

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

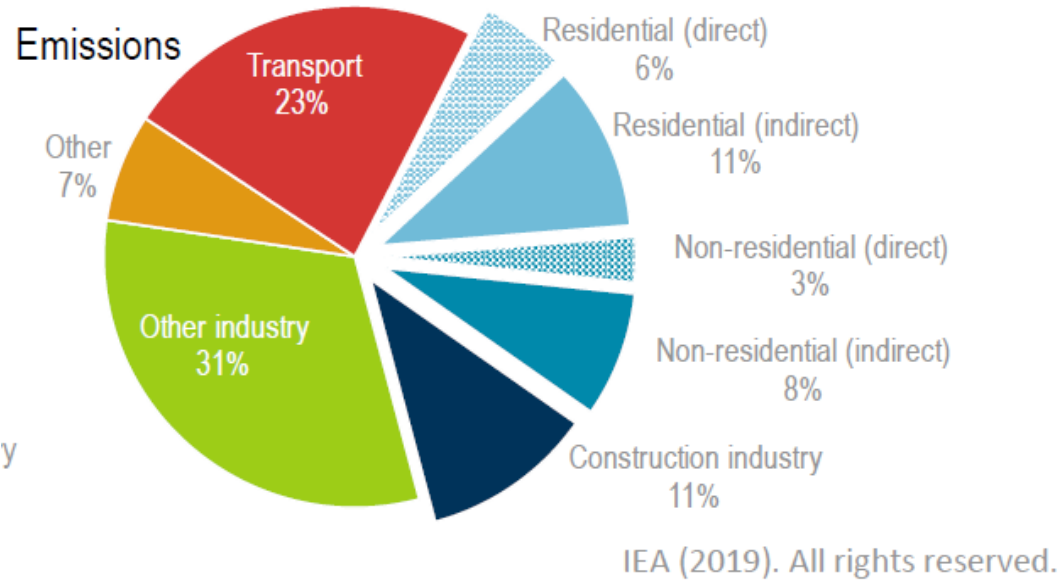
Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

Relazione per la prova finale
**«ANALISI ENERGETICA DI UN EDIFICIO
RESIDENZIALE E POSSIBILI INTERVENTI DI
RIQUALIFICAZIONE»**

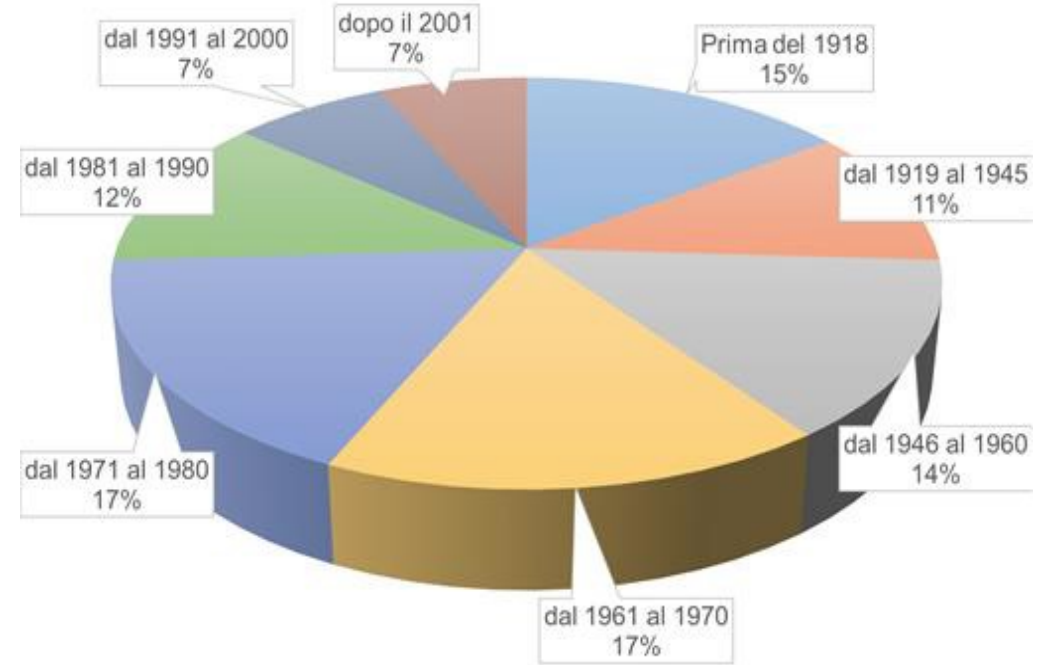
Tutor universitario: Prof. Angelo Zarrella

