluido. Gli impulsi trasmessi nella direzione del flusso e quelli trasmessi contro corrente richiederanno intervalli diversi nel percorrere la distanza che separa i due trasduttori. La differenza di tempo è quindi direttamente correlata alla velocità del fluido e, noto il diametro, alla portata dello stesso. Attraverso una sonda a contatto, opportunamente collegata al dispositivo, è stata misurata la temperatura del fluido trasportato dalle condotte. Le condotte interessate da tali misurazioni sono:

- il collettore di mandata della caldaia ($D_{int}=168$ mm; spessore=4 mm; materiale: ferro nero)
- il collettore di mandata del circuito solare ($D_{int}=50$ mm; spessore=3 mm; materiale: acciaio)
- il collettore di ricircolo dell'acqua della piscina ($D_{int}=185$ mm; spessore=15 mm; materiale: PVC)
- il collettore di mandata dell'ACS per le docce della piscina ($D_{int}=50$ mm; spessore=3 mm; materiale: acciaio)

	PORTATA MEDIA (m³/h)	TEMPERATURA MEDIA (°C)
MANDATA CALDAIA	34.68	53
MANDATA SOLARE	5.12	36
RICIRCOLO ACQUA PISCINA	58.33	26
MANDATA DOCCE	1.25	34

Tabella 1: Valori di portata e temperatura misurati

Avendo la necessità di conoscere la portata d'aria immessa dall'esterno per simulare correttamente il funzionamento dell'unità di trattamento dell'aria sono state condotte misurazioni di portata basate sulla tecnica dell'anemometria a filo caldo. Il dispositivo, dotato di una sonda con cavo (Figura 9 b)) di un apparato elettronico digitale per la lettura e l'elaborazione dei dati (Figura 9 a)), misura la velocità media locale di un fluido in moto attraverso lo scambio termico convettivo forzato tra il fluido stesso e un filo caldo esposto alla corrente fluida. Il filo metallico di platino, lungo 1 mm e avente un diametro di 5 μ m, (Figura 9 c)) è disposto ortogonalmente alla direzione del moto del fluido (cross-flow), in modo da ottenere una misura accurata della velocità del fluido.



Figure 9 a): Misuratore Testo 480



9 b) Sonda per aria T/C tipo K



9 c) Sensore in platino

Per le dodici bocche di ripresa, presenti all'interno dell'ambiente della piscina, è stata misurata la velocità di immissione dell'aria. Sommando tra loro tali valori di velocità e moltiplicando il valore di tale somma per la sezione del canale rettangolare (60 cm x 20 cm) di mandata dell'aria (Figura 9 d) è stata ricavata la portata totale di aria immessa che ammonta a circa 9000 m³/h.



Figura 9 d): Misura della sezione del canale



Figura 9 e): Lettura della velocità di immissione dell'aria

Per interpretare in maniera rigorosa l'andamento climatico all'interno dell'ambiente della piscina, rendendosi necessaria la conoscenza di un dato in continuo riguardo ai parametri di temperatura e umidità relativa, sono state condotte alcune campagne di misura effettuate attraverso sofisticati dispositivi, i data logger modelli: mini 174H e 175 H1 della Testo (Figura 10), in grado di leggere e memorizzare una serie di misurazioni secondo un'assegnata frequenza di clock. Caricando un modello di registrazione personalizzato è stato possibile sincronizzare quattro dispositivi e disporli in particolari punti strategici all'interno dell'ambiente della piscina (zona antistante agli spogliatoi,

corda piscina, griglia di ripresa dell'aria, orologio contasecondi) al fine di poter tener conto dei molteplici scambi termici, dei guadagni e delle perdite che interessano il volume di controllo oggetto dell'analisi energetica.



