# **POLITECNICO DI TORINO**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

Elettrificazione dei consumi energetici di un complesso residenziale mediante l'introduzione di fonti rinnovabili



# Relatore

Prof. Pierluigi Leone

Co-relatori

Chiara Delmastro

Enrico Vaccariello

**Candidato** 

Nicola Giordano

## ABSTRACT - SINTESI

L'introduzione di fonti rinnovabili nel settore residenziale cresce di anno in anno in Italia. Le tecnologie che sfruttano l'energia solare sono le più convenienti dal punto di vista economico, e per questo sono quelle che vengono installate di più, soprattutto i pannelli fotovoltaici. A fronte di una così cospicua generazione di energia non corrisponde tuttavia un adeguato autoconsumo della stessa. I sistemi di condizionamento degli ambienti che potrebbero utilizzare questa energia prodotta, vale a dire delle pompe di calore per esempio, non hanno subito la stessa diffusione.

Lo scopo dello studio è quello di elettrificare i consumi energetici di un complesso residenziale sito in Torino, mediante l'introduzione di fonti rinnovabili, ma al tempo stesso promuovendo un adeguato autoconsumo. Si propone pertanto una soluzione, dal punto di vista impiantistico, composta da unità che funzionano sia come pompa di calore che come refrigeratore, pannelli fotovoltaici e batterie elettriche. Si vuole anche dimostrare la fattibilità economica dell'impianto proposto.

La tesi è strutturata in sei capitoli: introduzione, in cui viene identificato il caso studio; procedura di calcolo dei profili di fabbisogno energetico, dove vengono calcolate le domande di energia per riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria ed elettrodomestici; l'impianto proposto, capitolo nel quale si descrive la composizione proposta dell'impianto e come esso determina l'elettrificazione dei consumi; simulazione con HOMER PRO del caso studio elettrificato, in cui viene impostata ed eseguita la simulazione volta all'ottimizzazione della composizione dell'impianto proposto e all'analisi di sensitività per alcune variabili; analisi economica, dove viene descritta la procedura per arrivare al risultato della fattibilità economica; conclusione, capitolo conclusivo con alcune osservazioni e spunti per sviluppi futuri.

I risultati conseguiti sono l'elettrificazione dei consumi, l'ottimizzazione della composizione dell'impianto, che ha portato all'eliminazione delle batterie, la dimostrazione della fattibilità economica del sistema impiantistico proposto.

A fronte di un investimento iniziale di 3,87 milioni di euro, i tempi di ritorno dell'investimento variano, in base alla presenza o meno e al valore del tasso reale di sconto, da 8 anni e mezzo a 12 anni e mezzo circa.

# Sommario

| 1 – INTRODUZIONE  | 4  |
|---|----|
| 1.1 – Obiettivo dello studio  | 4  |
| 1.2 – Identificazione geografica del caso studio  | 4  |
| 1.3 – IDENTIFICAZIONE GEOMETRICA DEL CASO STUDIO  | 5  |
| 1.4 – CARATTERIZZAZIONE DELLE SUPERFICI DI SCAMBIO TERMICO                              | 6  |
| 2 – PROCEDURA DI CALCOLO DEI PROFILI DI FABBISOGNO ENERGETICO                           | 8  |
| 2.1 – Profilo orario di domanda elettrica per gli elettrodomestici (EL)                 | 8  |
| 2.2 – Profilo orario di domanda termica per il riscaldamento (SH)                       |    |
| 2.3 – Profilo orario di domanda termica per l'acqua calda sanitaria (ACS)               |    |
| 2.4 – Profilo orario di domanda termica per il condizionamento estivo (SC)              |    |
| 2.4.1 – Temperatura percepita   |    |
| 2.4.2 – Potenza termica scambiata per trasmissione attraverso le superfici trasparenti  |    |
| 2.4.3 – Potenza termica scambiata per irraggiamento attraverso le superfici trasparenti |    |
| 2.4.4 – Temperatura sole aria   |    |
| 2.4.5 – Potenza termica scambiata attraverso le superfici opache                        |    |
| 2.4.6 – Tabelle per trasmittanze e aree calcolate                                       |    |
| 2.4.7 – Potenza termica scambiata dalle persone   |    |
| 2.4.8 – Numero di persone presenti attive   |    |
| 2.5 – Profili orari di domanda ottenuti e grafici corrispettivi                         | 24 |
| 3 – L'IMPIANTO PROPOSTO   | 26 |
| 3.1 – Elettrificazione dei consumi  | 26 |
| 3.2 – L'UNITÀ POLIVALENTE   | 26 |
| 3.2.1 – Funzionamento   | 27 |
| 3.2.2 – Dimensionamento   | 30 |
| 3.2.4 – COP   | 31 |
| 3.2.5 – EER   | 32 |
| 3.2.6 – Profili orari elettrificati ottenuti e confronto con i profili orari termici    | 34 |
| 3.3 – VENTILCONVETTORI  | 35 |
| 3.4 – PANNELLI SOLARI FOTOVOLTAICI  | 36 |
| 3.4.1 – Dimensionamento   | 37 |
| 3.5 – Batterie elettriche   | 38 |
| 4 – SIMULAZIONE CON HOMER PRO DEL CASO STUDIO ELETTRIFICATO                             | 39 |
| 4.1 – GLI INPUT NECESSARI   | 39 |
| 4.1.1 – Carico elettrico  | 39 |
| 4.1.2 – Pannelli fotovoltaici   | 40 |
| 4.1.3 – Batterie elettriche   | 41 |
| 4.1.4 – Rete elettrica  | 42 |
| 4.1.5 – Convertitore  | 44 |
| 4.1.6 – Risorse   | 45 |
| 4.1.7 – Controller  | 45 |
| 4.1.8 – Economia  | 45 |
| 4.1 – SCHEMA DEL SISTEMA  | 46 |
| 4.2 – RISULTATI DELLE SIMULAZIONI   | 47 |
| 4.2.1 – Sensitività   | 47 |

| 4.2.2 – Ottimizzazione   |
|--|
| 4.2.3 – Pannelli fotovoltaici                                  |
| 4.2.4 –Rete elettrica50  |
| 4.2.5 – Valori energetici su base mensile50                    |
| 5 – ANALISI ECONOMICA51  |
| 5.1 – SIMULAZIONE CON HOMER PRO DEL CASO BASE                  |
| 5.1.1 – Carichi e componenti51                                 |
| 5.1.2 – Economia53   |
| 5.1.3 – Risultati della simulazione del caso base53            |
| 5.2 – Valore Attuale Netto                                     |
| 5.2.1 – Flussi di cassa, risparmi energetici54                 |
| 5.2.2 – Flussi di cassa, sostituzione degli inverter56         |
| 5.2.3 – Flussi di cassa, detrazioni IRPEF o sconti immediati56 |
| 5.3 – RISULTATI  |
| 5.3.1 – Caso detrazione IRPEF57                                |
| 5.3.2 – Caso sconto immediato59                                |
| 6 – CONCLUSIONI  |
| 6.1 – OSSERVAZIONI E SVILUPPI FUTURI                           |
| APPENDICE 164  |
| APPENDICE 265  |
| BIBLIOGRAFIA80   |

## 1 – Introduzione

#### 1.1 – Obiettivo dello studio

L'obiettivo dello studio è l'elettrificazione dei consumi energetici di un complesso residenziale di 20 edifici, situato in Torino, mediante l'introduzione di fonti rinnovabili. Si vuole dimostrare inoltre la fattibilità economica di tale soluzione impiantistica proposta.

## 1.2 – Identificazione geografica del caso studio

La città di Torino è suddivisa in 10 circoscrizioni, e il complesso residenziale in esame si trova all'interno della circoscrizione 3, in figura 1-1.



Figura 1-1 – Mappa della Circoscrizione 3. © Città di Torino, Ufficio D.I.A.N.A., Servizi Cartografici

Il complesso è composto da 20 edifici, sezione di censimento 2080, ed è asservito dalla rete di teleriscaldamento.

In figura 1-2 è raffigurato in dettaglio il complesso residenziale del caso studio. Esso compone una forma triangolare e presenta un cortile interno in cui c'è spazio per installazioni esterne. Sono presenti degli alberi intorno e all'interno, ma sono meno alti degli edifici, motivo per il quale non costituiscono ombreggiamento per eventuali pannelli solari sul tetto.



Figura 1-2 – Dettaglio degli edifici del caso studio

# 1.3 – Identificazione geometrica del caso studio

Questo complesso raccoglie varie tipologie di edifici, con epoche di costruzione che vanno dagli anni '20-'40 agli anni '60, e hanno un numero di piani compreso tra 3 a 10. La caratterizzazione geometrica è la seguente.

| Edifici | Piani | Epoca di costr. | Tipologia | Altezza [m] | Area [m²] | Perimetro [m] |
|---------|-------|-----------------|-----------|-------------|-----------|---------------|
| 1       | 3     | 1919 - 1945     | MF        | 13,7        | 224       | 61            |
| 2       | 6     | 1946 - 1960     | MF        | 23,2        | 120       | 49            |
| 3       | 6     | 1946 - 1960     | AB        | 23,7        | 271       | 68            |
| 4       | 3     | 1946 - 1960     | MF        | 12,7        | 230       | 64            |
| 5       | 6     | 1961 - 1970     | AB        | 24,7        | 143       | 50            |
| 6       | 5     | 1961 - 1970     | MF        | 20,7        | 157       | 56            |
| 7       | 10    | 1961 - 1970     | AB        | 37,3        | 718       | 162           |
| 8       | 5     | 1961 - 1970     | MF        | 23,0        | 141       | 54            |
| 9       | 5     | 1961 - 1970     | AB        | 24,0        | 141       | 54            |
| 10      | 5     | 1961 - 1970     | AB        | 24,0        | 137       | 53            |
| 11      | 5     | 1961 - 1970     | AB        | 24,0        | 140       | 54            |
| 12      | 5     | 1961 - 1970     | MF        | 24,0        | 135       | 53            |
| 13      | 4     | 1961 - 1970     | MF        | 18,5        | 292       | 87            |
| 14      | 5     | 1961 - 1970     | MF        | 20,1        | 235       | 64            |
| 15      | 4     | 1961 - 1970     | AB        | 18,4        | 132       | 52            |
| 16      | 5     | 1961 - 1970     | AB        | 21,7        | 77        | 47            |
| 17      | 4     | 1961 - 1970     | MF        | 18,4        | 123       | 51            |
| 18      | 7     | 1961 - 1970     | MF        | 27,8        | 290       | 93            |
| 19      | 10    | 1961 - 1970     | AB        | 36,7        | 447       | 107           |
| 20      | 10    | 1961 - 1970     | AB        | 35,7        | 321       | 79            |

Tabella 1-1 – Caratterizzazione geometrica

La tipologia è definita come segue:

- AB apartment block;
- MF multifamily.

Queste tipologie serviranno per la caratterizzazione delle superfici di scambio termico.

Torino si trova in zona climatica E, in cui la stagione di riscaldamento va dal 15 Ottobre al 14 Aprile, con 14 ore permesse al giorno, dalle 7:00 alle 23:00.