Laureando: *Filippo Dalla Vecchia*

Padova, 14/09/2022



Emissioni di CO₂ per settore, 2018



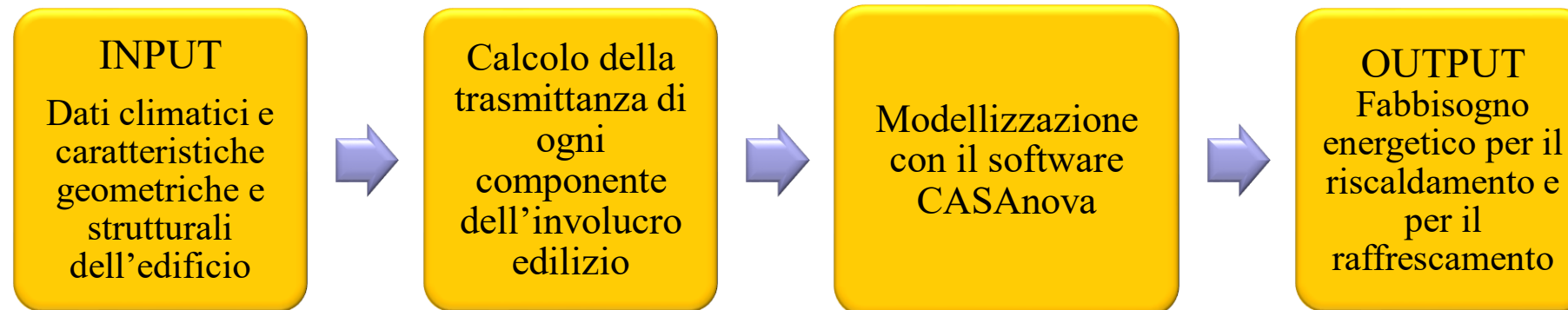
Distribuzione degli edifici residenziali italiani per epoca di costruzione

Dipendenza energetica dall'estero



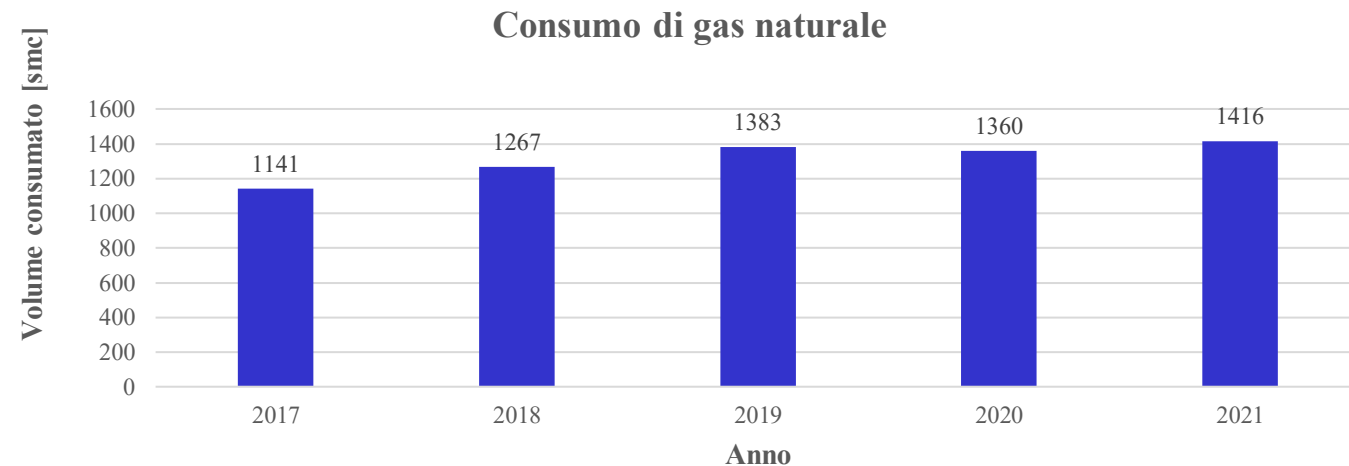
Approvvigionamento meno sicuro

1. Determinazione del fabbisogno energetico dell'edificio:



2. Analisi delle bollette del gas naturale per determinare il consumo di energia primaria per il riscaldamento:

Anno 2021		
Periodo	Consumo fatturato [smc]	Consumo reale [m ³]
Gennaio	325	313,80
Febbraio	235	226,90
Marzo	163	157,38
Aprile	58	56,00
Maggio	19	18,35
Giugno	15	14,48
Luglio	13	12,55
Agosto	13	12,55
Settembre	14	13,52
Ottobre	59	56,97
Novembre	176	169,94
Dicembre	326	314,77
Annuale	1416	1367,21