Figura 10: Dispositivi di misura della temperatura e dell'umidità relativa

A questo punto, ai fini della validazione del modello, è stato possibile interpretare il dato sperimentale e confrontarlo con quello simulato in ambiente TRNSYS fissando le condizioni iniziali di partenza all'interno del TRNBUILD per la temperatura e l'umidità relativa ($T_{in}=28^{\circ}\text{C}$ e $U_r=63\%$). Per convalidare il modello di scambio termico della piscina e il modello di impianto dell'aria includente l'U.T.A. è stato necessario effettuare una calibrazione di alcuni parametri caratteristici del modello che avrebbero potuto ridurre lo scarto medio, tra valore misurato e valore simulato. Tale operazione è stata condotta ritardando alcuni parametri caratteristici della modellazione presa in considerazione (intervenendo sulla portata massica di aria immessa, sul fattore di ripresa dell'aria e introducendo un coefficiente correttivo nell'equazione adottata per modellare il fenomeno dell'evaporazione). A seguito di tali operazioni per la temperatura lo scarto medio è risultato minore del 3% mentre per l'umidità relativa si è attestato mediamente sull'8%. A titolo di esempio si riportano i risultati dell'analisi effettuata per uno dei quattro dispositivi.

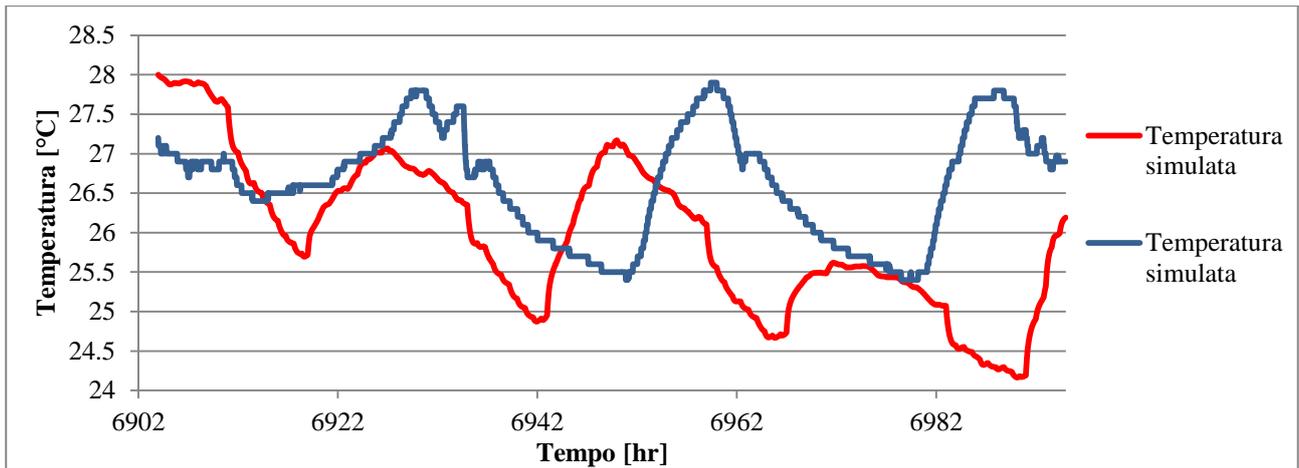


Figura 11 a): Andamento delle temperature simulata (in rosso) e reale (in blu) nella zona antistante agli spogliatoi

