

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II**

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE*



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

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE*

**TESI DI LAUREA**

*L'audit energetico del sistema Edificio – Impianto:  
il “complesso del Frullone”*

Relatore:

Ch.mo Prof. Ing. Francesco Calise

Correlatore:

Fabio Siesto

Candidato:

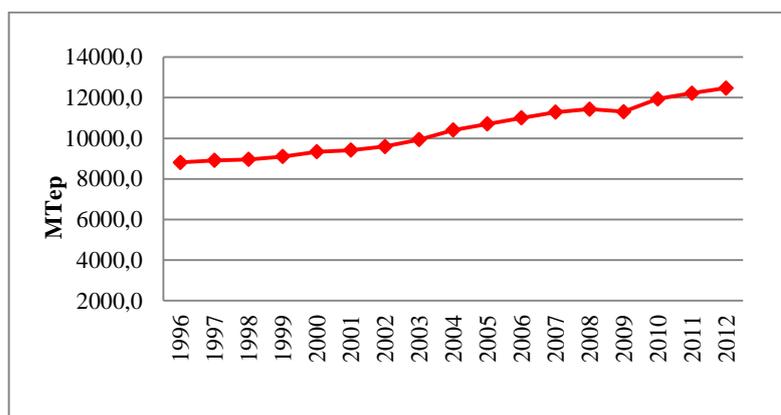
Carmela Malanga

Matr. M67/89

ANNO ACCADEMICO 2013/2014

## Abstract

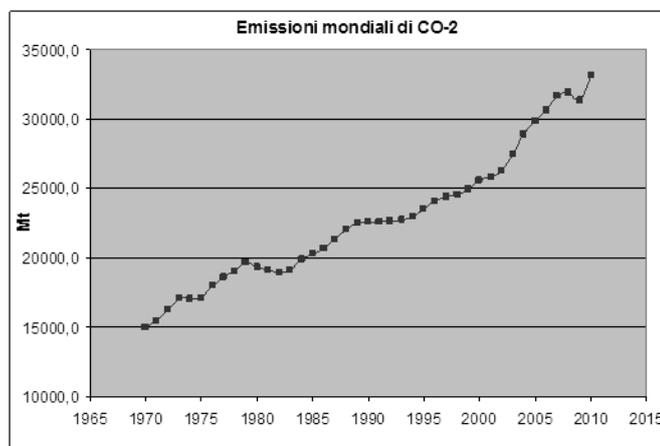
La necessità di contenere i consumi energetici nasce dalla crescente quantità di gas serra emessi in atmosfera che compromettono sempre più la salute e il benessere del nostro pianeta. Emissioni di gas serra conseguenti alla continua crescita domanda di energia primaria necessaria a soddisfare le mille esigenze dell'uomo. La domanda finale di energia è infatti destinata a crescere con un tasso dell'1,5% annuo.



**Figura 1 - Andamento nel tempo dei consumi mondiali di energia primaria (Fonte: BP-2012)**

La fonte principale di energia che soddisfa la domanda primaria è costituita dal petrolio, cui seguono il carbone e il gas naturale; solo negli ultimi anni si sta facendo strada l'utilizzo di fonti rinnovabili di energia che, come possiamo immaginare non sono responsabili dell'emissione di gas serra, eccezion fatta per le biomasse.

All'emissione di gas serra è legato il problema di cui ogni giorno si sente parlare del riscaldamento del pianeta: proprio da questo nasce l'esigenza di contenere i fabbisogni di energia provenienti da fonti tradizionali, privilegiando il ricorso a fonti rinnovabili.



**Figura 2 - Andamento delle emissioni mondiali di CO<sub>2</sub>**

Il World Energy Outlook 2013 (WEO2013) presentato a Londra lo scorso novembre dall'IEA (Agenzia Internazionale dell'Energia), dà alcuni suggerimenti in merito alla possibilità di contenere le emissioni di gas serra, ad esempio aumentando l'efficienza nei settori edilizio e dei trasporti oppure limitando la costruzione di centrali elettriche a carbone a bassa efficienza.