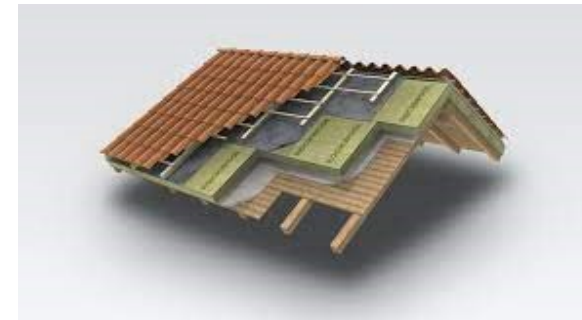
$$C = 1,035684$$

$$LHV = 35,874 \frac{MJ}{m^3}$$

- **Retrofit dell'involucro:**
 - Cappotto esterno (10 cm di polistirene espanso estruso)
 - Isolamento del tetto (8 cm di lana di roccia)
 - Isolamento del pavimento (8 cm di lana di roccia)
 - Sostituzione delle finestre
- **Retrofit dell'impianto di riscaldamento:**
 - Pompa di calore aria-acqua ad alta efficienza (COP=EER=5,1)
 - Caldaia a pellet ($\eta_c = 0,9$)
- **Retrofit del consumo di energia elettrica:**
 - Ampliamento dell'impianto fotovoltaico
 - Installazione di un sistema di accumulo
 - Installazione di una turbina eolica domestica

Per ogni intervento di riqualificazione ipotizzato è stata eseguita:

- **Analisi della riduzione delle emissioni di CO₂**
- **Analisi economica:** risparmio nei costi di esercizio e tempo di ritorno degli investimenti



$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_{si} + \sum_{k=1}^n \frac{S_k}{\lambda_k} + R_{se}} \quad \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

$$R_{si} = 0,13 \frac{W}{m^2 K}$$

$$R_{se} = 0,04 \frac{W}{m^2 K}$$

La composizione delle pareti perimetrali, del pavimento e del tetto è stata ricavata dal catalogo redatto in fase di costruzione dell'edificio.

Superficie opaca	Trasmittanza $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$
Muratura delle pareti verticali est e ovest	0,556
Pavimento	0,523
Tetto	0,337
Porta d'ingresso	1,5

Per tutte le finestre sono stati considerati dei **doppi vetri** caratterizzati da una trasmittanza di $3 \frac{W}{m^2 K}$ e un fattore solare $g = 0,8$.

- Caldaia a condensazione da 24 kW per riscaldamento e acqua calda sanitaria con serbatoio di accumulo da 300 litri
- Collettori solari termici (5 m²) solo per acqua calda sanitaria

$$C_{heating} = 1260 \text{ smc/anno} = 1216,58 \text{ m}^3/\text{anno}$$

$$E_{P_{attuale}} = \frac{C_{heating} \times LHV}{3,6} = 12123,3 \text{ kWh/anno}$$

$$E_{t_{gas}} = E_{P_{attuale}} \times \eta_g \cong 10950 \text{ kWh/anno}$$

Rendimento termico di combustione η_c	99%
Rendimento di distribuzione η_d	96%
Rendimento di emissione η_e	96%
Rendimento di regolazione η_{reg}	99%
Rendimento medio globale stagionale η_g	90,3%

$$\eta_g = \eta_c \eta_d \eta_{reg} \eta_e$$

$$T_{invernale} = 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad \longrightarrow \quad E_{heating} = 13000 \frac{\text{kWh}}{\text{anno}} \quad \longrightarrow \quad E_s = 100,3 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \quad \longrightarrow \quad \text{Classe energetica E}$$

Anno 2021					
Periodo	Prelevato rete	Prodotto fotovoltaico	Imnesso in rete	Autoconsumo	Consumo tot
	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
Gennaio	546	95,55	7,99	87,56	633,56
Febbraio	365	148,86	36,89	111,97	476,97
Marzo	300	318,4	134,67	183,73	483,73
Aprile	222	367,19	196,14	171,05	393,05
Maggio	305	451,53	165	286,53	591,53
Giugno	298	509,63	194,41	315,22	613,22
Luglio	305	464,66	188,41	276,25	581,25
Agosto	276	458	201,31	256,69	532,69
Settembre	214	336,51	162,89	173,62	387,62
Ottobre	469	237,12	36,68	200,44	669,44
Novembre	332	113,1	32,21	80,89	412,89
Dicembre	399	100,47	18,67	81,8	480,8
Annuale	4031	3601	1375	2226	6257

- Il raffrescamento avviene tramite tre condizionatori split, due per il piano terra (EER=3,2) e uno per la mansarda (EER=4,6):

$$T_{estiva} = 26^{\circ}\text{C} \quad \longrightarrow \quad E_{cooling} = 1110 \frac{\text{kWh}}{\text{anno}} \quad \longrightarrow \quad E_{E_{cooling}} = 332 \frac{\text{kWh}}{\text{anno}} \quad \longrightarrow \quad E_{E_{altro}} = 5925 \frac{\text{kWh}}{\text{anno}}$$