## 1.4 – Caratterizzazione delle superfici di scambio termico

Tramite il *TABULA WebTool* [1], sono state caratterizzate le superfici, opache e trasparenti, degli edifici del caso studio, selezionando gli edifici per tipologia ed epoca di costruzione. In *Appendice 1* vengono riportati i dati prelevati da *TABULA WebTool*, che vengono utilizzati per la caratterizzazione delle superfici di scambio termico degli edifici del complesso residenziale, riassunto in tabella 1-4.

| U <sub>wall</sub><br>[W/m <sup>2</sup> K] | A <sub>wall</sub><br>[m²] | U <sub>roof</sub><br>[W/m²K] | A <sub>roof</sub><br>[m²] | U <sub>floor</sub><br>[W/m²K] | A <sub>floor</sub><br>[m²] | U <sub>win</sub><br>[W/m²K] | A <sub>wi</sub><br>[m²] |
|---|---------------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 1,29                                      | 759                       | 1,48                         | 224                       | 1,23                          | 224                        | 4,9                         | 79                      |
| 1,42                                      | 676                       | 1,1                          | 120                       | 0,94                          | 120                        | 4,9                         | 161                     |
| 1,34                                      | 884                       | 1,1                          | 271                       | 0,94                          | 271                        | 4,9                         | 134                     |
| 1,42                                      | 654                       | 1,1                          | 230                       | 0,94                          | 230                        | 4,9                         | 156                     |
| 1,04                                      | 609                       | 1,1                          | 143                       | 1,3                           | 143                        | 4,9                         | 66                      |
| 1,15                                      | 832                       | 1,1                          | 157                       | 0,94                          | 157                        | 4,9                         | 74                      |
| 1,04                                      | 5454                      | 1,1                          | 718                       | 1,3                           | 718                        | 4,9                         | 593                     |
| 1,15                                      | 836                       | 1,1                          | 141                       | 0,94                          | 141                        | 4,9                         | 74                      |
| 1,04                                      | 542                       | 1,1                          | 141                       | 1,3                           | 141                        | 4,9                         | 59                      |
| 1,04                                      | 519                       | 1,1                          | 137                       | 1,3                           | 137                        | 4,9                         | 56                      |
| 1,04                                      | 532                       | 1,1                          | 140                       | 1,3                           | 140                        | 4,9                         | 58                      |
| 1,15                                      | 844                       | 1,1                          | 135                       | 0,94                          | 135                        | 4,9                         | 75                      |
| 1,15                                      | 1469                      | 1,1                          | 292                       | 0,94                          | 292                        | 4,9                         | 130                     |
| 1,15                                      | 1184                      | 1,1                          | 235                       | 0,94                          | 235                        | 4,9                         | 105                     |
| 1,04                                      | 550                       | 1,1                          | 132                       | 1,3                           | 132                        | 4,9                         | 60                      |
| 1,04                                      | 376                       | 1,1                          | 77                        | 1,3                           | 77                         | 4,9                         | 41                      |
| 1,15                                      | 639                       | 1,1                          | 123                       | 0,94                          | 123                        | 4,9                         | 56                      |
| 1,15                                      | 2383                      | 1,1                          | 290                       | 0,94                          | 290                        | 4,9                         | 211                     |
| 1,04                                      | 3181                      | 1,1                          | 447                       | 1,3                           | 447                        | 4,9                         | 346                     |
| 1,04                                      | 2204                      | 1,1                          | 321                       | 1,3                           | 321                        | 4,9                         | 240                     |

Tabella 1-2 – Caratterizzazione delle superfici di scambio termico

# Con ${\it U}$ trasmittanza termica; i pedici si riferiscono a:

- wall: pareti verticali;
- roof: tetto, sezione orizzontale;
- floor: superficie a contatto con il terreno;
- win: finestra, compresa di telaio e vetro.

# 2 – Procedura di calcolo dei profili di fabbisogno energetico

L'analisi energetica proposta è su base oraria, pertanto si ha bisogno dei profili orari di domanda termica ed elettrica. In questo capitolo viene esaminata la metodologia tramite la quale sono stati calcolati i profili, elettrici e termici, degli edifici del caso studio. La domanda elettrica è quella relativa al funzionamento degli elettrodomestici. Le componenti che formano la domanda termica sono il riscaldamento (SH), l'acqua calda sanitaria (ACS) e il condizionamento estivo (SC). Quest'ultimo termine, il condizionamento estivo, verrà trattato prima come domanda termica in questo capitolo, per esporne le procedure di calcolo; successivamente, verrà convertito in domanda elettrica, dopo aver descritto l'impianto proposto. Per questo motivo, i grafici dei profili ottenuti verranno presentati dopo aver avuto un quadro completo dell'impianto.

## 2.1 – Profilo orario di domanda elettrica per gli elettrodomestici (EL)

Per calcolare questo profilo di domanda elettrica, si parte dalla suddivisione delle famiglie in gruppi sociali (tipologie di famiglie), come indicato in figura 2-1 [2].

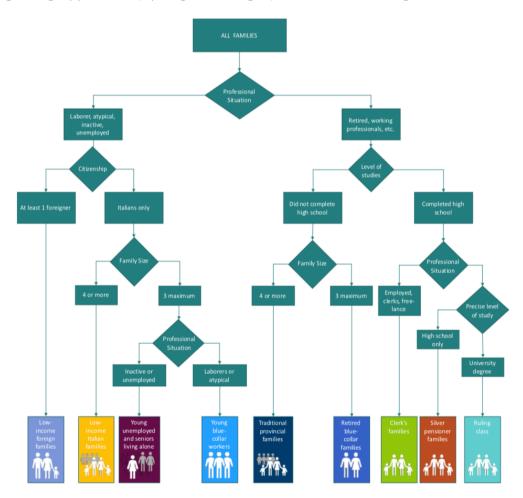


Figura 2-1 – Classificazione delle famiglie in gruppi sociali [44 tesi tara]

Su gentile concessione dell'autrice di [2] si sono avuti a disposizione:

- i dati di domanda elettrica degli elettrodomestici suddivisi per gruppo sociale, su base oraria;
- la composizione percentuale delle famiglie in gruppi sociali, valida proprio per la circoscrizione 3 di Torino (tabella 2-2).

Nella tabella 2-1, un esempio della domanda elettrica per gli elettrodomestici relativa ad ogni tipologia di famiglia, a mezzanotte di ogni primo del mese, per tutto l'anno. Le tipologie sono identificate come segue:

- 0. Ruling class;
- 1. Silver pensioners;
- 2. Clerks' households;
- 3. Young blue-collars;
- 4. Retired blue-collars' households;
- 5. Lonely old ladies and young unemployed;
- 6. Traditional provincial households;
- 7. Low-income Italian households;
- 8. Low-income households with foreigners.

| Profili orari di domanda elettrica per gruppo sociale [W] |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Data e ora  | 0   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |
| 01/01/13 00:00  | 101 | 65  | 94  | 65  | 65  | 65  | 65  | 90  | 94  |
| 01/02/13 00:00  | 63  | 65  | 63  | 65  | 65  | 103 | 65  | 146 | 63  |
| 01/03/13 00:00  | 63  | 65  | 63  | 65  | 65  | 128 | 65  | 171 | 63  |
| 01/04/13 00:00  | 163 | 189 | 187 | 165 | 189 | 189 | 320 | 289 | 212 |
| 01/05/13 00:00  | 126 | 65  | 126 | 65  | 65  | 65  | 65  | 103 | 126 |
| 01/06/13 00:00  | 63  | 65  | 63  | 65  | 65  | 65  | 178 | 65  | 63  |
| 01/07/13 00:00  | 287 | 178 | 263 | 134 | 178 | 263 | 315 | 415 | 263 |
| 01/08/13 00:00  | 63  | 65  | 63  | 65  | 65  | 127 | 65  | 128 | 63  |
| 01/09/13 00:00  | 63  | 65  | 306 | 65  | 65  | 65  | 65  | 278 | 63  |
| 01/10/13 00:00  | 63  | 65  | 63  | 103 | 65  | 90  | 128 | 65  | 63  |
| 01/11/13 00:00  | 63  | 90  | 63  | 65  | 90  | 115 | 65  | 65  | 63  |
| 01/12/13 00:00  | 63  | 65  | 63  | 65  | 65  | 65  | 65  | 271 | 63  |

Tabella 2-1 – Dati di domanda elettrica oraria per gruppo sociale [1]

| 0   | 1   | 2   | 3  | 4   | 5   | 6  | 7  | 8  |
|-----|-----|-----|----|-----|-----|----|----|----|
| 10% | 13% | 24% | 9% | 24% | 11% | 3% | 1% | 3% |

Tabella 2-2 – Composizione percentuale

Il numero di famiglie presenti negli edifici del caso studio viene calcolato elaborando alcuni dati del censimento dell'ISTAT del 2011 [3].

| Popolazione                            | 872367   |
|--|----------|
| Famiglie                               | 419449   |
| Persone per famiglia                   | 2,06     |
| Superficie degli edifici occupati [m²] | 35194516 |

Tabella 2-3 – Censimento ISTAT 2011, Torino

In tabelle 2-4, vi sono invece alcuni dati elaborati per adattare i dati ISTAT al caso studio.

| Superficie abitata del caso studio [m²] | 29.439     |
|---|------------|
| Densità [pers/m²]                       | 0,02478702 |
| Persone del caso studio                 | 730        |
| Famiglie del caso studio                | 355        |

Tabella 2-4 – Dati elaborati per il caso studio

Dove la superficie abitata del caso studio è calcolata come

$$SUP_{caso\ studio} = \sum_{i=1}^{N_{edifici}} SUP_i \cdot N_{piani,i}$$
 (2.1)

Con

- *i* i-esimo edificio;
- SUP<sub>i</sub> area occupata dall'edificio i-esimo;
- *N*<sub>piani,i</sub> numero di piani dell'edificio i-esimo.

La densità è calcolata dividendo la popolazione di Torino per la superficie degli edifici occupati, e poi le persone del caso studio sono ottenute conseguentemente moltiplicando la densità per la superficie abitata del caso studio, arrotondando per eccesso.

Il profilo orario di domanda elettrica per gli elettrodomestici  $P_{h,EL}$  viene quindi calcolato moltiplicando il profilo orario di domanda elettrica per famiglia, formata secondo la composizione percentuale dei gruppi sociali,  $P_{h,fam,media}$ , per il numero di famiglie del caso studio  $N_{fam}$ 

$$P_{h,EL} = \frac{1}{1000} P_{h,fam,media} \cdot N_{fam}$$
 (2.2)

Con h ora che va da 1 a 8760 (ore dell'anno).

| Ora | P <sub>h,fam,media</sub> [W] | P <sub>h,EL</sub> [kW] |
|-----|------------------------------|------------------------|
| 1   | 65                           | 23,204                 |
| 2   | 65                           | 22,899                 |
| 3   | 65                           | 22,899                 |
| 4   | 65                           | 23,051                 |
| 5   | 69                           | 24,543                 |
| 6   | 117                          | 41,560                 |
| 7   | 237                          | 84,039                 |
| 8   | 315                          | 111,802                |
| 9   | 301                          | 106,967                |
| 10  | 145                          | 51,566                 |
| 11  | 294                          | 104,433                |
| 12  | 160                          | 56,641                 |
| 13  | 234                          | 83,075                 |
| 14  | 77                           | 27,420                 |
| 15  | 115                          | 40,845                 |
| 16  | 168                          | 59,625                 |
| 17  | 123                          | 43,712                 |
| 18  | 262                          | 93,093                 |
| 19  | 279                          | 99,091                 |
| 20  | 285                          | 101,021                |
| 21  | 254                          | 90,339                 |
| 22  | 143                          | 50,868                 |
| 23  | 137                          | 48,600                 |
| 24  | 76                           | 27,042                 |

Tabella 2-5 – Esempio 1° Gennaio di potenza per famiglia media

#### 2.2 – Profilo orario di domanda termica per il riscaldamento (SH)

Su gentile concessione dell'Ing. Chiara Delmastro, si sono avuti a disposizione: l'indice di prestazione energetica per il riscaldamento degli edifici del caso studio, espresso in  $kWh/m^2y$ ; il profilo di domanda termica, relativo all'anno 2014, della rete totale di teleriscaldamento di Torino. L'obiettivo è di passare dal profilo termico della rete totale di teleriscaldamento, a quello relativo al caso studio, utilizzando gli opportuni coefficienti correttivi. Il fabbisogno termico totale  $E_{rete,SH+ACS}$  coperto dalla rete di teleriscaldamento è calcolato come

$$E_{rete,SH+ACS} = \frac{1}{1000} \sum_{h=1}^{8760} P_{h,SH+ACS} = 1970 \ GWh/y$$
 (2.3)

Con

- h ora, che va da 1 a 8760;
- P<sub>h</sub> potenza termica richiesta alla determinata ora h, espressa in MW;

Alcuni edifici, ma non tutti, utilizzano il teleriscaldamento non solo per il riscaldamento degli ambienti, ma anche per l'ACS, per questo il profilo di domanda termica al di fuori della stagione di riscaldamento viene ipotizzato come imputabile alla sola ACS, e quindi esteso a tutto l'anno e sottratto al profilo totale (SH+ACS). In tabella 2-6, un esempio di come vengono trattati un giorno all'interno della stagione di riscaldamento e uno al di fuori.