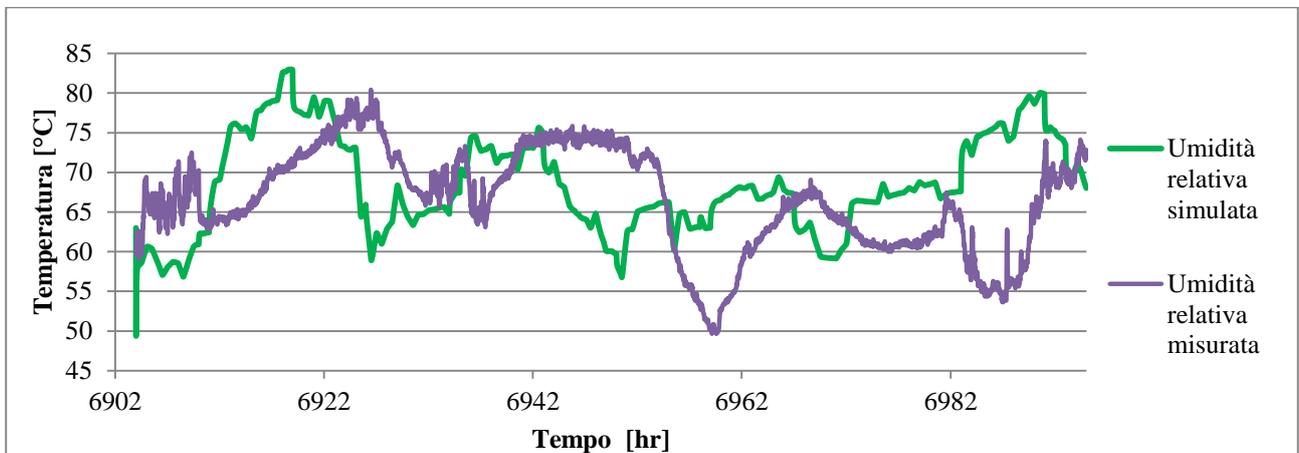


Figura 11 b): Andamento dell'umidità relativa simulata (in rosso) e reale (in blu) nella zona antistante agli spogliatoi

STATISTICA DESCRITTIVA CORDA PISCINA		
	TEMPERATURA	UMIDITA' RELATIVA
Media	0.024460791	-0.038974272
Errore standard	0.000460933	0.001456078
Mediana	0.020868195	-0.036832275
Deviazione standard	0.043972583	0.138908633
Varianza campionaria	0.001933588	0.019295608
Curtosi	-0.11338277	-0.212172037
Asimmetria	0.307149895	-0.461959724
Intervallo	0.192541601	0.683052571
Minimo	-0.065462496	-0.420359293
Massimo	0.127079105	0.262693278
Somma	222.6176616	-354.7048459
Conteggio	9101	9101
Più grande(1)	0.127079105	0.262693278
Più piccolo(1)	-0.065462496	-0.420359293
Livello di confidenza(90.0%)	0.000758244	0.002395279
Livello di confidenza(95.0%)	0.000903531	0.00285424

Tabella 2: Analisi statistica descrittiva

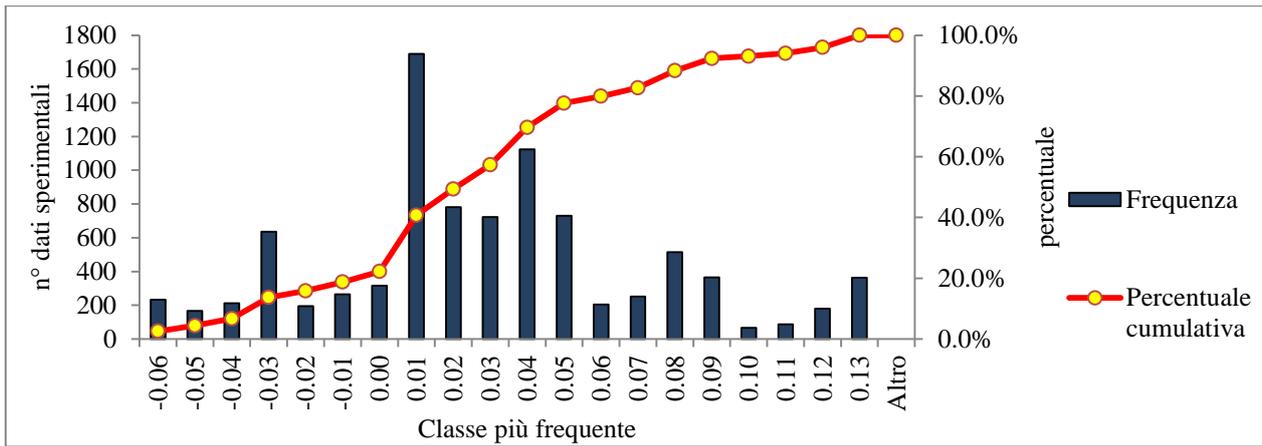


Figura 11 c): Istogramma della temperatura e percentuale cumulativa in funzione della classe più frequente per la corda della piscina