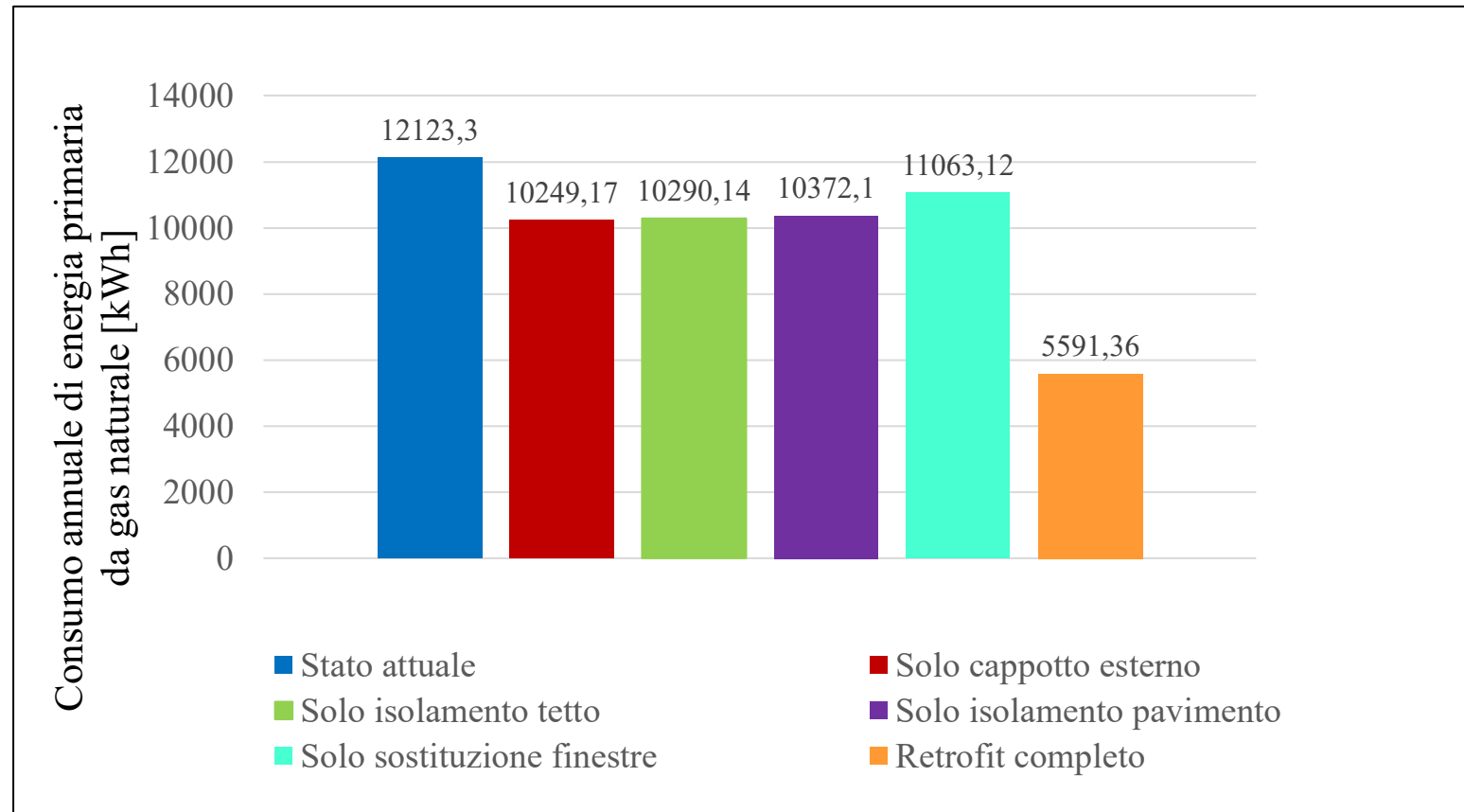
- L'impianto fotovoltaico attuale (3 kW_p) è costituito da 12 moduli in silicio policristallino di potenza nominale 250 W ciascuno, per una superficie utile totale di 19,2 m².