|     | Profilo orario | di rete 1° D | Profilo ora | rio di rete 1° | Luglio      |            |
|-----|----------------|--------------|-------------|----------------|-------------|------------|
| Ora | SH+ACS [MW]    | ACS [MW]     | SH [MW]     | SH+ACS<br>[MW] | ACS<br>[MW] | SH<br>[MW] |
| 1   | 159,32         | 28,35        | 0,00        | 17,72          | 17,72       | 0,00       |
| 2   | 169,15         | 26,66        | 0,00        | 14,55          | 14,55       | 0,00       |
| 3   | 179,88         | 27,01        | 0,00        | 27,73          | 27,73       | 0,00       |
| 4   | 193,86         | 26,23        | 0,00        | 25,42          | 25,42       | 0,00       |
| 5   | 236,46         | 28,79        | 0,00        | 23,26          | 23,26       | 0,00       |
| 6   | 387,75         | 29,48        | 0,00        | 25,61          | 25,61       | 0,00       |
| 7   | 1055,19        | 35,05        | 1020,14     | 28,08          | 28,08       | 0,00       |
| 8   | 1036,49        | 37,78        | 998,71      | 28,70          | 28,70       | 0,00       |
| 9   | 868,89         | 37,18        | 831,71      | 28,47          | 28,47       | 0,00       |
| 10  | 787,37         | 38,27        | 749,11      | 28,26          | 28,26       | 0,00       |
| 11  | 658,17         | 34,94        | 623,24      | 27,38          | 27,38       | 0,00       |
| 12  | 737,41         | 49,25        | 688,16      | 26,47          | 26,47       | 0,00       |
| 13  | 777,42         | 41,95        | 735,47      | 25,66          | 25,66       | 0,00       |
| 14  | 728,86         | 43,43        | 685,43      | 25,53          | 25,53       | 0,00       |
| 15  | 639,88         | 20,19        | 619,69      | 24,96          | 24,96       | 0,00       |
| 16  | 652,22         | 35,93        | 616,29      | 24,20          | 24,20       | 0,00       |
| 17  | 741,14         | 37,32        | 703,82      | 24,14          | 24,14       | 0,00       |
| 18  | 728,76         | 44,78        | 683,99      | 25,88          | 25,88       | 0,00       |
| 19  | 739,62         | 23,23        | 716,38      | 24,71          | 24,71       | 0,00       |
| 20  | 734,74         | 35,89        | 698,85      | 24,59          | 24,59       | 0,00       |
| 21  | 724,02         | 41,09        | 682,93      | 24,10          | 24,10       | 0,00       |
| 22  | 611,08         | 40,65        | 570,43      | 23,21          | 23,21       | 0,00       |
| 23  | 240,23         | 26,48        | 213,75      | 21,69          | 21,69       | 0,00       |
| 24  | 157,25         | 29,83        | 0,00        | 14,99          | 14,99       | 0,00       |

Tabella 2-6 – Profilo SH e ACS per un giorno di riscaldamento e uno di raffrescamento

A questo punto può essere calcolato anche il fabbisogno termico di rete per il solo riscaldamento  $E_{rete,SH}$ 

$$E_{rete,SH} = \frac{1}{1000} \sum_{h=1}^{8760} P_{h,rete,SH} = 1428 \ GWh/y$$
 (2.4)

Come si può notare in tabella 2-6, il fabbisogno energetico per ACS in estate è più basso di quello presente di inverno, ma purtroppo le due componenti (SH e ACS) non possono

essere separate e non si possono sapere le quote dedicate al riscaldamento e all'ACS distintamente. Per questo, nelle ore in cui il riscaldamento non è acceso, e cioè dalle 23:00 alle 7:00, il profilo di rete per SH è stato impostato manualmente a zero. Un'altra conseguenza è che il valore sottratto per l'ACS, nelle ore di riscaldamento acceso, e cioè dalle 7:00 alle 23:00, è più basso di quello reale. Questo però succede per tutte le ore di riscaldamento, e quindi i valori di ACS più bassi di quelli reali incideranno solo sul fabbisogno termico di rete, ma non apprezzabilmente sulla forma del profilo di domanda termica per SH. Alla luce di ciò, poiché ad interessare è proprio la forma del profilo, e non il valore di  $E_{rete,SH}$ , che servirà per l'applicazione di un coefficiente correttivo, è ininfluente questa condizione di valore errato per la  $E_{rete,SH}$ .

Il fabbisogno termico  $E_{SH}$ , espresso in MWh/y per riscaldamento degli gli edifici del caso studio è calcolato con la seguente equazione

$$E_{SH} = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^{N} PE_{SH,i} \cdot Vol_{netto,i} = 4864 \ MWh/y$$
 (2.5)

Con

- *i* edificio i-esimo;
- N numero di edifici;
- PE<sub>SH,i</sub> indice di prestazione energetica dell'edificio i-esimo espresso in kWh/m3y;
- *Vol<sub>netto,i</sub>* volume netto dell'edificio i-esimo.

| Edifici | Volume netto [m <sup>3</sup> ] | PE [kWh/m³y] | Fabbisogno termico [kWh/y] |
|---------|--------------------------------|--------------|----------------------------|
| 1       | 2772,71                        | 48,61        | 134785                     |
| 2       | 2495,33                        | 38,61        | 96347                      |
| 3       | 5776,24                        | 42,22        | 243886                     |
| 4       | 2618,69                        | 38,61        | 101111                     |
| 5       | 3170,38                        | 44,17        | 140025                     |
| 6       | 2931,18                        | 52,22        | 153073                     |
| 7       | 24065,86                       | 44,17        | 1062909                    |
| 8       | 2909,19                        | 52,22        | 151924                     |
| 9       | 3042,81                        | 44,17        | 134391                     |
| 10      | 2961,92                        | 44,17        | 130818                     |
| 11      | 3013,09                        | 44,17        | 133078                     |
| 12      | 2912,22                        | 52,22        | 152083                     |
| 13      | 4851,69                        | 52,22        | 253366                     |
| 14      | 4244,29                        | 52,22        | 221646                     |
| 15      | 2192,81                        | 44,17        | 96849                      |
| 16      | 1493,3                         | 44,17        | 65954                      |
| 17      | 2038,13                        | 52,22        | 106436                     |
| 18      | 7261,21                        | 52,22        | 379197                     |
| 19      | 14752,78                       | 44,17        | 651581                     |
| 20      | 10284,86                       | 44,17        | 454248                     |

Tabella 2-7 – Calcolo del fabbisogno termico per riscaldamento degli edifici del caso studio

Il profilo orario di domanda termica per riscaldamento degli edifici del caso studio  $P_{h,SH}$  si ottiene, per ogni ora h dell'anno, applicando un coefficiente correttivo

$$P_{h,SH} = P_{h,rete,SH} \cdot \frac{E_{SH}}{E_{rete,SH}}$$
 (2.6)

Nell'equazione (2.6) è dimostrata l'ininfluenza del valore di  $E_{rete,SH}$ , perché integrando ambo i membri su tutto l'anno (h che va da 1 a 8760), si ritrova l'equazione 1=1.

### 2.3 – Profilo orario di domanda termica per l'acqua calda sanitaria (ACS)

Il procedimento di calcolo è il medesimo di quello utilizzato per il profilo per il riscaldamento, bisogna calcolare il fabbisogno di ACS delle persone presenti negli edifici del caso studio e poi applicare un coefficiente correttivo al profilo di domanda termica per ACS della rete di teleriscaldamento.

$$P_{h,ACS} = P_{h,rete,ACS} \cdot \frac{E_{ACS}}{E_{rete,ACS}}$$
 (2.7)

E<sub>rete.ACS</sub> viene calcolata come

$$E_{rete,ACS} = \frac{1}{1000} \sum_{h=1}^{8760} P_{h,rete,ACS} = 324914 \ MWh/y$$
 (2.8)

Con  $P_{h,rete,ACS}$  profilo orario di rete per ACS (esempio in tabella precedente).

Per quanto riguarda il fabbisogno per acqua calda sanitaria degli edifici del caso studio  $E_{ACS}$ , è calcolato come prodotto tra il numero di persone presenti nel complesso residenziale in esame (tabella 2-4) e il fabbisogno specifico per persona, stimato essere 1000 kWh/pers

$$E_{ACS} = 730 \ MWh/\gamma \tag{2.9}$$

Dalla equazione (2.7) si ha il profilo orario di domanda termica per ACS  $P_{h,ACS}$ .

## 2.4 – Profilo orario di domanda termica per il condizionamento estivo (SC)

Il profilo di condizionamento estivo viene calcolato con l'equazione

$$P_{h,SC} = \frac{N_{h,pr}}{N_{tot}} \cdot \left( \dot{Q}_{h,trasm,trasp} + \dot{Q}_{h,irr,trasp} + \dot{Q}_{h,op} \right) + N_{h,pr} \cdot \dot{Q}_{pe}$$
 (2.10)

Dove

- $P_{h,SC}$  è il profilo di domanda termica per SC, ad una determinata ora h;
- $N_{h,pr}$  è il numero di persone presenti attive;

- $N_{tot}$  è il numero di persone che abitano nel complesso residenziale;
- $\dot{Q}_{h,trasm,trasp}$  è la potenza termica scambiata per trasmissione attraverso le superfici trasparenti, ad una determinata ora h;
- $\dot{Q}_{h,irr,trasp}$  è la potenza termica scambiata per irraggiamento attraverso le superfici trasparenti, ad una determinata ora h;
- $\dot{Q}_{h,op}$  è la potenza termica scambiata attraverso le superfici opache, ad una determinata ora h:
- $\dot{Q}_{pe}$ è la potenza termica scambiata da ogni persona, con l'ambiente.

In questo paragrafo vengono spiegate le varie fasi che consentono di arrivare a calcolare il profilo di condizionamento estivo.

#### 2.4.1 – Temperatura percepita

La sola temperatura esterna, su base oraria, non basta per la stima del fabbisogno energetico per il condizionamento estivo, perché la sensazione di caldo dipende anche da altre condizioni ambientali, prima fra tutte l'umidità relativa, *UR*. Per esprimere questo concetto, si ricorre all'uso della temperatura percepita, stimata utilizzando un indice di calore. Esistono numerosi indici di calore, che possono variare in base al Paese, le condizioni climatiche, la sensibilità di una certa popolazione al caldo. In Italia, l'indice che viene usato più spesso è l'*indice Humidex*, valido per l'area mediterranea, per temperature da 20°C a 55°C, e per tutti i valori di umidità relativa. Tramite questo indice, la temperatura esterna *T* viene corretta come segue

$$H = T + \frac{5}{9} \left( 6,11 \cdot \frac{UR}{100} \cdot 10^{\frac{7,5T}{237,7+T}} - 10 \right)$$
 (2.11)

Dove *H* è la temperatura percepita [www.casaeclima.com].

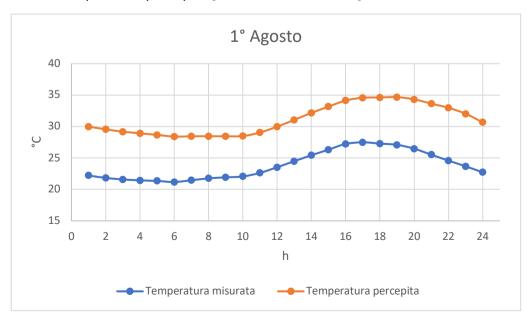


Grafico 2-1 – Confronto esempio tra temperatura misurata e percepita

Nel grafico 2-1 è mostrato l'esempio di un giorno con umidità relativa con picchi vicini al 90%. Si evidenzia come le temperature percepite siano superiori anche di 8°C a quelle misurate, a dimostrazione del fatto che l'impatto dell'umidità relativa può essere molto elevato, e non si può prescindere dal considerarlo.

Il profilo di domanda termica per condizionamento estivo  $P_{h,SC}$  è maggiore di zero solo se la differenza tra temperatura percepita e temperatura interna di set point  $T_{set}$  è maggiore di zero

$$P_{h,SC} > 0 \Leftrightarrow (H_h - Tset) > 0 \tag{2.12}$$

La temperatura interna di set point  $T_{set}$  è stata impostata a 26°C.

2.4.2 – Potenza termica scambiata per trasmissione attraverso le superfici trasparenti Questo termine viene definito tramite la equazione

$$\dot{Q}_{h,trasm,trasp} = \sum_{i} (UA)_{i,trasp} \cdot (H_h - T_{set})$$
 (2.13)

Con

- $\dot{Q}_{h,trasm,trasp}$  potenza termica scambiata per trasmissione attraverso le superfici trasparenti, ad una generica ora h;
- $\sum_i (UA)_{i,trasp}$  somma dei prodotti dell'area per la trasmittanza delle superfici trasparenti di un edificio i-esimo;
- $H_h$  temperatura percepita, ad una generica ora h.

 $(UA)_{i,trasp}$  non può essere direttamente calcolato partendo dai dati raccolti da *TABULA* WebTool, ma possono essere ricavati dalle  $U_{wi}$  e  $A_{wi}$  con le seguenti assunzioni:

- Tutti gli edifici presentano infissi in legno a vetro singolo, come indicato da TABULA;
- Il telaio occupa il 30% della superficie dell'infisso [5];

Da una tabella di [5], la trasmittanza del vetro  $U_g$ , con queste assunzioni viene ricavata ed è pari a 5,7 W/m<sup>2</sup>K. L'area  $A_g$  è banalmente il 70% dell'area  $A_{wi}$ .