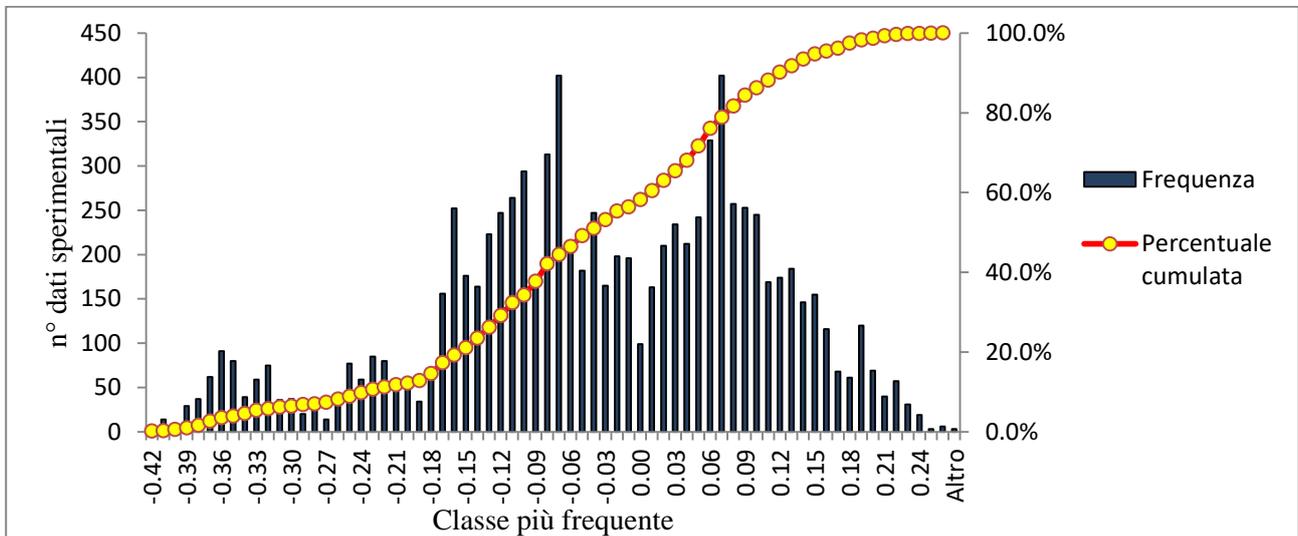


Figura 11 d): Istogramma della temperatura e percentuale cumulativa in funzione della classe più frequente per la corda della piscina

Confronto tra i sistemi proposti

Ipotizzando una sostituzione dei collettori solari termici esistenti, è stata valutata la fattibilità economica in riferimento a cinque possibili scenari proposti (Figura 12)



Figura 12: Scenari proposti

In ultima analisi è stato previsto un ulteriore scenario con la possibilità di andare a sostituire il sistema ausiliario tradizionale, senza intervenire sull'integrazione del solare, proponendo una pompa di calore elettrica (di tipo aria-acqua) di ultima generazione, dimensionata mediante Magellano, un software di selezione che ha consentito di verificare le condizioni di funzionamento del modello sviluppato sulla base dei parametri e gli standard di prestazione richiesti (Tabella 3)

Riscaldamento		
Potenza resa	kW	759.6
Potenza assorbita	kW	202.1
Corrente assorbita	A	350
C.O.P.	W/W	3.76
Temperatura dell'aria esterna a bulbo secco	°C	7.0
Temperatura dell'acqua in ingresso	°C	30.0
Salto termico	°C	5.0
Temperatura dell'acqua in uscita	°C	35.0
Glicole etilenico	%	0
Portata acqua	l/h	131,026
Perdite di carico	kPa	56
Fattore di sporramento	(m ² K)/W	0.00005

Applica la normativa EN 14511:2013

Tabella 3: Proporzionamento pompa di calore

Analisi parametrica energetica ed economica

Sono state realizzate analisi parametriche da un punto di vista energetico, economico e dell'efficienza con lo scopo di evidenziare l'importanza che la variazione di un parametro può assumere sul funzionamento del sistema stesso. A partire dalla condizione di riferimento, si è deciso di far variare nel corso delle simulazioni l'area dei collettori solari. A titolo di esempio, si riportano i risultati ottenuti per la configurazione a tubi evacuati.