Zona climatica	Pareti perimetrali	Coperture e tetti	Pavimenti	Infissi
A	0,38	0,27	0,40	2,60
B	0,38	0,27	0,40	2,60
C	0,30	0,27	0,30	1,75
D	0,26	0,22	0,28	1,67
E	0,23	0,20	0,25	1,30
F	0,22	0,19	0,23	1,00

Limiti di trasmittanza termica [W/m²K] per poter beneficiare delle agevolazioni fiscali (dal decreto attuativo del MISE del 6 agosto 2020)

Struttura	Trasmittanza in seguito al retrofit $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$
Muratura delle pareti verticali est e ovest	0,218
Pavimento	0,19
Tetto	0,238
Finestre	1

$$\Delta E_p = E_{P_{attuale}} - E_{P_{finale}}$$



Con **retrofit completo dell'involucro** il risparmio di energia primaria risulta: $\Delta E_P \cong 6531,94 \frac{kWh}{anno}$ (−54%)

• **Dimensionamento:**

$$P_n[\text{kW}] = \frac{[\text{Fabbisogno termico} \times (20^\circ\text{C} - \text{Tempertura min. progetto})]}{(\text{GradiGiorno} \times \text{Ore riscaldamento giornaliera})}$$



• **Riscaldamento invernale:**

$$Q_c = \frac{E_T}{\eta_d \eta_{reg} \eta_e} \longrightarrow E_{E_{heating}} = \frac{Q_c}{COP} \longrightarrow E_{E_{fossile}} = 0,57 E_{E_{heating}} \longrightarrow E_{P_{fin}} = \frac{E_{E_{fossile}}}{0,46}$$

• **Raffrescamento estivo:**

$$E_{cooling} \longrightarrow E_{E_{cooling}} = \frac{E_{cooling}}{EER}$$

In presenza di retrofit completo dell'involucro si ottiene:

$$E_{E_{heating}} = 1085 \frac{\text{kWh}}{\text{anno}} \longrightarrow E_{E_{PdC}} = 1313 \frac{\text{kWh}}{\text{anno}} \longrightarrow E_{totale} = E_{E_{altro}} + E_{E_{PdC}} = 7240 \frac{\text{kWh}}{\text{anno}}$$

$$E_{E_{cooling}} = 227,8 \frac{\text{kWh}}{\text{anno}}$$

Caldaia da $\eta_c = 0,9$ \longrightarrow $\eta_g = \eta_c \eta_d \eta_{reg} \eta_e = 0,821$

E_T \longrightarrow $E_{P_{fin}} = \frac{E_T}{\eta_g}$ [kWh/anno]

Per il pellet si considera un potere calorifico $LHV = 19 \frac{MJ}{kg} = 5,278 kWh/kg$.

$$m_{pellet} = \frac{E_{P_{fin}}}{LHV} \text{ [kg/anno]}$$

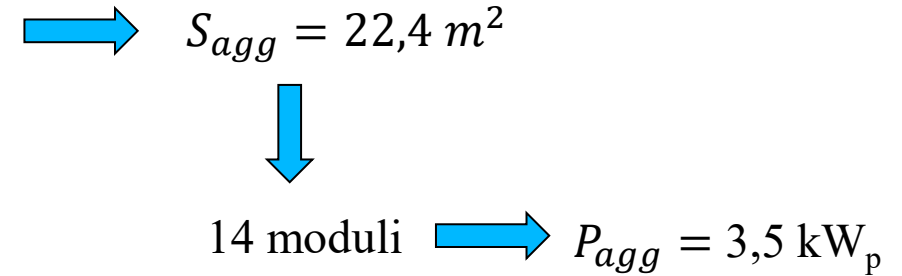
$m_{pellet} \cong 2527 \text{ kg/anno}$ senza retrofit dell'involucro

$m_{pellet} \cong 1165 \text{ kg/anno}$ con retrofit dell'involucro



1. Ampliamento dell'impianto fotovoltaico

Irradiazione su superficie orizzontale [kWh/m ² anno]	1400
Inclinazione del tetto	20°
Orientamento	Est-Ovest
Rendimento di conversione	0,86
Efficienza dei moduli	0,15



2. Sistema di accumulo

$$E_{storage} = \frac{2896 \text{ kWh/anno}}{320 \text{ cicli/anno}} = 9,05 \text{ kWh}$$

Grazie ad esso l'autoconsumo passa dal 35% al 75% del consumo elettrico totale di **7240 kWh/anno**, ovvero **5430 kWh/anno**. L'energia elettrica prelevata dalla rete scende allora a **1810 kWh/anno**.