2.4.3 – Potenza termica scambiata per irraggiamento attraverso le superfici trasparenti Questo termine viene definito tramite la equazione

$$\dot{Q}_{h,irr,trasp} = g_g \cdot \sum_{i} I_{i,h,or} \cdot A_{i,trasp,or}$$
 (2.14)

Con

•  $\dot{Q}_{h,irr,trasp}$  Potenza termica scambiata per irraggiamento attraverso le superfici trasparenti;

- $g_g$  fattore solare del vetro, pari a 0,85 [6];
- $I_{i,h,or}$  Irradianza solare espressa in W/m<sup>2</sup> relativa a una determinata orientazione (N;S;E;O), per ogni i-esimo edificio.

Il termine  $I_{i,h,or} \cdot A_{i,trasp,or}$  si riferisce ad una determinata orientazione, che viene determinata con l'ipotesi di superfici equamente orientate, quindi

$$A_{trasp,NORD} = A_{trasp,SUD} = A_{trasp,EST} = A_{trasp,OVEST} = \frac{1}{4} A_{trasp}$$
 (2.15)

$$I_{h,or} \cdot A_{trasp,or} = I_{h,N} \cdot A_{trasp,N} + I_{h,S} \cdot A_{trasp,S} + \cdots$$
 (2.16)

Sostituendo la (2.15) in (2.16), l'equazione (2.14) diventa:

$$\dot{Q}_{h,irr,trasp} = g_g \cdot \bar{I}_h \cdot A_{tot,trasp} \tag{2.17}$$

Dove  $\overline{I_h}$  è la media delle irradianze per le esposizioni Nord, Sud, Est, Ovest. Si nota come i termini vengono riferiti, nelle equazioni (2.15), (2.16) e (2.17), alla totalità del complesso residenziale e non più all'edificio i-esimo. Le irradianze, su base oraria e per ogni orientazione, sono state ricavate con il *Web Tool PVGIS* [7].

#### 2.4.4 – Temperatura sole aria

Per quanto riguarda il trattamento delle superfici opache, il flusso termico non è più forzato dalla differenza di temperatura  $(H_h-T_{set})$ , ma da una differenza di temperatura equivalente, in cui vengono considerati anche gli effetti della radiazione solare. Essa è definita come

$$T_{h,sole-aria,or} = H_h + \frac{\alpha I_{i,h,or}}{h_o}$$
 (2.18)

Con

- $T_{h,sole-aria,or}$  Temperatura sole-aria per una determinata orientazione, ad una certa ora;
- $\alpha$  coefficiente di assorbimento della superficie esterna della parete, assunta di colori medi, che porta a un valore di  $\alpha$  pari a 0,6;
- $h_e$  coefficiente di scambio termico liminare esterno, assunto pari a 25 W/m<sup>2</sup>K [8].

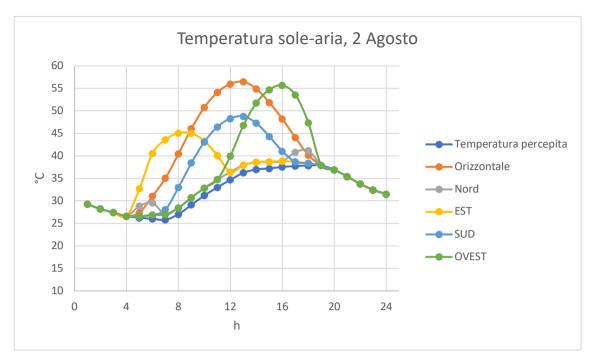


Grafico 2-2 – Temperatura sole-aria in un giorno estivo

Nel grafico 2-2 si evidenzia l'influenza del termine relativo all'irraggiamento, nella formula della temperatura sole-aria. Si nota come l'apporto della radiazione solare non è assolutamente trascurabile per tutte le orientazioni.

#### 2.4.5 – Potenza termica scambiata attraverso le superfici opache

Essa viene calcolata con la seguente equazione

$$\dot{Q}_{h,op} = \sum_{i} (UA)_{i,op,or} \cdot (T_{h,sole-aria,or} - T_{set})$$
(2.20)

Con

- $\dot{Q}_{h,op}$  potenza termica scambiata attraverso le superfici opache, ad una generica ora h;
- $\sum_{i}(UA)_{i,op,or}$  somma dei prodotti dell'area per la trasmittanza delle superfici opache di un edificio i-esimo, per tutte le orientazioni;

In questo caso, il termine  $T_{h,sole-aria,or}$  presenta una orientazione in più, quella orizzontale HOR, che va accoppiata con le  $(UA)_{i,op,roof}$  (relative alla superficie del tetto). Esplicitando i termini dell'equazione (2.20), si ha:

$$\dot{Q}_{h,op} = (UA)_{op,N} \cdot (T_{h,s-a,N} - T_{set}) + (UA)_{op,S} \cdot (T_{h,s-a,S} - T_{set}) + 
+ (UA)_{op,E} \cdot (T_{h,s-a,E} - T_{set}) + (UA)_{op,O} \cdot (T_{h,s-a,O} - T_{set}) + 
+ (UA)_{op,roof} \cdot (T_{h,s-a,HOR} - T_{set})$$
(2.21)

Dove i termini del tipo (UA) sono riferiti al totale degli edifici del complesso residenziale del caso studio. Tutti gli  $(UA)_{op}$ , ad esclusione di  $(UA)_{op,roof}$ , sono ottenuti con la (2.22)

$$(UA)_{op} = (UA)_{wall} + (UA)_{fr}$$
 (2.22)

Con  $(UA)_{fr}$  riferite alle aree dei telai (frames) degli infissi, calcolate come il 30% delle aree occupate dagli infissi. Si nota come manca il termine  $(UA)_{floor}$ , relativo al pavimento a contatto con il terreno: esso è stato escluso perché, durante la stagione di raffrescamento, rappresenta generalmente una potenza termica uscente, e quindi ad effetto positivo. Le aree opache per le varie orientazioni sono calcolate similmente a quelle trasparenti per le varie orientazioni, ma vengono considerate equamente distribuite su base della superficie delle pareti verticali, come indicato nella equazione (2.23)

$$A_{op,N} = A_{op,S} = A_{op,E} = A_{op,O} = \frac{1}{4} A_{wall}$$
 (2.23)

#### 2.4.6 – Tabelle per trasmittanze e aree calcolate

| Edificio | UA [W/K] | UA <sub>op</sub> [W/K] | UA <sub>tras</sub> [W/K] | UA <sub>roof</sub> [W/K] |
|----------|----------|------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1        | 1697     | 1381                   | 315                      | 332                      |
| 2        | 1882     | 1238                   | 641                      | 132                      |
| 3        | 2141     | 1604                   | 536                      | 298                      |
| 4        | 1946     | 1323                   | 621                      | 253                      |
| 5        | 1115     | 850                    | 264                      | 157                      |
| 6        | 1491     | 1196                   | 294                      | 173                      |
| 7        | 9366     | 6995                   | 2365                     | 789                      |
| 8        | 1478     | 1183                   | 295                      | 155                      |
| 9        | 1007     | 772                    | 235                      | 155                      |
| 10       | 968      | 742                    | 225                      | 151                      |
| 11       | 990      | 759                    | 231                      | 154                      |
| 12       | 1484     | 1186                   | 298                      | 148                      |
| 13       | 2647     | 2127                   | 518                      | 321                      |
| 14       | 2133     | 1714                   | 418                      | 258                      |
| 15       | 1009     | 771                    | 238                      | 145                      |
| 16       | 675      | 512                    | 163                      | 84                       |
| 17       | 1147     | 921                    | 225                      | 135                      |
| 18       | 4092     | 3249                   | 840                      | 319                      |
| 19       | 5493     | 4111                   | 1379                     | 491                      |
| 20       | 3819     | 2861                   | 956                      | 353                      |
| TOTALE   | 44945    | 35494                  | 11056                    | 5003                     |

Tabella 2-8 – Prodotti UA calcolati

| $U_w$ [W/m $^2$ K] | $U_t$ [W/m $^2$ K] | $U_g$ [W/m $^2$ K] | $A_g$ [ $m^2$ ] | $A_t [m^2]$ | A <sub>op,vert</sub> [m <sup>2</sup> ] | A <sub>roof</sub> [m <sup>2</sup> ] |
|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------|-------------|--|-------------------------------------|
| 4,9                | 3                  | 5,7                | 78813           | 33777       | 172809                                 | 260753                              |

Tabella 2-9 – Aree e trasmittanze

#### 2.4.7 – Potenza termica scambiata dalle persone

Le persone scambiano potenza termica con l'ambiente, che varia in base alla statura e all'attività. Mediamente, per una attività moderata, come può essere quella all'interno di un appartamento appunto, i valori che possono essere assunti sono:

$$\dot{Q}_{pers,sensibile} = 64W$$
 $\dot{Q}_{pers,latente} = 52W$  (2.24)

La potenza termica scambiata da ogni persona sarà banalmente pari alla somma dei due contributi

$$\dot{Q}_{pe} = \dot{Q}_{pers,sensibile} + \dot{Q}_{pers,latente}$$
 (2.25)

#### 2.4.8 – Numero di persone presenti attive

Nella equazione (2.10) questo termine accompagna tutti gli apporti che sono stati finora calcolati. L'idea è quella di costruire un profilo orario per il condizionamento che sia diverso da zero solo quando negli appartamenti del complesso residenziale sono presenti delle persone, e queste persone sono attive. Avendo a disposizione il profilo orario di domanda elettrica per gli elettrodomestici, per ogni categoria di famiglie, il calcolo è effettuato come segue:

- 1. Si ricerca il minimo di potenza assorbita per ogni categoria di famiglia, che è il carico base degli elettrodomestici, imputabile al solo gruppo frigorifero e congelatore.
- 2. Si sottrae questo carico di base per tutte le categorie, ottenendo un profilo di domanda elettrica che si azzera per alcune ore.
- 3. Per ogni ora, e per ogni categoria, se il profilo di domanda elettrica così ottenuto è maggiore di zero, si ottiene il numero di famiglie presenti attive, sempre per categoria e per ogni ora, moltiplicando il numero totale di famiglie residenti del complesso residenziale per la percentuale di composizione di ogni categoria.
- 4. Si ottiene il numero totale di famiglie presenti attive sommando le famiglie per categoria, ottenute al punto 3.
- 5. Si divide, per ogni ora, il numero di famiglie presenti attive per il numero di famiglie residenti nel complesso, che è anche uguale al rapporto tra persone presenti attive e totali  $\frac{N_{h,pr}}{N_{tot}}$ .

Nell tabelle 2-10 e 2-11 vengono presentati i risultati relativi al 1° gennaio.

|        |        | Pro    | filo orario | senza ca | rico base | [W]    |        |        |
|--------|--------|--------|-------------|----------|-----------|--------|--------|--------|
| 0      | 1      | 2      | 3           | 4        | 5         | 6      | 7      | 8      |
| 37,50  | 0,00   | 31,25  | 0,00        | 0,00     | 0,00      | 0,00   | 25,00  | 31,25  |
| 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00        | 0,00     | 0,00      | 25,00  | 0,00   | 0,00   |
| 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00        | 0,00     | 0,00      | 0,00   | 0,00   | 0,00   |
| 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00        | 0,00     | 0,00      | 0,00   | 0,00   | 0,00   |
| 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00        | 0,00     | 0,00      | 12,50  | 0,00   | 0,00   |
| 25,00  | 0,00   | 0,00   | 0,00        | 0,00     | 0,00      | 62,50  | 0,00   | 0,00   |
| 225,00 | 25,00  | 50,00  | 55,92       | 25,00    | 0,00      | 25,00  | 80,92  | 50,00  |
| 462,50 | 125,00 | 187,50 | 208,88      | 125,00   | 50,00     | 136,84 | 218,42 | 50,00  |
| 368,42 | 336,85 | 56,25  | 225,00      | 336,85   | 331,48    | 274,03 | 117,78 | 190,46 |
| 12,50  | 336,21 | 0,00   | 406,25      | 336,21   | 406,92    | 400,00 | 49,04  | 400,00 |
| 0,00   | 23,71  | 0,00   | 100,00      | 23,71    | 264,82    | 0,00   | 0,00   | 987,52 |
| 18,10  | 14,82  | 0,00   | 0,00        | 602,34   | 593,44    | 0,00   | 0,00   | 429,82 |
| 17,79  | 105,92 | 0,00   | 0,00        | 235,74   | 153,53    | 85,57  | 85,57  | 40,27  |
| 0,00   | 305,93 | 25,00  | 0,00        | 346,20   | 63,98     | 699,33 | 705,25 | 0,00   |
| 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00        | 0,00     | 0,00      | 302,32 | 179,96 | 0,00   |
| 71,39  | 25,00  | 61,53  | 0,00        | 25,00    | 40,13     | 387,77 | 83,32  | 6,25   |
| 154,96 | 118,75 | 123,71 | 0,00        | 118,75   | 50,00     | 181,25 | 87,50  | 25,00  |
| 92,78  | 0,00   | 123,71 | 0,00        | 0,00     | 68,75     | 131,25 | 0,00   | 206,25 |
| 30,92  | 283,92 | 236,21 | 0,00        | 283,92   | 177,00    | 137,50 | 80,92  | 180,92 |
| 248,71 | 211,21 | 267,79 | 81,25       | 211,21   | 179,63    | 136,20 | 455,29 | 236,54 |
| 261,21 | 188,52 | 255,92 | 180,92      | 188,52   | 204,00    | 241,80 | 624,67 | 167,78 |
| 242,46 | 185,57 | 154,96 | 223,71      | 185,57   | 164,82    | 259,59 | 409,91 | 173,71 |
| 192,46 | 12,50  | 123,71 | 86,86       | 12,50    | 0,00      | 241,50 | 235,25 | 161,21 |
| 148,71 | 0,00   | 179,96 | 0,00        | 0,00     | 0,00      | 200,00 | 117,79 | 154,96 |

Tabella 2-10 – Profilo orario per categoria di famiglia, senza carico base

In tabella 2-10 vengono riportati i profili orari per categoria di famiglia, dopo essere stati epurati dal carico base. La tabella si riferisce al 1° gennaio.