L'analisi parametrica energetica condotta per il sistema proposto a tubi evacuati ha portato alla definizione dei seguenti profili

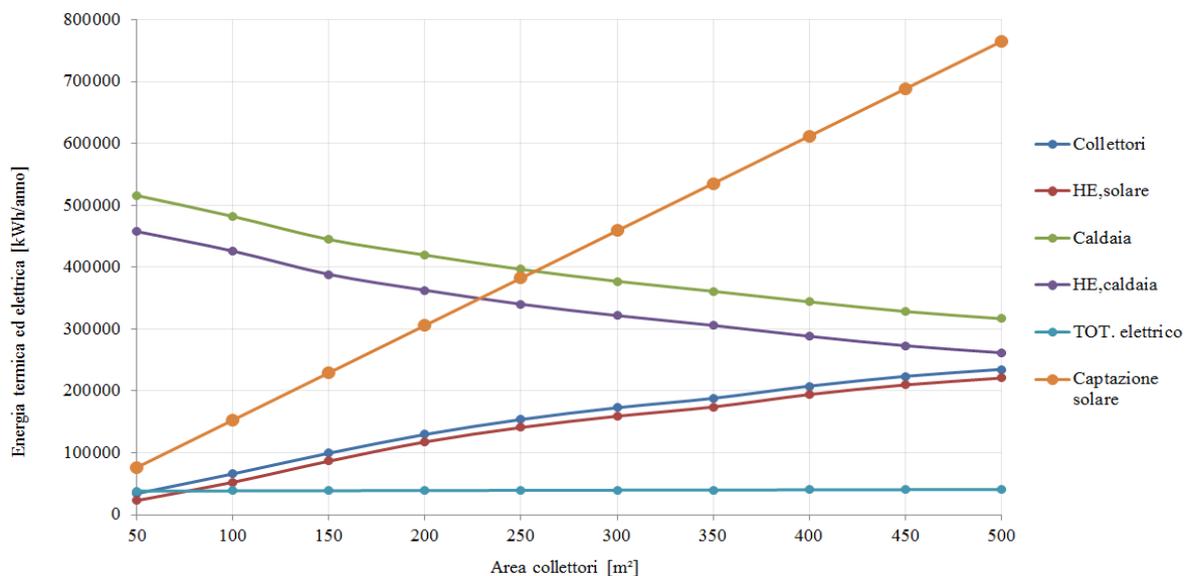


Figura 13 a): Energie termiche ed elettriche del sistema proposto con i collettori evacuati7

Come si può osservare in Figura 13 a) la captazione solare aumenta linearmente con l'aumentare della superficie del campo solare, mentre l'energia elettrica consumata rimane pressoché costante in tutte le configurazioni. Gli andamenti delle energie termiche cedute negli scambiatori di calore dai sistemi di produzione sono opposti, infatti, il contributo della caldaia (HE, caldaia) diminuisce mentre quello del campo solare (HE, solare) aumenta; di conseguenza la produzione di energia termica della caldaia (Caldaia) diminuisce.

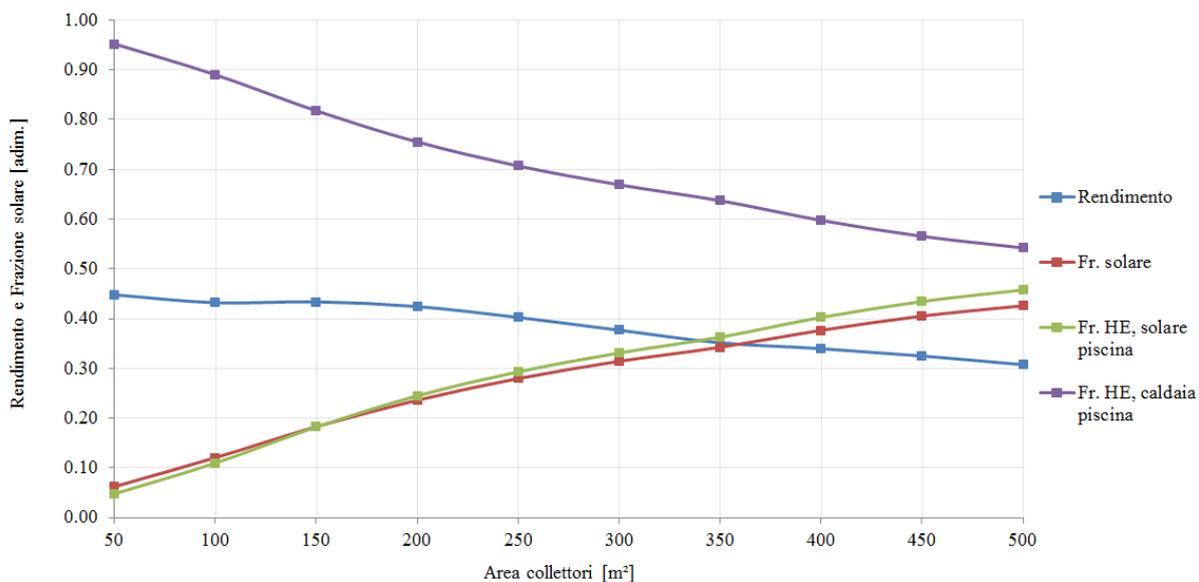


Figura 13 b): Rendimento e frazioni per il sistema proposto con i collettori evacuati