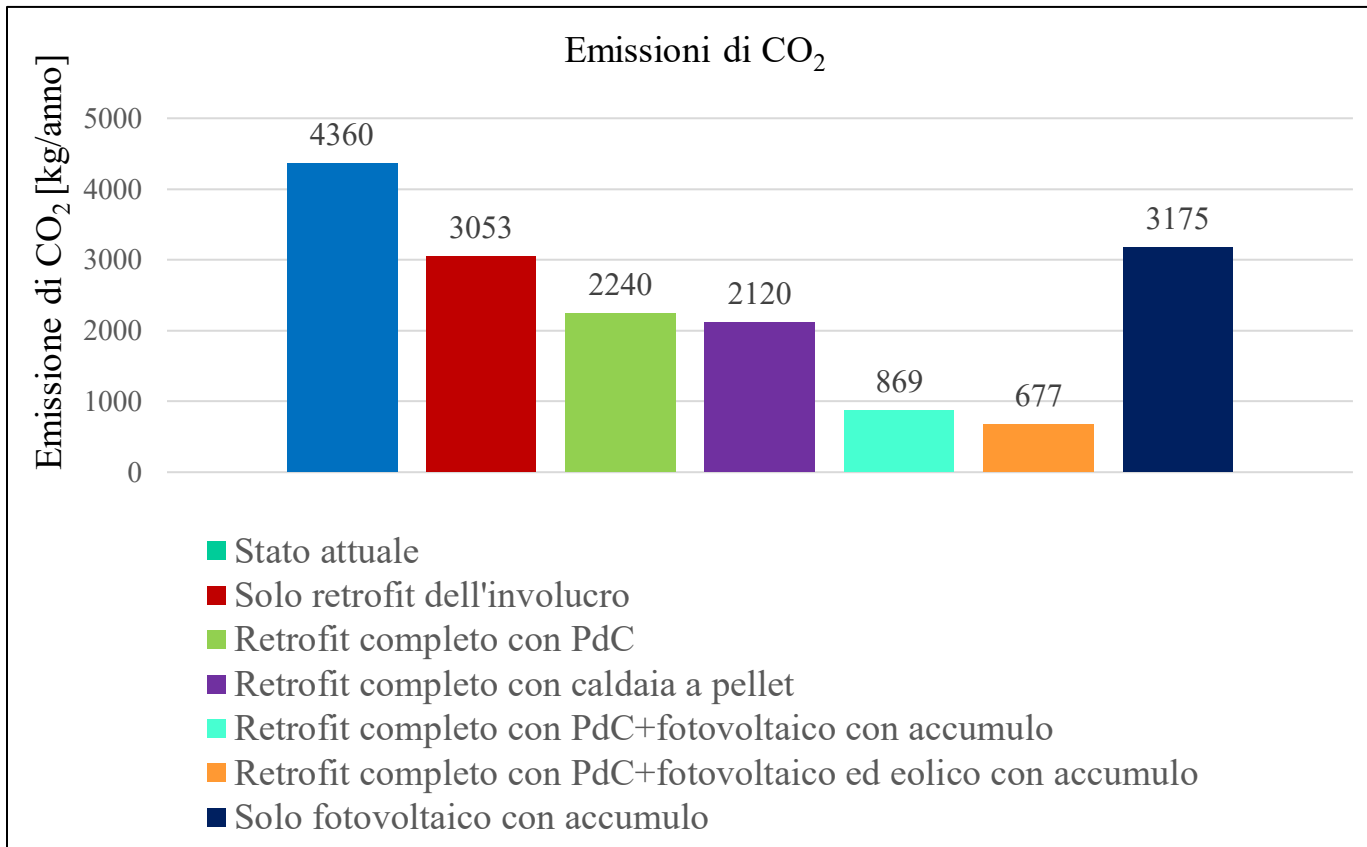
3. Turbina eolica domestica (1 kW)

$E_E = 400 \text{ kWh/anno}$ \rightarrow l'energia prelevata scende a **1410 kWh/anno**