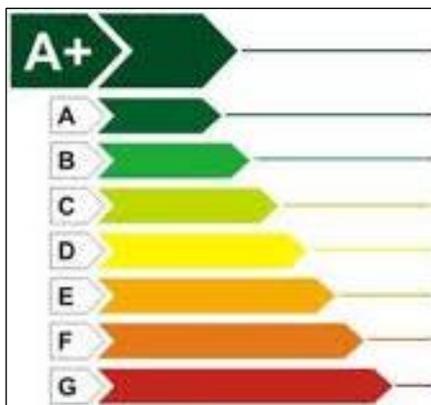
Per favorire il ricorso a fonti rinnovabili e contenere così le emissioni di gas serra, il Parlamento Europeo e il Consiglio dell'Unione Europea hanno emanato una serie di direttive che l'Italia ha recepito con l'emanazione di altrettanti decreti legislativi:

- la Direttiva Europea 2002/91/CE e i decreti legislativi 192/05 e 311/06, che promuovono il miglioramento del rendimento energetico degli edifici, con l'imposizione di valori limite di trasmittanza termica di pareti opache e trasparenti, e l'integrazione con fonti rinnovabili di energia;
- la Direttiva Europea 2009/28/CE e il decreto legislativo 28/11, i cui obiettivi principali il controllo del consumo di energia, il risparmio energetico, l'aumento dell'efficienza energetica e quindi il ricorso a tecnologie energeticamente efficienti. Il decreto 28/11 fissa inoltre obiettivi nazionali obbligatori per la quota complessiva di energia da fonti rinnovabili;
- la Direttiva Europea 2010/31/UE e il decreto legislativo 63/13, il cui tema principale è la prestazione energetica nell'edilizia. Il decreto 63/13 introduce importanti novità, come il concetto di edificio a energia quasi zero: si tratta di un edificio ad altissima prestazione energetica il cui fabbisogno molto ridotto è coperto da energia prodotta da fonti rinnovabili all'interno del confine del sistema.

In questo ampio quadro legislativo trova posto la certificazione energetica, che viene vista come uno strumento primario per perseguire con efficacia il miglioramento dell'efficienza energetica. La certificazione energetica non si pone come obiettivo quello di fornire indicazioni esatte circa il consumo di energia di un edificio, piuttosto quello di offrire agli interessati informazioni affidabili sui costi di gestione dell'immobile oggetto dell'analisi. In altre parole l'indicatore della prestazione energetica deve rappresentare una caratteristica del sistema Edificio – Impianto ed essere indipendente dalle condizioni al contorno che possono influenzare i consumi energetici.

Dall'analisi energetica si ottiene un indice, l' $EP_{glob}$ , che esprime la prestazione energetica complessiva dell'edificio e tiene conto del fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione estiva ed invernale, per la preparazione dell'acqua calda sanitaria e per l'illuminazione.

L'etichetta di efficienza energetica del sistema Edificio – Impianto è rappresentata dalla classe energetica assegnata in base alla prestazione energetica complessiva. La classe energetica è contrassegnata dalle lettere dalla A alla G nel senso di efficienza decrescente.



**Figura 3 - Classe energetica**

In questo ambito si inserisce il presente lavoro di tesi, in cui viene affrontato il tema della diagnosi energetica degli edifici.

Nello specifico la procedura di diagnosi energetica, nota anche come audit energetico, viene applicata per lo studio della prestazione energetica di un complesso edilizio destinato ad ospitare alcuni locali della facoltà di Medicina Veterinaria dell'Università di Napoli Federico II. In precedenza questa struttura ospitava una struttura psichiatrico, denominata "Frullone". Pertanto, in considerazione della variazione della destinazione d'uso e considerando la vetustà dell'edificio e dei suoi impianti, sono stati progettati interventi di ristrutturazione integrale con l'installazione di nuovi impianti meccanici per soddisfare i fabbisogni energetici.