In figura 13 b) sono stati riportati alcuni fattori adimensionali tra cui il rendimento che diminuisce in maniera sublineare all'aumentare della superficie: questo è giustificato dal fatto che la temperatura del fluido in ingresso ai collettori è mediamente più alta e la differenza di temperatura tra ingresso e uscita risulta minore. La frazione solare aumenta in maniera considerevole, passando da un valore di 0.08 per un campo solare di 50 m² ad uno di 0.43 per un campo solare di 500 m². Sono stati riportati anche i contributi adimensionali dei sistemi di generazione di energia per riscaldare l'acqua della piscina: si osserva che il contributo della caldaia diminuisce all'aumentare della superficie del campo solare, questo porta ad un minore esborso economico in termini di costi operativi. Nella Figura 13 c) si riportano le energie termiche sfruttate per la generazione di acqua calda sanitaria per i due bollitori sanitari (TNK_1 e TNK_2) in riferimento ai due circuiti di generazione di calore e il contributo, in forma adimensionalizzata, della caldaia Fr. HE caldaia, TNK2 e del campo solare Fr. HE solare, TNK2 per la produzione di ACS nel TNK_2.

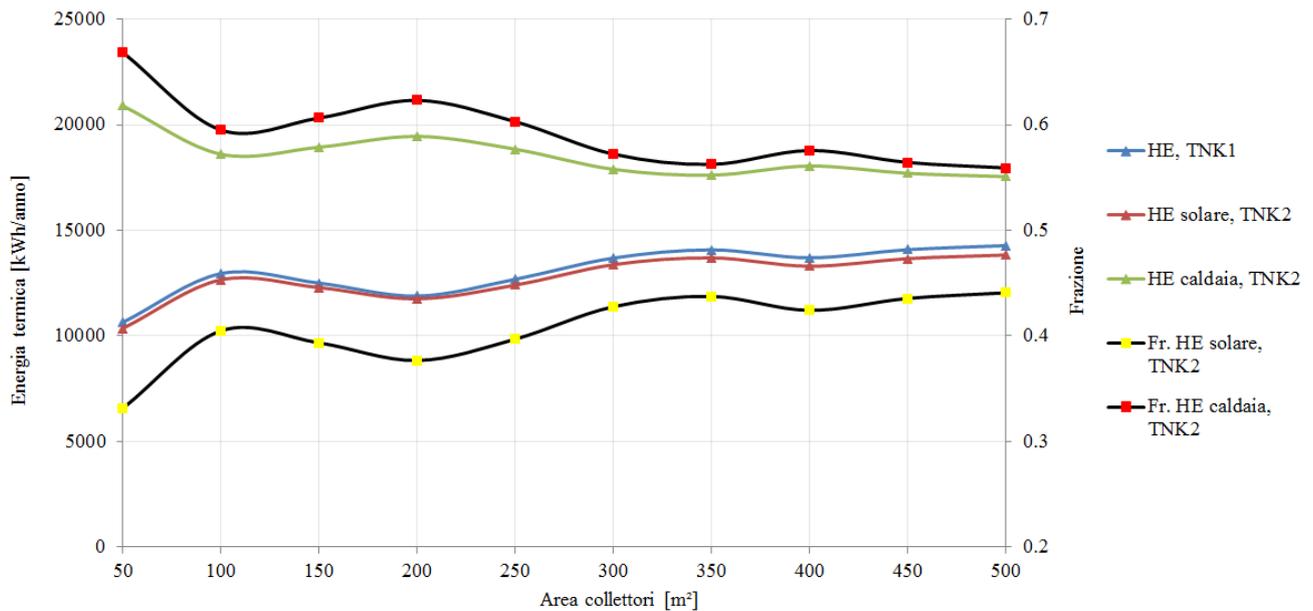


Figura 13 c): Energie termiche agli scambiatori di calore e relative frazioni per il sistema proposto con i collettori evacuati

Analizzando i fattori adimensionali, si prevedeva un andamento monotono decrescente della Fr. HE caldaia, TNK2 in funzione dell'aumento della superficie captante del campo solare. Probabilmente viene ritardata l'attivazione della caldaia della piscina in maniera significativa quindi il campo solare fornisce un contributo maggiore alla piscina e meno al TNK_1, e quindi TNK_2. Questo è frutto della diversa strategia di controllo settata per i sistemi proposti.