Nella tabella 2-11 vi è invece il numero di famiglie attive calcolate, per ogni categoria di famiglia. Il totale di famiglie attive poi sarà banalmente la somma delle famiglie per ogni categoria, arrotondata per eccesso, come indicato al punto 4. La tabella si riferisce sempre al 1° gennaio.

| Famiglie presenti attive |           |       |       |       |       |      |       |
|--------------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| 0 1                      | 2         | 3     | 4     | 5     | 6     | 7    |       |
| <b>35,21</b> 0           | ,00 86,93 | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 4,60 | 11,84 |
| <b>0,00</b> 0            | ,00 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 12,22 | 4,60 | 0,00  |
| <b>0,00</b> 0            | ,00 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 4,60 | 0,00  |
| <b>0,00</b> 0            | ,00 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 4,60 | 0,00  |
| <b>0,00</b> 0            | ,00 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 12,22 | 4,60 | 0,00  |
| <b>35,21</b> 0           | ,00 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 12,22 | 4,60 | 0,00  |
| <b>35,21</b> 45          | ,52 86,93 | 32,86 | 85,89 | 0,00  | 12,22 | 4,60 | 11,84 |
| <b>35,21</b> 45          | ,52 86,93 | 32,86 | 85,89 | 39,93 | 12,22 | 4,60 | 11,84 |
| <b>35,21</b> 45          | ,52 86,93 | 32,86 | 85,89 | 39,93 | 12,22 | 4,60 | 11,84 |
| <b>35,21</b> 45          | ,52 0,00  | 32,86 | 85,89 | 39,93 | 12,22 | 4,60 | 11,84 |
| <b>0,00</b> 45           | ,52 0,00  | 32,86 | 85,89 | 39,93 | 0,00  | 4,60 | 11,84 |
| <b>35,21</b> 45          | ,52 0,00  | 0,00  | 85,89 | 39,93 | 0,00  | 0,00 | 11,84 |
| <b>35,21</b> 45          | ,52 0,00  | 0,00  | 85,89 | 39,93 | 12,22 | 4,60 | 11,84 |
| <b>0,00</b> 45           | ,52 86,93 | 0,00  | 85,89 | 39,93 | 12,22 | 4,60 | 0,00  |
| <b>0,00</b> 0            | ,00 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 12,22 | 4,60 | 0,00  |
| <b>35,21</b> 45          | ,52 86,93 | 0,00  | 85,89 | 39,93 | 12,22 | 4,60 | 11,84 |
| <b>35,21</b> 45          | ,52 86,93 | 0,00  | 85,89 | 39,93 | 12,22 | 4,60 | 11,84 |
| <b>35,21</b> 0           | ,00 86,93 | 0,00  | 0,00  | 39,93 | 12,22 | 4,60 | 11,84 |
| <b>35,21</b> 45          | ,52 86,93 | 0,00  | 85,89 | 39,93 | 12,22 | 4,60 | 11,84 |
| <b>35,21</b> 45          | ,52 86,93 | 32,86 | 85,89 | 39,93 | 12,22 | 4,60 | 11,84 |
| <b>35,21</b> 45          | ,52 86,93 | 32,86 | 85,89 | 39,93 | 12,22 | 4,60 | 11,84 |
| <b>35,21</b> 45          | ,52 86,93 | 32,86 | 85,89 | 39,93 | 12,22 | 4,60 | 11,84 |
| 25 21 /5                 | ,52 86,93 | 32,86 | 85,89 | 0,00  | 12,22 | 4,60 | 11,84 |
| <b>35,21</b> 45          | ,52 55,55 | ,     | ,     |       |       |      |       |

Tabella 2-11 – Famiglie presenti attive per categoria

Questa modellizzazione introduce delle approssimazioni, in quanto esso stabilisce che, quando le persone utilizzano un elettrodomestico, allora sono considerate attive. In realtà, può accadere anche che una persona accenda il condizionatore, ma senza utilizzare nessun altro elettrodomestico, risultando di fatto non attiva secondo la logica implementata. Può succedere altresì che una persona, utilizzando un elettrodomestico e per la logica essendo attivo, non accende il condizionatore. Tuttavia, questa approssimazione è considerata accettabile.

| Famiglie totali | $\frac{N_{h,pr}}{N}$         |  |  |  |
|-----------------|------------------------------|--|--|--|
| 139             | N <sub>tot</sub> 0,391549296 |  |  |  |
| 17              |                              |  |  |  |
|                 | 0,047887324                  |  |  |  |
| 5               | 0,014084507                  |  |  |  |
| 5               | 0                            |  |  |  |
| 17              | 0,047887324                  |  |  |  |
| 53              | 0,149295775                  |  |  |  |
| 316             | 0,890140845                  |  |  |  |
| 355             | 1                            |  |  |  |
| 355             | 1                            |  |  |  |
| 269             | 0,757746479                  |  |  |  |
| 221             | 0,622535211                  |  |  |  |
| 219             | 0,616901408                  |  |  |  |
| 236             | 0,664788732                  |  |  |  |
| 276             | 0,777464789                  |  |  |  |
| 17              | 0,047887324                  |  |  |  |
| 323             | 0,909859155                  |  |  |  |
| 323             | 0,909859155                  |  |  |  |
| 191             | 0,538028169                  |  |  |  |
| 323             | 0,909859155                  |  |  |  |
| 355             | 1                            |  |  |  |
| 355             | 1                            |  |  |  |
| 355             | 1                            |  |  |  |
| 316             | 0,890140845                  |  |  |  |
| 151             | 0,425352113                  |  |  |  |
|                 |                              |  |  |  |

Tabella 2-12 – Famiglie totali e rapporto tra persone attive e totali

La tabella 2-12 si riferisce, ancora una volta, al 1° gennaio.

# 2.5 – Profili orari di domanda ottenuti e grafici corrispettivi

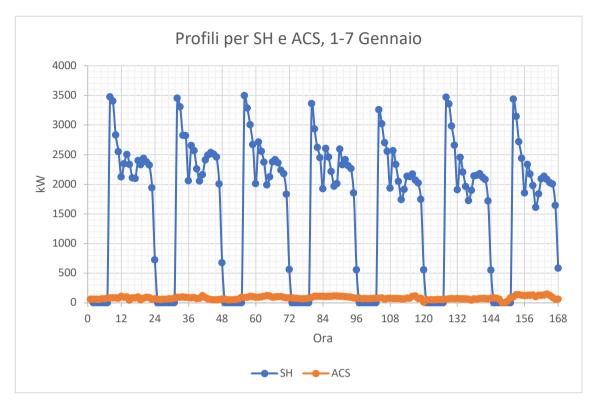


Grafico 2-3 – Profili per riscaldamento e acqua calda sanitaria

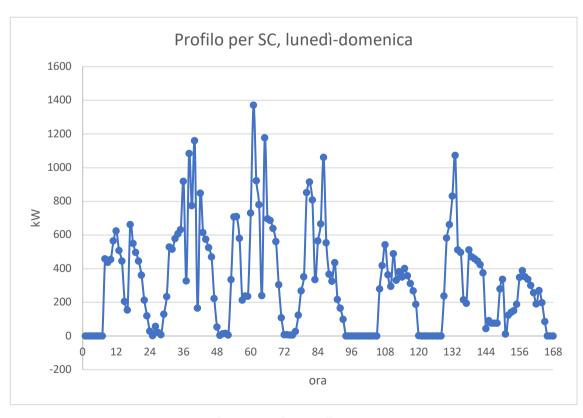


Grafico 2-4 – Profili per raffrescamento

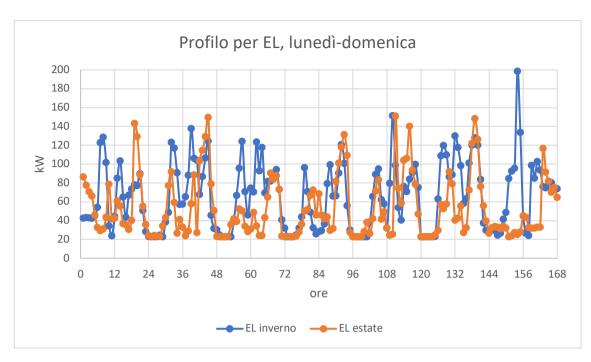


Grafico 2-5 – Profili per elettrodomestici, estate e inverno

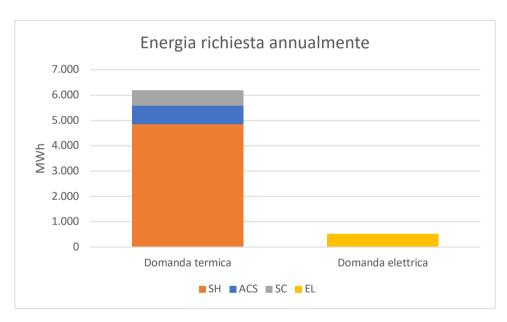


Grafico 2-6 – Suddivisione dell'energia richiesta per categoria

# 3 – L'impianto proposto

#### 3.1 – Elettrificazione dei consumi

Dopo aver caratterizzato dal punto di vista energetico, geografico e geometrico il complesso residenziale in esame, si passa ora alla modalità con cui si intende perseguire l'obiettivo dello studio: l'elettrificazione dei consumi energetici mediante l'introduzione di fonti rinnovabili. Per elettrificare i consumi termici, si può agire al livello di ogni singolo appartamento, di ogni singolo condominio, o di tutto il complesso residenziale. Per un singolo appartamento, delle possibili soluzioni sono installare dei condizionatori con sistema split o dei refrigeratori che producono acqua fredda per il condizionamento estivo, e delle pompe di calore per il riscaldamento e l'acqua calda sanitaria. Se si passa a livello condominiale o del complesso residenziale, bisogna pensare a dei sistemi centralizzati che servono il condominio o tutto il complesso, che possono essere composti da una pompa di calore (o una pluralità) e un refrigeratore (o una pluralità) fisicamente separati, oppure una unità (o una pluralità) polivalente che produce sia acqua calda che fredda, per riscaldamento, raffrescamento e acqua calda sanitaria.

L'impianto scelto, per la produzione di acqua calda e fredda, è una unità polivalente della *AERMEC* [9]. Poiché il software utilizzato per le simulazioni del caso studio non dà la possibilità di modellare un impianto che utilizzi energia elettrica per fornire energia termica, andranno determinate le prestazioni dell'unità, in modo tale da ottenere i profili elettrificati.

#### 3.2 – L'unità polivalente

L'unità polivalente è una AERMEC NRP 1800, della tipologia aria-acqua, con posizionamento all'esterno degli edifici. La scelta di un impianto con installazione esterna deriva dall'obiettivo dello studio, quello di proporre una elettrificazione a livello del complesso residenziale, in cui non si avrà una unità di generazione per edificio, ma una pluralità di generatori posizionati nel cortile interno del complesso. Si escludono quindi in questo modo i generatori che prevedono una installazione all'interno. L'elettrificazione deve essere perseguita tramite l'introduzione di fonti rinnovabili, e l'unità polivalente in questione risponde ai requisiti, in quanto utilizza l'energia termica dell'aria (più l'energia elettrica assorbita) per produrre un'energia termica ad una temperatura, superiore (nel caso di funzionamento in configurazione di pompa di calore) o inferiore (nel caso di funzionamento in configurazione di refrigeratore), utile per il condizionamento degli ambienti.