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è quello di individuare la soluzione più vantaggiosa dal punto di vista energetico.

A tale scopo vengono proposte tre soluzioni impiantistiche alternative e per ciascuna di esse viene effettuata l'analisi energetica, con l'individuazione degli indici di prestazione del sistema Edificio – Impianto che permettono di classificarlo secondo quanto previsto dalla normativa vigente, e l'analisi economica, con la stima dei costi di investimento relativi alle varie soluzioni proposte ed una valutazione preliminare della fattibilità tecnico - economica.

Per la valutazione degli indici di prestazione è stato utilizzato il software MC4 Suite 2013 della MC4 software. Il programma consente la progettazione del sistema Edificio – Impianto e la valutazione dell'impatto dei materiali e degli impianti in termini di CO<sub>2</sub> emessa. È inoltre possibile calcolare gli indici di prestazione energetica, ottenuti nell'ipotesi di funzionamento in regime stazionario, e di stampare gli attestati APE (Attestato di Prestazione Energetica).

L'implementazione del calcolo energetico in MC4 ha richiesto la definizione di un modello 3D dell'edificio, nonché la definizione di tutte le caratteristiche termofisiche dell'involucro edilizio e delle peculiarità degli impianti di climatizzazione estiva ed invernale.

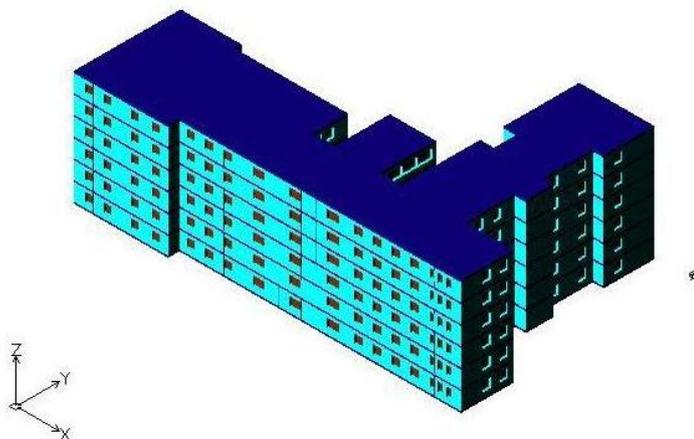


Figura 4 - Modello 3D dell'involucro dell'edificio

Gli indicatori ottenuti dallo studio effettuato forniscono una valutazione del comportamento del sistema Edificio – Impianto.

<i>Indicatore</i>	<i>Simbolo</i>	<i>Descrizione</i>
<i>Fabbisogno di energia primaria specifico totale per usi termici</i>	$EPI_{GLOB}$	Somma del fabbisogno specifico di energia primaria per il riscaldamento ( $EPI_{RISC}$ ) e quello per la produzione di acqua calda sanitaria ( $EPI_{ACS}$ ) al quale vengono eventualmente detratti i contributi energetici dovuti alle fonti rinnovabili $E_{FER}$
<i>Fabbisogno di energia primaria specifico per la climatizzazione invernale</i>	$EPI_{RISC}$	Definisce il fabbisogno di energia primaria specifico per la climatizzazione invernale e considera i rendimenti dell'impianto termico
<i>Fabbisogno di energia primaria per la produzione di acqua calda</i>	$EPI_{ACS}$	Definisce il fabbisogno di energia primaria per la produzione di acqua calda sanitaria e tiene conto, quindi, dei rendimenti degli impianti
<i>Fabbisogno energetico specifico dell'involucro per la climatizzazione estiva</i>	$EPI_{INVOL}$	Definisce il fabbisogno di energia specifico per la climatizzazione estiva
<i>Fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale e per ACS</i>	$Q_{EPH}$	Definisce il fabbisogno di energia per la climatizzazione invernale e per la produzione ACS; considera i rendimenti dell'impianto termico
<i>Contributo energetico specifico da impianti rinnovabili</i>	$E_{FER}$	Considera normalmente il contributo energetico specifico dovuto alle fonti rinnovabili
<i>Emissioni di gas inquinanti</i>	$CO_2$	Definisce la quantità di $CO_2$ emessa in atmosfera relativo al funzionamento totale dell'impianto termico