L'analisi parametrica energetica condotta per il sistema proposto a tubi evacuati ha portato alla definizioni dei seguenti profili.

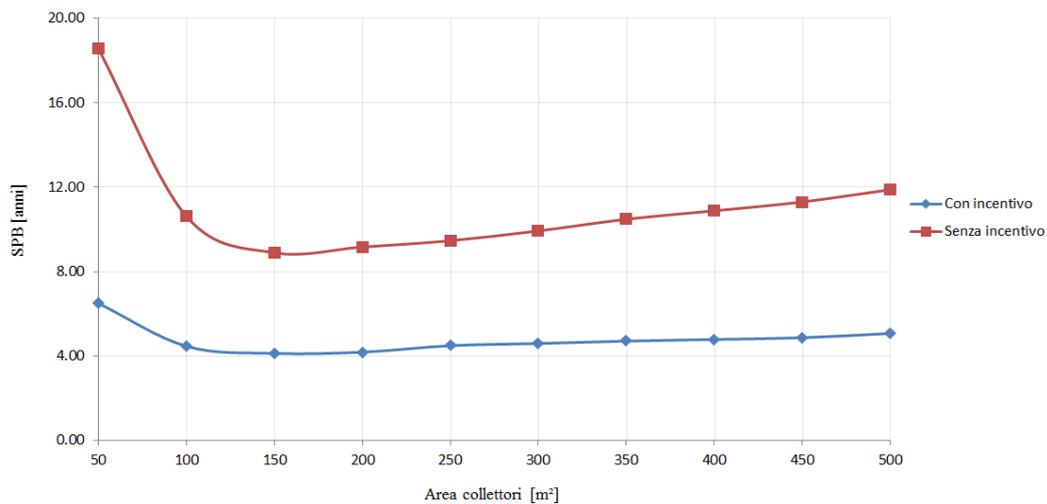


Figura 13 d): Andamento del SPB con e senza incentivo per i collettori evacuati

Nella Figura 13 d) si osservano gli andamenti del SPB sia tenendo in considerazione dell'incentivo in Conto Termico 2.0 che tralasciando quest'ultimo. Le curve presentano sviluppi differenti,

soprattutto per la configurazione a 50 m² in cui la presenza dell'incentivo consente di ridurre il tempo di ritorno dell'investimento da 18.54 anni a 6.49 anni. Per grandi superfici l'incentivo si riduce di molto, e l'andamento è pressoché costante a differenza dello sviluppo della curva dell'SPB senza incentivo, che si presenta monotona crescente.

Nella Figura 13 e) si possono osservare gli andamenti dell'indice di profitto (IP) nelle condizioni precedentemente sviluppate. Si osserva che, non tenendo conto dell'incentivo, l'investimento è economicamente sostenibile per uno sviluppo areale medio compreso tra i 100 m² e i 300 m², mentre per le altre configurazioni risulta poco conveniente o addirittura sostenibile, come nel caso della configurazione a 50 m² in cui l'IP è negativo. Lo sviluppo dell'IP con l'incentivo del Conto Termico 2.0 è completamente diverso, attestandosi sempre al di sopra del valore di 0.3, rendendo redditizio l'investimento per tutte le tipologia di configurazione.