La AERMEC propone nel catalogo due versioni, a 2 tubi o 4 tubi. Quella a 2 tubi garantisce la produzione di acqua calda o fredda, insieme all'acqua calda sanitaria, mentre la versione a 4 tubi può produrre simultaneamente acqua calda e fredda, per varie zone degli edifici, sempre insieme all'acqua calda sanitaria. Dato che il caso studio

è di tipo residenziale, con una separazione netta tra la stagione di riscaldamento e raffrescamento, non è prevista la produzione simultanea di acqua fredda e calda, motivo per il quale si sceglie la versione a 2 tubi.

Esistono ancora due versioni tra cui poter scegliere:

- versione ad alta efficienza A;
- versione ad alta efficienza silenziata E.

Dai dati tecnici, le prestazioni della versione ad alta efficienza sono superiori rispetto a quelle della versione silenziata, per cui si preferisce la versione A.

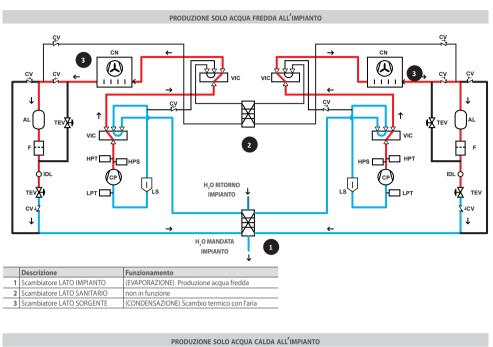
#### 3.2.1 – Funzionamento

Le modalità di funzionamento sono:

- funzionamento estivo: produzione di acqua fredda all'impianto e produzione di acqua calda sanitaria con l'utilizzo del recuperatore totale.
- funzionamento invernale: pompa di calore a servizio dell'impianto; pompa di calore a servizio dell'acqua calda sanitaria.

Il recuperatore totale permette il recupero di potenza termica dal circuito di refrigerazione, precisamente dall'evaporatore. In questo caso, l'unità funziona come una pompa di calore acqua-acqua, permettendo di arrivare a valori di efficienza globale superiore a 7. Ai fini del calcolo della domanda elettrica dell'unità polivalente nella stagione di raffrescamento, la presenza del recuperatore totale di calore viene tenuta in conto ponendo una condizione: se viene richiesta corrente elettrica per il raffrescamento, allora viene annullata la corrente richiesta per l'acqua calda sanitaria. Questo modo di procedere è sostenuto dalla scheda tecnica dell'unità polivalente, che indica una potenza termica recuperata superiore alla potenza frigorifera erogata. Dato che in genere la domanda termica di acqua calda sanitaria è inferiore alla domanda termica per raffrescamento, questa assunzione è considerata valida. Si è inoltre conservativi, nel senso che la potenza elettrica assorbita in modalità di produzione combinata di acqua calda e fredda è leggermente inferiore a quella assorbita in sola modalità raffrescamento.

#### SCHEMI FUNZIONAMENTO DI PRINCIPIO PER IMPIANTO A 2 TUBI



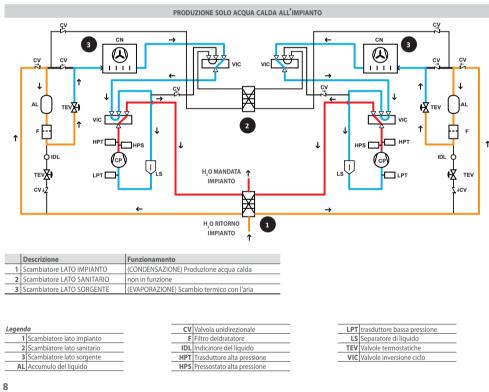
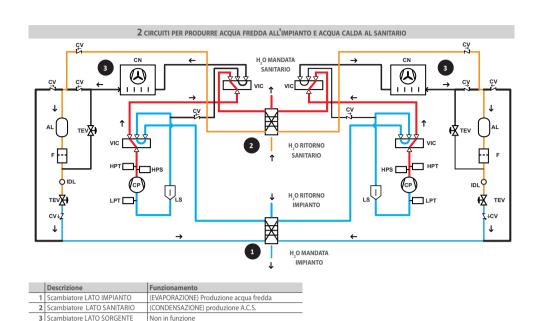


Figura 3-1 – Schema di funzionamento dell'unità polivalente – parte 1



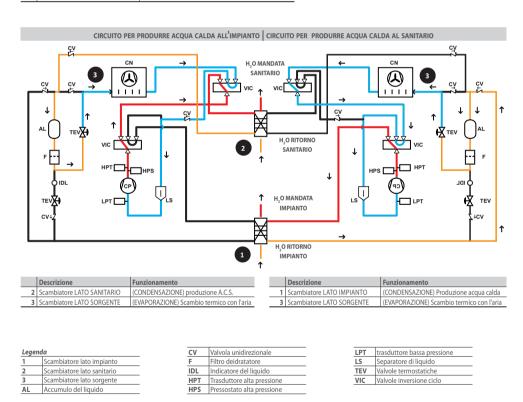


Figura 3-2 – Schema di funzionamento dell'unità polivalente – parte 2

#### 3.2.2 - Dimensionamento

La scheda tecnica del modello AERMEC NRP 1800 recita:

- Potenza frigorifera nominale 475 kW in condizioni di acqua evaporatore da 12°C a 7°C e temperatura dell'aria esterna 35°C;
- Potenza termica nominale 547 kW in condizioni di acqua condensatore da 40°C a 45°C e temperatura di bulbo secco dell'aria esterna di 7°C.

I profili orari di domanda termica per SH e SC raggiungono i seguenti picchi:

- $P_{h,SH}^{MAX} = 3789 \ kW$   $P_{h,SC}^{MAX} = 1372 \ kW$

La condizione più restrittiva è sicuramente quella relativa al riscaldamento. Nel caso studio non sono stati considerati eventuali sistemi di accumulo per l'acqua calda sanitaria; per questo motivo, il dimensionamento dell'impianto va fatto sul massimo del profilo orario di domanda che si può verificare durante la stagione di riscaldamento, considerando SH e ACS:

$$P_{h,SH+ACS}^{MAX} = 3789 \ kW \tag{3.1}$$

In realtà, il dimensionamento di un impianto invernale andrebbe eseguito utilizzando, come forzante del flusso termico disperso, la differenza tra la temperatura interna di set point invernale (20°C) e la temperatura di progetto  $T_p$  (-8°C per Torino). Tuttavia, la metodologia di calcolo del profilo di domanda termica per riscaldamento utilizzata nel presente studio, non utilizza le differenze di temperatura. Per ovviare a questo problema, si è ricercato il minimo nel file delle temperature esterne orarie, trovando una temperatura minima registrata  $T_{min,reg} = -5.6^{\circ}C$ . Impostando una semplice uguaglianza, si può assumere che

$$P_{h,SH+ACS}^{MAX,T_p} = P_{h,SH+ACS}^{MAX,T_{min,reg}} \cdot \frac{20 - T_p}{20 - T_{min,reg}} = 4144 \, kW \tag{3.2}$$

Dove  $P_{h,SH+ACS}^{MAX,T_p}$  è il massimo del profilo della domanda termica, SH e ACS, nelle condizioni di progetto. Questa è una approssimazione che ai fini del dimensionamento può essere accettata per perseguire l'obiettivo dello studio. Il valore corretto andrebbe svolto partendo dal calcolo del flusso termico disperso, moltiplicandolo poi per la differenza di temperatura citata prima.

Per quanto riguarda la potenza termica nominale dell'unità polivalente, essa è appunto calcolata in condizioni nominali, e non di progetto. Nei cataloghi AERMEC, è stato trovato il decadimento della potenza termica erogata da un altro modello di pompa di calore, simile a quello scelto. La potenza erogata alla temperatura esterna di -8°C è pari a circa 0,7 la potenza nominale:

$$Pot_{-8^{\circ}C,PDC} = 0.7 \cdot Pot_{nom,PDC} \tag{3.3}$$

Dove il pedice PDC indica il funzionamento in configurazione pompa di calore. Assumendo che l'unità polivalente abbia un decadimento simile della potenza, allora il risultato dell'equazione ... sarà valido anche per essa. A questo punto si può trovare il numero di unità necessarie con la seguente equazione

$$N_{NRP} \cong \frac{P_{h,SH+ACS}^{MAX,T_p}}{Pot_{-8^{\circ}C,PDC}} \cong 11$$
(3.4)

Dove  $N_{NRP}$  è il numero di unità polivalenti AERMEC NRP 1800, arrotondato per eccesso.

#### 3.2.4 - COP

Il COP (Coefficient of Performance) di una pompa di calore è definito come il rapporto tra potenza termica resa e potenza elettrica assorbita. Nel caso studio, la potenza termica resa è uguale, ora per ora, al profilo orario di domanda termica per riscaldamento e acqua calda sanitaria, mentre la potenza elettrica assorbita, sempre ora per ora, è invece il profilo orario di domanda elettrica per riscaldamento e acqua calda sanitaria, che è ciò che si vuole calcolare. Si evince come la definizione del COP è essenziale per l'elettrificazione dei consumi energetici, in quanto in ogni momento (nel caso studio, ogni ora dato che l'analisi energetica è su base oraria), con le premesse fatte, vale

$$COP_h = \frac{P_{h,SH+ACS}}{P_{h,SH+ACS}^E} \Longrightarrow P_{h,SH+ACS}^E = COP_h \cdot P_{h,SH+ACS}$$
(3.5)

Dove  $P_{h.SH+ACS}^E$  è il profilo orario di domanda elettrica per SH e ACS e il pedice h indica l'ora h-esima. Il  $COP_{nom}$  è pari a 3,27. Questo è il valore nominale, mentre il  $COP_h$  dipende dalle reali condizioni di funzionamento.

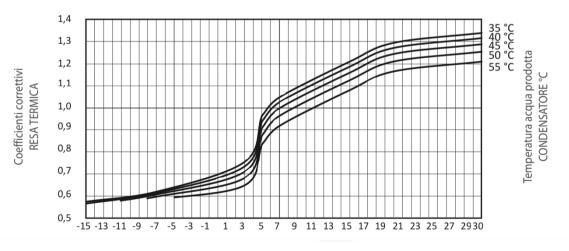


Figura 3-3 – Andamento del COP in condizioni diverse dalle nominali

In figura 3-3 sull'asse delle ascisse si trova la temperatura esterna di bulbo secco espressa in gradi centigradi, mentre sulle ordinate il rapporto tra coefficiente di prestazione reale e nominale. Le curve sono ricavate a diverse temperature dell'acqua prodotta dal condensatore. Le basse temperature possono essere compatibili con dei sistemi di riscaldamento a pavimento, la cui installazione risulterebbe molto invasiva e costosa, quindi esclusa dalle possibilità. La temperatura dell'acqua prodotta quindi scelta è di  $45^{\circ}$ C, compatibile con dei ventilconvettori, ad esempio, la cui installazione non risulta invasiva e costosa come una serpentina a pavimento. I  $45^{\circ}$ C sono anche compatibili con la produzione dell'acqua calda sanitaria. Per questi motivi, la curva presa come riferimento è quella relativa appunto ai  $45^{\circ}$ C, che interseca l'asse x=7 proprio in y=1, dando come risultato le condizioni nominali.

La curva è poi stata ricostruita manualmente dal punto di vista grafico, e poi definita con una funzione continua definita a tratti, in modo tale da poter stabilire il valore del  $COP_h$  al variare della temperatura.

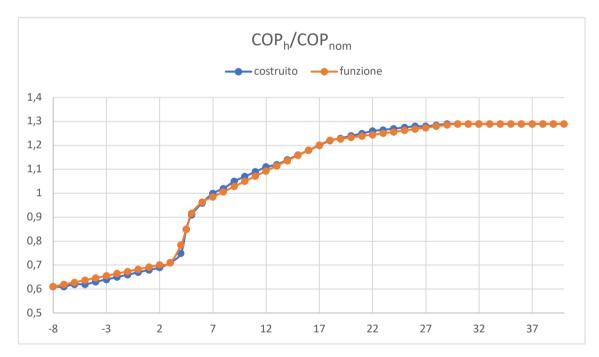


Grafico 3-1 – Ricostruzione del COP

#### 3.2.5 - EER

L'EER (Energy Efficiency Ratio) di una macchina frigorifera è definita come il rapporto tra la potenza termica asportata e la potenza elettrica assorbita. In modo identico a quello visto per il COP, la potenza termica asportata è uguale, ora per ora, al profilo di domanda termica per il raffrescamento, mentre la potenza elettrica assorbita, ora per ora, è proprio il profilo orario di domanda elettrica per il raffrescamento.

$$EER_h = \frac{P_{h,SC}}{P_{h,SC}^E} \Longrightarrow P_{h,SC}^E = EER_h \cdot P_{h,SC}$$
 (3.6)

Dove  $P_{h,Sc}^E$  è il profilo orario di domanda elettrica per SC e il pedice h indica l'ora h-esima. La  $EER_{nom}$  è pari a 3,01. Questo è il valore nominale, mentre la  $EER_h$  dipende dalle reali condizioni di funzionamento.