Tabella 1 - Indicatori della prestazione energetica

Allo stato attuale il complesso edilizio appartiene alla classe energetica G. Le principali criticità che penalizzano le prestazioni energetiche del sistema Edificio – Impianto sono riconducibili allo scarso isolamento termico dell'involucro esterno e ad un sistema impiantistico poco efficiente. Di qui la necessità di provvedere ad una completa riqualificazione dello stesso.

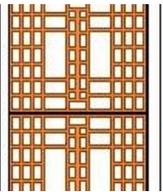
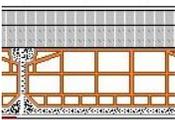
<i>Componente</i>	<i>Immagine</i>	<i>Descrizione dello strato</i>	<i>Spessore (cm)</i>	<i>Conducibilità termica (W/m K)</i>	<i>Resistenza termica (m<sup>2</sup>K/W)</i>	<i>Spessore totale (cm)</i>	<i>Trasmittanza (W/m<sup>2</sup>K)</i>
<i>Parete esterna</i>		Strato laminare interno			0,130	35	0,851
		Intonaco di calce e gesso	2	0,7	0,029		
		Blocco forato 1.1.14 300	30	0,318	0,943		
		Malta di calce	3	0,9	0,033		
		Strato laminare esterno			0,040		
<i>Calpestio piano terra</i>		Strato laminare interno			0,170	36	1,953
		Piastrelle in cotto	1	0,72	0,014		
		Sottofondo in cls magro	5	0,93	0,054		
		Cls ordinario	30	1,28	0,234		
		Strato laminare esterno			0,040		
<i>Soffitto esterno</i>		Strato laminare interno			0,100	30	1,811
		Malta di calce	2	0,9	0,022		
		Blocco da solaio 2.1.03i/1 180	18	0,599	0,300		
		Cls ordinario	6	1,28	0,047		
		Sottofondo in cls magro	4	0,93	0,043		
		Strato laminare esterno			0,040		
<i>Vetro da finestra singolo</i>				0,0292	0,171	0,5	5,862