$$\Delta M_{CO_2} = M_{attuale} - M_{nuovo} \quad [\text{kg/anno}]$$

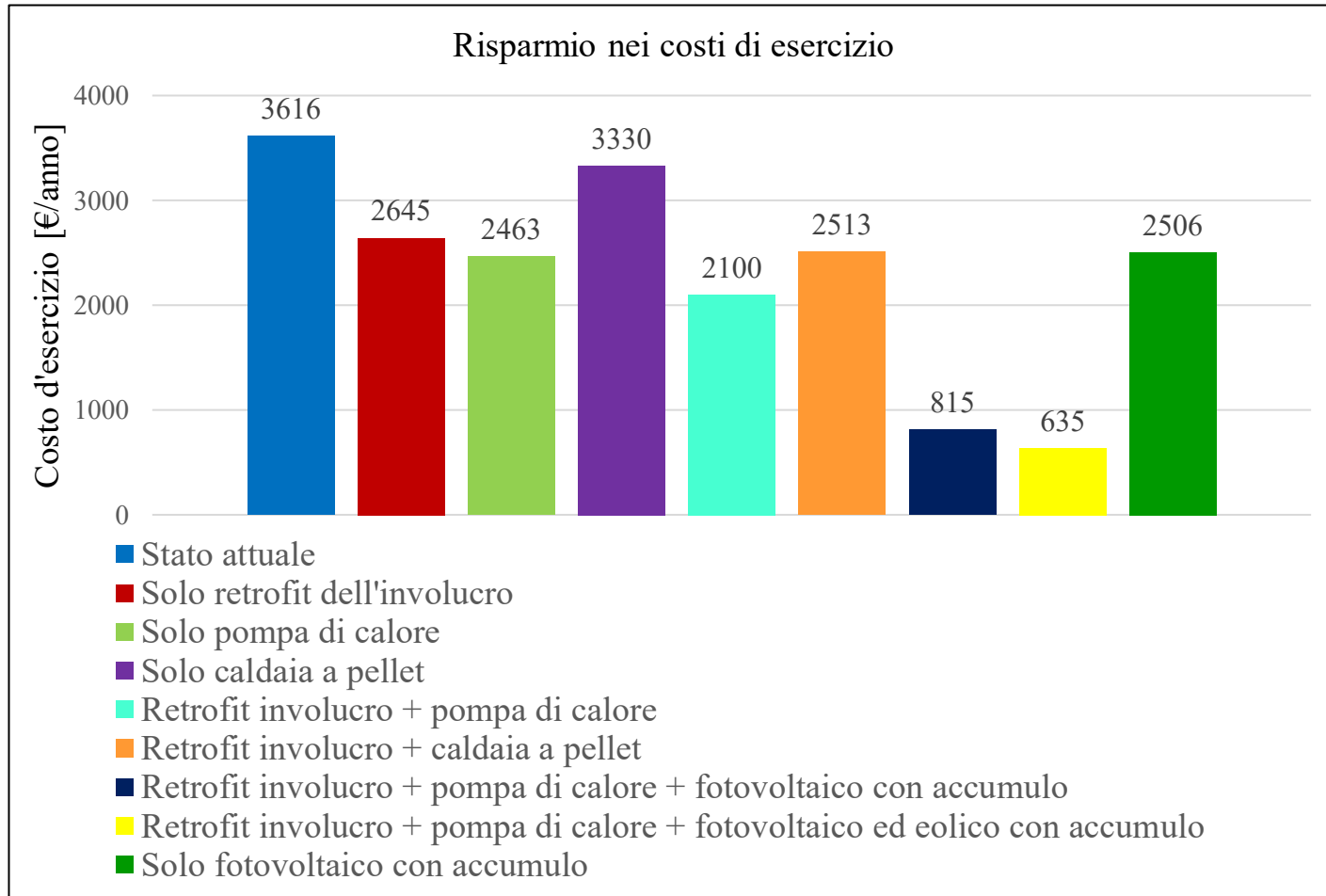
$$F_{GN} = 0,20 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \quad F_{pellet} = 0,03 \text{ kg/kWh}$$

$$F_{EE} = 0,48 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$$



Tipo di intervento	$\Delta M_{CO_2} \%$
Retrofit completo dell'involucro	-30%
Solo pompa di calore	-40%
Pompa di calore + involucro	-48,6%
Solo caldaia a pellet	-46,4%
Caldaia a pellet + involucro	-51%
Pompa di calore + involucro + fotovoltaico con accumululo	-80%
Pompa di calore + involucro + fotovoltaico ed eolico con accumululo	-84,5%
Solo fotovoltaico con accumululo	-27%