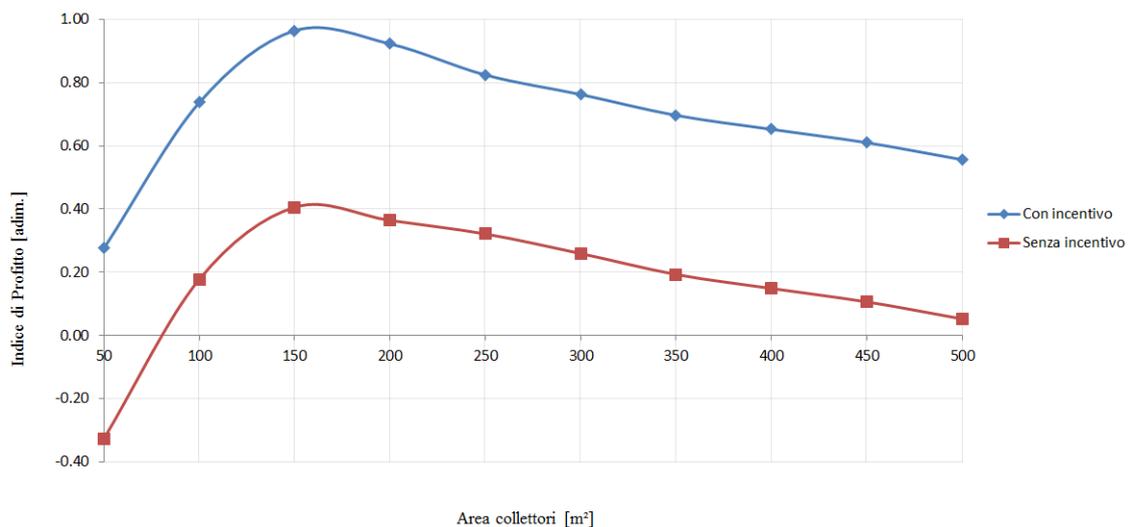


Figura 13 e): Andamento dell' IP con e senza incentivo per i collettori evacuati

In tabella 4 si riporta un riepilogo completo degli indici economici per tutte le possibili configurazioni proposte.

Tipologia	Indici economici	Superficie campo solare (m ²)									
		50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Evacuati	SPB (anni)	18.54	10.61	8.89	9.16	9.46	9.93	10.48	10.88	11.30	11.88
	SPB con incentivo (anni)	6.49	4.46	4.12	4.18	4.49	4.59	4.70	4.78	4.86	5.07
	IP	-0.33	0.18	0.41	0.36	0.32	0.26	0.19	0.15	0.11	0.05
	IP con incentivo	0.28	0.74	0.96	0.92	0.82	0.76	0.70	0.65	0.61	0.56
TVP	SPB (anni)	15.78	11.99	10.62	10.57	-	-	-	-	-	-
	SPB con incentivo (anni)	10.65	5.72	5.06	5.04	-	-	-	-	-	-
	IP	-0.21	0.04	0.18	0.18	-	-	-	-	-	-
	IP con incentivo	0.10	0.49	0.63	0.63	-	-	-	-	-	-
Non selettivo	SPB (anni)	68.54	14.53	11.41	10.31	10.11	9.22	9.24	9.2	9.26	9.49
	SPB con incentivo (anni)	23.99	5.09	4.59	4.41	4.37	4.19	4.20	4.19	4.20	4.25
	IP	-0.82	-0.14	0.10	0.21	0.24	0.36	0.35	0.36	0.35	0.32
	IP con incentivo	-0.21	0.42	0.65	0.77	0.8	0.91	0.91	0.92	0.91	0.88
Selettivo	SPB (anni)	25.29	13.67	11.28	10.59	10.12	9.94	10.1	10.48	10.47	10.76
	SPB con incentivo (anni)	8.85	4.92	4.57	4.46	4.37	4.34	4.37	4.44	4.43	4.49
	IP	-0.51	-0.09	0.11	0.18	0.24	0.26	0.24	0.19	0.19	0.16
	IP con incentivo	0.10	0.47	0.67	0.74	0.79	0.82	0.80	0.75	0.75	0.72
Non vetrati	SPB (anni)	-	10.74	7.48	6.1	6.04	5.25	5.37	5.01	5.14	5.24
	SPB con incentivo (anni)	-	4.56	3.85	3.45	3.58	3.29	3.34	3.19	3.24	3.4
	IP	-	0.16	0.67	1.05	1.07	1.38	1.33	1.5	1.43	1.38
	IP con incentivo	-	0.71	1.21	1.59	1.55	1.87	1.81	1.98	1.92	1.82

Tabella 4: Riepilogo degli indici economici per tutte le configurazioni