Tabella 2 - Caratteristiche dell'involucro - Stato di fatto

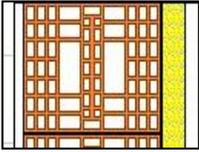
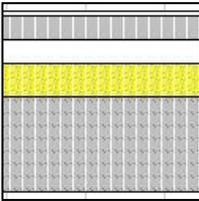
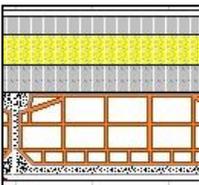
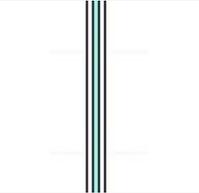
<i>Componente</i>	<i>Immagine</i>	<i>Descrizione dello strato</i>	<i>Spessore (cm)</i>	<i>Conducibilità termica (W/m K)</i>	<i>Resistenza termica (m<sup>2</sup>K/W)</i>	<i>Spessore totale (cm)</i>	<i>Trasmittanza (W/m<sup>2</sup>K)</i>
<i>Parete esterna</i>		Strato laminare interno			0,130	40	0,365
		Intonaco di calce e gesso	2	0,7	0,029		
		Blocco forato 1.1.14 300	30	0,318	0,943		
		Poliuretano espanso	5	0,032	1,562		
		Malta di calce	3	0,9	0,033		
		Strato laminare esterno			0,040		
<i>Calpestio piano terra</i>		Strato laminare interno			0,170	48	0,369
		Piastrelle in cotto	1	0,72	0,014		
		Sottofondo in cls magro	5	0,93	0,054		
		Sottofondo in argilla espansa	5	0,58	0,086		
		Poliuretano espanso	7	0,032	2,188		
		Cls ordinario	30	1,28	0,234		
		Strato laminare esterno			0,040		
<i>Soffitto esterno</i>		Strato laminare interno			0,100	37	0,365
		Malta di calce	2	0,9	0,022		
		Blocco da solaio 2.1.03i/1 180	18	0,599	0,300		
		Cls ordinario	6	1,28	0,047		
		Poliuretano espanso	7	0,032	2,188		
		Sottofondo in cls magro	4	0,93	0,043		
Strato laminare esterno			0,040				
<i>Vetrocamera</i>		Strato laminare interno			0,123	2,4	1,126
		Vetro metallico basso emissivo	0,4	0,3	0,013		
		Intercapedine Argon	1,6	0,023	0,696		
		Vetro metallico basso emissivo	0,4	0,3	0,013		
		Strato laminare esterno			0,043		

Tabella 3 – Caratteristiche dell' involucro - Progetto

Vengono dunque proposte tre soluzioni di progetto alternative, non prima di aver provveduto al miglioramento delle caratteristiche dell'involucro, ottenibile con la sostituzione degli infissi con altrettanti serramenti a taglio termico con vetrocamera bassoemissiva e l'isolamento delle pareti esterne del solaio di copertura e del calpestio a piano terra.

La prima soluzione progettuale proposta prevede la sostituzione delle caldaie esistenti con apparecchi a condensazione e dei terminali di erogazione del calore con ventilconvettori ad alta efficienza.

Nel secondo scenario si ipotizza un ulteriore miglioramento del rendimento del sistema di termoregolazione, dotando i ventilconvettori di dispositivi di regolazione modulante.

Nell'ultima proposta progettuale si ha un ulteriore miglioramento del sistema di produzione dell'energia termica mediante la sostituzione delle caldaie esistenti con pompe di calore ad azionamento elettrico ed un incremento dell'efficienza del sistema di termoregolazione con l'installazione di ventilconvettori ad alta efficienza dotati di dispositivi di regolazione modulante.

<i>Tipo di utenza</i>	<i>Stato di fatto</i>	<i>Scenario 1</i>	<i>Scenario 2</i>	<i>Scenario 3</i>
<i>Acqua calda sanitaria</i>	Boiler elettrico	Caldaia a condensazione + impianto solare termico	Caldaia a condensazione + impianto solare termico	Caldaia a condensazione + impianto solare termico
<i>Riscaldamento</i>	Caldaia tradizionale	Caldaia a condensazione	Caldaia a condensazione	Pompa di calore (COP = 3,1)
<i>Raffrescamento</i>	Non previsto	Non previsto	Non previsto	Pompa di calore (EER = 2,71)
<i>Terminali di erogazione del calore</i>	Radiatori	Ventilconvettori	Ventilconvettori	Ventilconvettori
<i>Sistema di termoregolazione</i>	-	on - off	Modulante $\pm 0,5$ °C	Modulante $\pm 0,5$ °C

Il sistema Edificio – Impianto subisce un graduale incremento della prestazione energetica, raggiungendo la classe C nel primo scenario di progetto, B nel secondo e A nell'ultimo.

Questo miglioramento di prestazione è dovuto non solo alle scelte edilizie e impiantistiche, ma anche all'integrazione con fonti rinnovabili di energia. Come imposto dal D.Lgs. 28/11, in tutti gli scenari infatti si è ipotizzata l'installazione di un impianto solare termico, finalizzato

alla copertura di almeno il 50% del fabbisogno di energia per la preparazione di acqua calda sanitaria, e di un impianto solare fotovoltaico per la produzione di energia elettrica.