$$\Delta CE = CE_{attuale} - CE_{nuovo} \quad [€/anno]$$

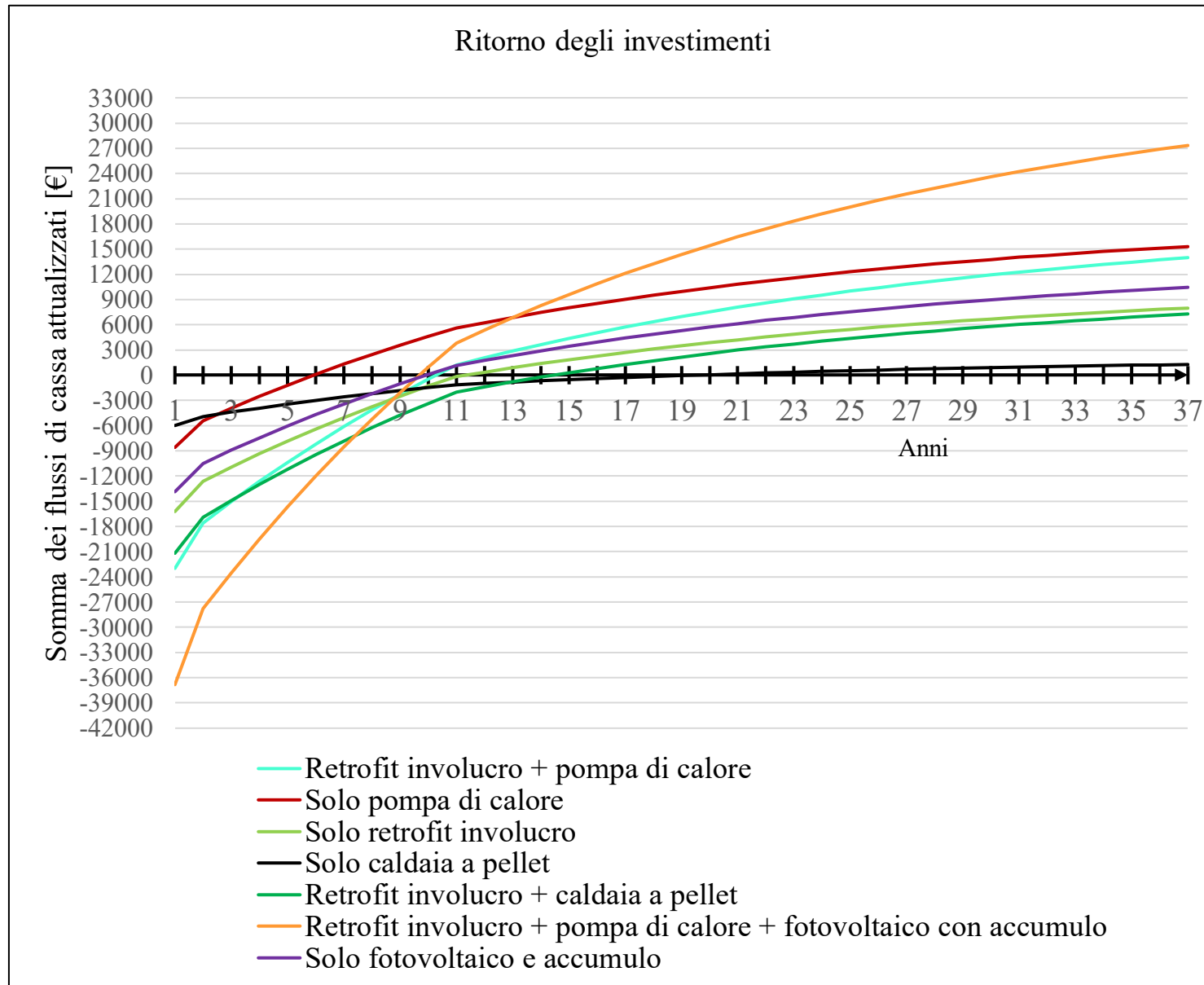


Elettricità (c_e)	0,45 €/kWh
Gas naturale (c_g)	1,43 €/smc
Pellet (c_p)	0,60 €/kg

Tipo di intervento	ΔCE [€/anno]
Solo retrofit dell'involucro	971
Solo pompa di calore	1153
Solo caldaia a pellet	286
Retrofit involucro + pompa di calore	1516
Retrofit involucro + caldaia a pellet	1103
Retrofit involucro + PdC + fotovoltaico con accumulo	2801
Retrofit involucro + PdC + fotovoltaico ed eolico con accumulo	2981
Solo fotovoltaico con accumulo	1110

$$SPB = \frac{I_0}{\Delta CE} \text{ [anni]}$$

Tipo di intervento	SPB [anni]
Solo retrofit dell'involucro	16,7
Solo pompa di calore	7,5
Solo caldaia a pellet	21
Retrofit involucro + pompa di calore	15,2
Retrofit involucro + caldaia a pellet	19,2
Retrofit involucro + PdC + fotovoltaico con accumulo	13
Retrofit involucro + PdC + fotovoltaico ed eolico con accumulo	13
Solo fotovoltaico con accumulo	12,5



Tipo di intervento	I₀	DPB [anni]	VAN dopo 20 anni [€]	IP dopo 20 anni	ΔCE%	ΔM_{CO2}%
Solo involucro	16203	11	3857	0,238	-27%	-30%
Solo pompa di calore	8600	6	10412	1,21	-32%	-40%
Solo caldaia a pellet	6000	19	56	0,009	-8%	-48,6%
Pompa di calore + involucro	23003	10	7520	0,327	-42%	-46,4%
Caldaia a pellet + involucro	21203	14	2579	0,122	-30%	-51%
Involucro + pompa di calore + fotovoltaico con accumulo	36853	10	15437	0,419	-77%	-80%
Solo fotovoltaico con accumulo	13850	10	5735	0,414	-31%	-27%