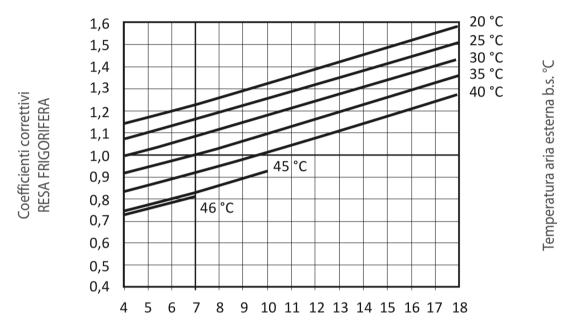


Figura 3-4 – Andamento della EER in condizioni diverse dalle nominali

Questa volta, sull'asse delle ascisse si trova la temperatura dell'acqua prodotta dall'evaporatore, mentre le curve si riferiscono a varie temperature dell'aria esterna. Il valore di riferimento è stato preso pari a quello nominale, 7°C.

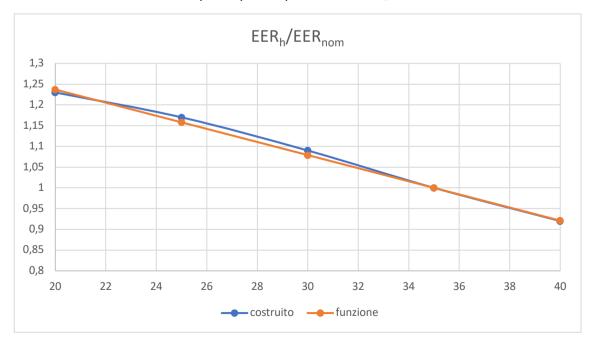


Grafico 3-2 - Ricostruzione della EER

Una curva del rapporto  $EER_h/EER_{nom}$  è stata costruita graficamente, ed è poi stata approssimata con la funzione di una retta, poiché la spaziatura delle curve in figura 3-4 è pressoché costante.

#### 3.2.6 – Profili orari elettrificati ottenuti e confronto con i profili orari termici

Tramite l'introduzione delle unità polivalenti *AERMEC NRP 1800*, si ottengono quindi i profili elettrificati della domanda termica.

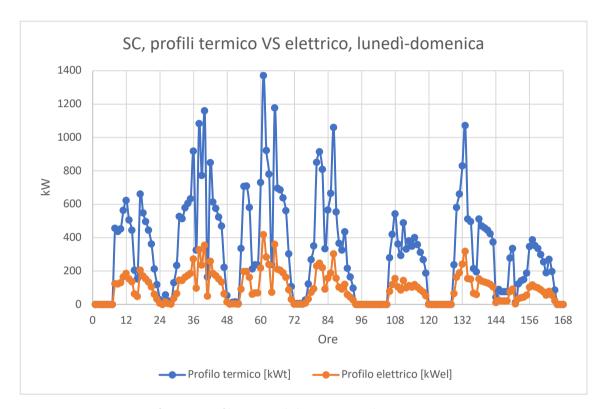


Grafico 3-3 – Profili termico ed elettrico per condizionamento estivo

Nel grafico 3-3 è presentato un confronto tra il profilo orario di domanda termica e il profilo elettrificato della domanda stessa, per condizionamento estivo. Si nota come il profilo elettrico sia sempre inferiore a quello termico, di una quota che dipende dal valore dell'*EER*<sub>h</sub>, che varia di ora in ora con la temperatura.

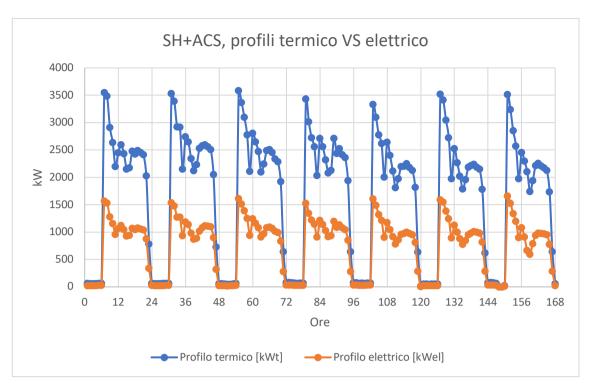


Grafico 3-4 – Profili termico ed elettrico per riscaldamento e acqua calda sanitaria

Nel grafico 3-4 vi è invece un confronto tra il profilo orario di domanda termica e il profilo elettrificato della domanda stessa, per riscaldamento e acqua calda sanitaria. Si nota come il profilo elettrico sia sempre inferiore a quello termico, di una quota che dipende dal valore del  $COP_h$ , che varia di ora in ora con la temperatura.

#### 3.3 – Ventilconvettori

Le unità *NRP 1800* producono acqua calda a 45°C in condizioni nominali. I radiatori classici che funzionano da terminali dell'impianto di generazione del calore, presenti negli appartamenti del caso studio, non funzionano con temperature dell'acqua calda di 45°C, perché la loro superficie di scambio termico è troppo ridotta per lavorare con temperature così basse. Per lasciare i radiatori classici, bisognerebbe far lavorare le unità proposte, in configurazione pompa di calore, con un *COP* troppo basso da poter giustificare la loro installazione. Parlando sempre del *COP*, esso cresce al diminuire della temperatura dell'acqua prodotta. Per avere delle prestazioni ottimali, logica vorrebbe che si scegliessero dei terminali compatibili con le temperature più basse possibili, ma l'opzione sarebbe quella di ricorrere al riscaldamento a pavimento, operazione che in genere si fa in ristrutturazioni complete degli appartamenti. Poiché questo non è il focus dello studio, il riscaldamento a pavimento è stato scartato.

Sempre sul sito della *AERMEC*, sono stati cercati a questo punto dei modelli di ventilconvettori. Questa scelta ha numerosi vantaggi:

- sono perfettamente compatibili con le unità polivalenti proposte;
- possono lavorare sia per il riscaldamento che raffrescamento;

- sono compatibili con le temperature di acqua calda e fredda nelle condizioni nominali (45°C per l'acqua calda, 7°C per l'acqua fredda);
- la loro installazione non è invasiva, poiché l'idea è di utilizzare le posizioni dei vecchi radiatori che andrebbero rimossi, allacciandosi alle tubazioni già presenti nei muri.

Il modello di ventilconvettore scelto è un *AERMEC OMNIA UL26*. Le potenze nominali sono in configurazione riscaldamento e raffrescamento

- $P_{ris} = 2,75 \, kW$
- $P_{raf} = 2,03 \, kW$

Per trovare il numero  $N_{vc}$  di ventilconvettori da installare, si dividono i picchi di potenza termica e frigorifera richiesti per  $P_{ris}$  e  $P_{raf}$  rispettivamente, e si arrotonda per eccesso il massimo tra i due rapporti, che è la condizione più restrittiva

$$N_{vc} \cong MAX\left(\frac{P_{h,SH}^{MAX}}{P_{ris}}; \frac{P_{h,SC}^{MAX}}{P_{raf}}\right) \cong 1378$$
 (3.7)

Questo numero servirà successivamente solo per l'analisi economica. Non è da intendersi come un numero preciso, in quanto le dimensioni di ogni appartamento sono diverse, i loro fabbisogni energetici anche, e le posizioni e quantità dei radiatori variano. Quindi, se si volesse conoscere il numero preciso di ventilconvettori da installare, per ogni taglia, si dovrebbero effettuare studi di dimensionamento dettagliati per ogni appartamento.

#### 3.4 – Pannelli solari fotovoltaici

La fonte rinnovabile più popolare al livello residenziale è l'energia solare. I pannelli fotovoltaici rappresentano l'opportunità più ghiotta di generazione di energia elettrica da fonti rinnovabili. L'obiettivo dello studio prevede appunto l'introduzione di fonti rinnovabili, e non si può prescindere dal considerare i pannelli fotovoltaici.

Il modello del modulo fotovoltaico scelto è il *SUNPOWER SPR MAX3 390 W* [10]. Si tratta di un modulo di silicio monocristallino. La scheda tecnica recita:

| Area modulo [m²]                   | 1,77  |
|------------------------------------|-------|
| Potenza di picco [W <sub>p</sub> ] | 390   |
| Efficienza                         | 22,03 |
| Effetto della temperatura [%/°C]   | -0,29 |
| Efficienza dopo 25 anni            | 92%   |

Tabella 3-1 – Dati tecnici di interesse del modulo SPR MAX3 390W

Dove la potenza è espressa in Wp, cioè watt di picco.

## 3.4.1 - Dimensionamento

Per il dimensionamento dell'impianto solare, si hanno a disposizione gli orientamenti delle falde degli edifici del complesso e anche la frazione disponibile per l'installazione. Da angolazioni diverse della figura 1-2 si stima che i tetti siano inclinati di 30°. Tipicamente, questi moduli fotovoltaici vengono utilizzati per realizzare impianti da 3 kW<sub>p</sub> a salire, ma a scaglioni di 1,5 kW<sub>p</sub>, quindi a blocchi di 4 pannelli fotovoltaici. Con queste premesse, per ogni edificio i-esimo viene calcolata l'area della falda  $A_{fal,i}$ :

$$A_{fal,i} = \frac{A_{roof,i}}{\cos 30^{\circ}} \tag{3.8}$$

Poi la quantità di pannelli per ogni edificio è calcolata come

$$N_{PV,i} \cong \frac{Fr_i \cdot A_{fal,i}}{A_{PV}} \tag{3.9}$$

Dove  $Fr_i$  è la frazione di falda disponibile per l'installazione e  $A_{PV}$  è l'area occupata da un singolo pannello. Il risultato deve essere un multiplo di 4, altrimenti va preso il multiplo di 4 più vicino, ma inferiore. La potenza da installare può essere ora trovata:

$$Pot_i = N_{PV,i} \cdot Pot_{PV} \tag{3.10}$$

Con  $Pot_{PV}$  potenza di picco di un singolo pannello.

| Orientamento | % Falda | Disponibilità [m²] | Quantità PV | Potenza [kW <sub>p</sub> ] |
|--------------|---------|--------------------|-------------|----------------------------|
| S            | 78,1    | 202                | 112         | 43,68                      |
| S            | 93,4    | 129                | 72          | 28,08                      |
| S            | 52      | 163                | 88          | 34,32                      |
| S            | 69,6    | 185                | 104         | 40,56                      |
| S            | 75,2    | 124                | 68          | 26,52                      |
| S            | 49,7    | 90                 | 48          | 18,72                      |
| S            | 55,4    | 459                | 256         | 99,84                      |
| N            | 0       | 0                  | 0           | 0                          |
| N            | 0       | 0                  | 0           | 0                          |
| N            | 0       | 0                  | 0           | 0                          |
| N            | 0       | 0                  | 0           | 0                          |
| N            | 0       | 0                  | 0           | 0                          |
| S            | 76      | 256                | 144         | 56,16                      |
| S            | 90      | 244                | 136         | 53,04                      |
| S            | 61,4    | 94                 | 52          | 20,28                      |
| S            | 73,8    | 68                 | 36          | 14,04                      |
| S            | 39,4    | 105                | 56          | 21,84                      |
| S            | 27,6    | 132                | 72          | 28,08                      |
| S            | 72,4    | 142                | 80          | 31,20                      |
| S            | 73,8    | 268                | 148         | 57,72                      |

Tabella 3-2 – Dettagli del numero di pannelli e potenza per ogni edificio

La potenza di picco totale da poter installare risulta di 574,08  $kW_p$ .

# 3.5 – Batterie elettriche

Si valuta la possibilità di installare delle batterie elettriche per poter immagazzinare l'energia elettrica prodotta in eccesso dai pannelli, per poterla utilizzare in un secondo momento. Con la diminuzione dei costi di produzione delle batterie al litio, esse stanno incominciando ad affacciarsi al settore residenziale. Una delle batterie più gettonate è sicuramente la *TESLA POWERWALL 2* [11]. Una singola unità ha una capacità di 13.2 kWh. Non si dimensiona questo componente, in quanto sarà compito dell'algoritmo ottimizzatore del software.