Implementando nel software le caratteristiche dell'involucro e degli impianti meccanici, si ottengono le valutazioni energetiche che ci permettono di classificare energeticamente il sistema Edificio – Impianto.

<i>Indicatore di prestazione</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Stato di fatto</i>		<i>Scenario 1</i>		<i>Scenario 2</i>		<i>Scenario 3</i>	
$EP_{glob}$	kWh/m <sup>3</sup> anno	23,18		8,38		7,96		5,48	
$EP_{acs}$	kWh/m <sup>3</sup> anno	9,13		2,90		2,90		2,80	
$EP_c$	kWh/m <sup>3</sup> anno	0		0		0		3,01	
$EP_i$	kWh/m <sup>3</sup> anno	14,05	<b>X<sup>1</sup></b>	5,47	<b>V<sup>2</sup></b>	5,06	<b>V</b>	2,68	<b>V</b>
$EP_{i,lim}$	kWh/ m <sup>3</sup> anno	<b>4,64</b>		<b>6,43</b>		<b>6,43</b>		<b>6,43</b>	
$QR_{acs}$	%	0	<b>X</b>	50,35	<b>V</b>	50,35	<b>V</b>	51,96	<b>V</b>
$QR_{acs,lim}$	%	<b>50</b>		<b>50</b>		<b>50</b>		<b>50</b>	
$QR$	%	0	<b>X</b>	26,23	<b>X</b>	27,21	<b>X</b>	52,09	<b>V</b>
$QR_{lim}$	%	<b>35</b>		<b>35</b>		<b>35</b>		<b>35</b>	
$P$	kW	0	<b>X</b>	21,17	<b>V</b>	21,17	<b>V</b>	21,17	<b>V</b>
$P_{lim}$	kW	<b>19,55</b>		<b>19,55</b>		<b>19,55</b>		<b>19,55</b>	
<i>Classe energetica</i>	-	<b>G</b>		<b>C</b>		<b>B</b>		<b>A</b>	
<i>Rendimento medio stagionale dell'impianto</i>	%	69,94		144,55		156,45		352,29	

Tabella 4 - Principali risultati di calcolo

Dai risultati ottenuti si vede come la Pompa di Calore sia l'impianto meccanico più efficiente dal punto di vista energetico ed è inoltre l'unico che ci permette di avere il pieno rispetto del D.Lgs. 28/11 che ci obbliga all'utilizzo di energia prodotta da fonti rinnovabili, energia che dovrà coprire almeno il 35% del fabbisogno di energia primaria per ACS, riscaldamento e raffrescamento. La Pompa di Calore, infatti, prelevando aria atmosferica, è ritenuta una fonte parzialmente rinnovabile di energia se lavora con coefficienti di prestazione (COP e EER) sufficientemente elevati. Lo stesso decreto ci fornisce un metodo per il calcolo della quota di energia rinnovabile prodotta dalla PdC. Nel caso in esame il 52% del fabbisogno totale di

<sup>1</sup> X = limite di legge (D.Lgs. 28/11) non verificato

<sup>2</sup> V = limite di legge (D.Lgs. 28/11) verificato

energia primaria è coperto da impianti alimentati da fonti rinnovabili (considerando anche il fotovoltaico).

Dall'analisi economica risulta che la soluzione progettuale più conveniente sotto il profilo dei costi è la prima, quella che prevede l'installazione di una caldaia a condensazione e di ventilconvettori ad alta efficienza. L'investimento così definito, che ammonta a 355.000 €, ha un tempo di ritorno semplice stimabile in circa 6 anni.

Tuttavia questa soluzione non è la più conveniente dal punto di vista energetico, dal momento che si è ottenuto un  $EP_{glob}$  di 8,38 kWh/m<sup>3</sup>anno con una quantità di CO<sub>2</sub> emessa di circa 34 ton/anno.

La seconda proposta impiantistica evidenzia l'importanza di un sistema efficace di termoregolazione dei terminali di emissione del calore. Il sistema di termoregolazione ipotizzato consente, a differenza della regolazione "on – off" del primo scenario, il controllo della temperatura degli ambienti con uno scarto di  $\pm 0,5^{\circ}C$ . L'applicazione di questo sistema ha ovviamente un costo maggiore del precedente ma comporta il miglioramento delle prestazioni impiantistiche: come conseguenza immediata si ha infatti una riduzione dell' $EP_{glob}$  che passa da 8,38 kWh/m<sup>3</sup>anno a 7,96 kWh/m<sup>3</sup>anno e l'aumento del rendimento medio stagionale che passa dal precedente 144,55% al 156,45%.

Un ulteriore miglioramento del rendimento lo si ottiene ipotizzando la pompa di calore ad azionamento elettrico per la climatizzazione invernale e una caldaia a condensazione per la produzione di ACS. Altro vantaggio legato all'uso della PdC sta nel fatto che è possibile fornire all'utenza anche il servizio di climatizzazione estiva non prevista per gli altri scenari di progetto. Il ricorso a questa macchina ha però conseguenze dal punto di vista economico, nel senso che l'investimento iniziale ha un tempo di ritorno semplice di 8 anni e un tasso di rendimento interno dell'11%, minore rispetto al 17% degli altri due scenari precedenti. Tuttavia con la PdC il sistema Edificio – Impianto raggiunge la classe energetica A con un  $EP_{i, glob}$  di 5,48 kWh/m<sup>3</sup>anno.

<b>INDICI ECONOMICI</b>				
	<b>STATO DI FATTO</b>	<b>IPOTESI SCENARIO "1"</b>	<b>IPOTESI SCENARIO "2"</b>	<b>IPOTESI SCENARIO "3"</b>
<i>Totale costi di esercizio annui</i>	€ 56.107,10	€ 15.290,69	€ 14.530,64	€ 13.526,13
<i>Investimento iniziale IO</i>	€ 130.000,00	€ 355.000,00	€ 370.000,00	€ 470.000,00
<i>ΔIO</i>		€ 225.000,00	€ 240.000,00	€ 340.000,00
<i>Risparmio annuo – disponibilità D</i>		€ 40.816,41	€ 41.576,46	€ 42.580,97
<i>Vita utile [anni]</i>		20	20	20
<i>Tasso di attualizzazione - a</i>		7%	7%	7%
<b>Tempo di ritorno semplice SPB [anni]</b>		<b>5,51</b>	<b>5,77</b>	<b>7,98</b>
<b>Tempo di ritorno attualizzato DPB [anni]</b>		<b>7,21</b>	<b>7,65</b>	<b>12,10</b>
<b>Valore attuale netto VAN</b>		<b>€ 207.409,58</b>	<b>€ 200.461,56</b>	<b>€ 111.103,42</b>
<b>Indice di profitto IP</b>		<b>92,18%</b>	<b>83,53%</b>	<b>32,68%</b>
<b>Tasso di rendimento interno TIR</b>		<b>17,41%</b>	<b>16,51%</b>	<b>10,96%</b>

Tabella 5 – Valutazioni economiche

Possiamo dunque concludere dicendo che, grazie all'isolamento dell'involucro, all'installazione dell'impianto solare fotovoltaico per l'energia elettrica, dell'impianto solare termico abbinato alla caldaia a condensazione per la preparazione dell'acqua calda sanitaria e all'utilizzo della PdC quale fonte per la produzione di energia primaria per la climatizzazione estiva ed invernale, si ottiene una reale riqualificazione energetica del sistema Edificio – Impianto oggetto di studio.