# 4 – Simulazione con HOMER PRO del caso studio elettrificato

HOMER PRO è un software distribuito dalla HOMER Energy [12] utile all'ottimizzazione, sia ingegneristica che economica, di microgrid, anche di quelle connesse alla rete elettrica. Esso permette di eseguire delle analisi energetiche con un dettaglio temporale che va dal minuto all'ora, su base annuale, per un determinato numero di anni di riferimento. La quantità e presenza dei componenti da cui è composto l'impianto proposto viene ottimizzata su base degli input economici, effettuando molteplici simulazioni. Si può eseguire anche una analisi di sensitività, qualora non si dovesse essere sicuri del valore delle variabili da utilizzare. Il software permette l'implementazione di moduli importanti, come ad esempio il fotovoltaico, l'eolico, le batterie di ogni tipo, i generatori con qualsiasi combustibile e tanto altro. Per il sistema proposto, con i dovuti accorgimenti, HOMER PRO può essere utilizzato per trovare un risultato ottimizzato dal punto di vista economico.

Il tempo di vita dell'impianto di riferimento per l'analisi è impostato a 25 anni.

# 4.1 – Gli input necessari

In questo paragrafo vengono descritti tutti gli input, relativi al caso studio, inseriti in HOMER PRO.

## 4.1.1 – Carico elettrico

Dato che i profili di domanda termica sono stati elettrificati, si avrà solo un carico elettrico. Nel paragrafo 3.2.6 sono inseriti alcuni grafici relativi ai profili orari elettrificati. Sommando anche il profilo di domanda elettrica per gli elettrodomestici (paragrafo 2.1), si può ottenere il profilo orario di domanda elettrica totale  $P_{h,TOT}^E$ , che include il riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria ed elettrodomestici

$$P_{h,TOT}^{E} = P_{h,SH+ACS}^{E} + P_{h,SC}^{E} + P_{h,EL}^{E}$$
 (4.1)

In figura 4-1 è rappresentato il carico elettrico totale inserito in *HOMER PRO*. In questo caso, il grafico "daily profile" si riferisce a un tipico giorno lineare, mostrando coerenza con quanto calcolato nei paragrafi precedenti. Si ha un picco di domanda in mattinata, alle 7:00, per poi scendere gradualmente fino alle 23:00, orario in cui viene staccato il riscaldamento. Durante la notte, dalle 23:00 alle 7:00, sono presenti solo i termini relativi principalmente all'acqua calda sanitaria e al carico base degli elettrodomestici (composto solo dai frigoriferi). Nella heat map "yearly profile", si nota come si richiede una potenza molto bassa per circa 8 ore al giorno (23:00-7:00). Durante la stagione di riscaldamento, si arriva a picchi di potenza richiesta dell'ordine dei 2 MW, sempre in mattinata con orari che vanno dalle 7:00 alle 10:00, con colorazione rossa. Durante la stagione di raffrescamento, invece, i picchi di potenza richiesta sono dell'ordine dei 500 kW.

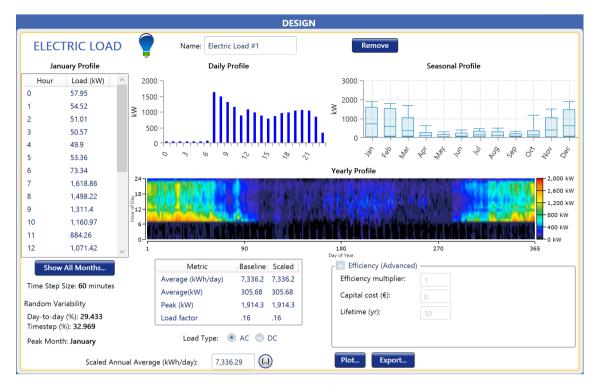


Figura 4-1 – Carico elettrico

#### 4.1.2 – Pannelli fotovoltaici

In rete sono stati cercati i prezzi di un impianto da 3 kW composto utilizzando i moduli scelti. Si è stimato, per installazioni di impianti più grandi, come lo sono quelli del caso studio, un prezzo di 1500 €/kW (inclusi tutti i materiali accessori) con una manodopera del 15%. La manutenzione si è invece assunta pari all'1% del prezzo dei pannelli esclusa la manodopera, quindi di 15 €/kW\*y. L'inclinazione è stata presa pari all'inclinazione supposta per i tetti.

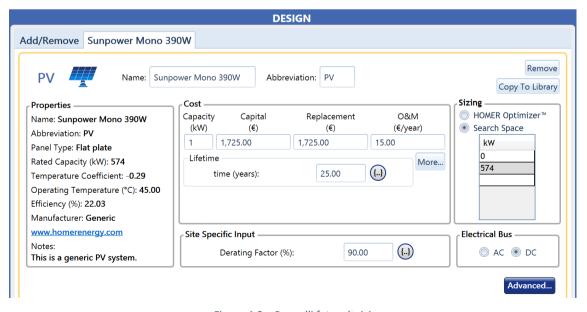
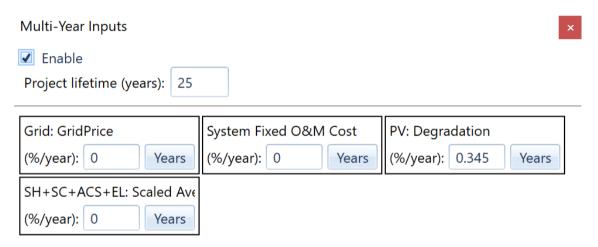


Figura 4-2 — Pannelli fotovoltaici

Il tempo di vita garantito per i pannelli solari è di 25-30 anni. Per essere conservativi, si è imposta una durata di vita di 25 anni. Durante questo periodo, i pannelli perdono efficienza, ma purtroppo questo dato non può essere considerato precisamente con HOMER PRO. Il "derating factor" è un fattore che tiene conto delle reali condizioni operative dei pannelli, rispetto alle quali sono stati testati. Esse includono, oltre all'invecchiamento, anche lo sporco, la neve, le perdite nei cavi elettrici e altro. Il valore di default era impostato all'80, ma il valore è stato alzato a 90%, perché si tiene conto dell'invecchiamento dei pannelli solari tramite una sezione diversa, la sezione "Multi-Year", in cui si può inserire il fattore di degradazione dell'efficienza dei pannelli solari.



Fiaura 4-3 – Modulo Multi-Year

Il modello di pannello scelto possiede alte prestazioni al riguardo, con una degradazione che porta l'efficienza a circa il 92% di quella originale, dopo 25 anni. Ne risulta un fattore di degradazione di 0,345%/y, come inserito nella figura 4-3. Utilizzando il "Multi-Year", si perde la funzione dell'*HOMER optimizer*. Nella sezione "sizing", è stata impostata la capacità da installare, di 574 kW, come calcolato nel paragrafo 3.4.1.

# 4.1.3 – Batterie elettriche

La batteria *TESLA POWERWALL 2* è già implementata in *HOMER PRO*, per cui non c'è bisogno di modellarla dal punto di vista tecnico. *TESLA* fornisce una garanzia di 10 anni su certe prestazioni della batteria. Si può assumere quindi il tempo di vita di 10 anni. Un altro modo di determinare il tempo di vita di una batteria è utilizzando il "throughput", cioè la quantità di energia che la batteria può immagazzinare ed erogare durante la sua vita; infatti alcune aziende forniscono la garanzia basata sul throughput. Poiché c'è molta incertezza riguardo al momento in cui va sostituita una batteria al litio, nella sezione "time (years)" sono stati impostati due valori, 10 e 25, quest'ultimo pari al tempo di riferimento impostato per l'analisi. In questo modo si esegue una analisi di sensitività per questa variabile, e si impone al software di non sostituire le batterie qualora non dovessero superare il throughput, utilizzando il valore di 25 anni. Nella

sezione "sizing", si cerca un numero ottimo di batterie. Poiché gli edifici che possono ospitare i pannelli solari sono 15, i numeri 0, 15, 30 e 45 corrispondono rispettivamente a 0, 1, 2 e 3 batterie per edificio. Per quanto riguarda la parte economica, in Italia questo modello di batteria costa circa 7500 € più 1000 € di manodopera [11].

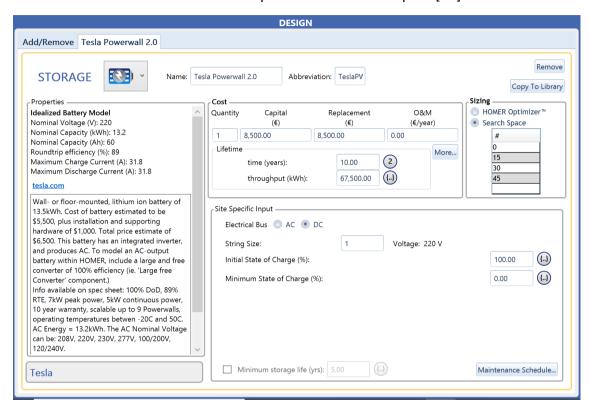


Figura 4-4 – Batterie

# 4.1.4 – Rete elettrica

HOMER PRO permette di aggiungere il modulo della rete elettrica, in figura 4-5, per connettersi ad essa, sia per prelevare che vendere energia. Il prezzo medio di vendita dell'energia elettrica è stato preso dal sito ufficiale ARERA (Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente) [13], ed è pari a circa 0,22 €/kWh. Il sistema energetico proposto prevede l'installazione di pannelli fotovoltaici, che possono immettere in rete l'energia elettrica che producono e che non viene utilizzata per soddisfare la domanda elettrica. Quindi, bisogna inserire anche un prezzo di vendita dell'energia elettrica alla rete. Al momento, non esiste un valore fissato. Infatti, il GSE (Gestore Servizi Energetici) [14] recita che gli incentivi del Conto Energia, precisamente il D.M. 05/07/2012 (quinto Conto Energia), non sono più applicati dal 6 Luglio 2013, poiché si è raggiunto il costo cumulato degli incentivi fissato dal Conto Energia stesso. Il GSE propone un contratto, di scambio sul posto, con cui vengono pagati i chilowattora immessi in rete da pannelli fotovoltaici. La procedura di calcolo è complessa, perché utilizza valori che variano nel tempo. Il contributo in conto scambio CS, espresso in Euro, viene calcolato come segue:

$$CS = \min(O_E, C_{Ei}) + CU_{Sf} \cdot E_S \tag{4.2}$$

Dove

•  $O_E$  è la parte onere energia ed è pari a

$$O_E = PUN \cdot E_p \tag{4.3}$$

Con PUN Prezzo Unico Nazionale dell'energia e  $E_p$  energia prelevata. Questo termine rappresenta la quota energia pagata in bolletta. Il PUN varia di mese in mese, ma mediamente può essere considerato pari a 0,05 /kWh [15].

•  $C_{Ei}$  è il controvalore dell'energia immessa in rete, pari a

$$C_{Ei} = P_z \cdot E_i \tag{4.4}$$

Con  $P_z$  prezzo zonale orario dell'energia e  $E_i$  energia immessa. Il prezzo zonale orario varia di ora in ora e di zona in zona, ma in prima approssimazione può essere preso pari al prezzo unico nazionale.

- CU<sub>sf</sub> è il corrispettivo unitario di scambio forfetario ed è composto dagli oneri di sistema e dai costi di rete. Il suo valore varia in base alle potenze installate, all'anno e ad altri fattori. Il valor medio è stato assunto di 0,08 €/kWh.
- $E_s$  è l'energia elettrica scambiata, ed è pari al minimo tra l'energia immessa e l'energia prelevata.

Data la potenza di picco dell'impianto fotovoltaico nel suo insieme, e dati i picchi di domanda elettrica sia in stagione di raffrescamento che riscaldamento, si prevede che l'energia immessa sarà inferiore, e di molto, all'energia prelevata. Con questo ragionamento, l'equazione (4.2) diventa

$$\frac{CS}{E_i} = PUN + CU_{sf} = 0.13 \stackrel{\text{e}}{=} /_{kWh}$$
 (4.5)

La sezione "Net Metering" impone di assegnare un prezzo di vendita pari al prezzo di acquisto dalla rete per una quota di energia che non è quella prelevata, ma quella prelevata meno quella immessa, su base mensile o annuale. Di fatto, questo significa che, quando il sistema immette una quantità di energia inferiore a quella prelevata, questa energia viene pagata al prezzo di acquisto dalla rete, e il contratto di scambio sul posto non ricade in questa casistica. Per questo motivo, la sezione "Net Metering" è stata disattivata.

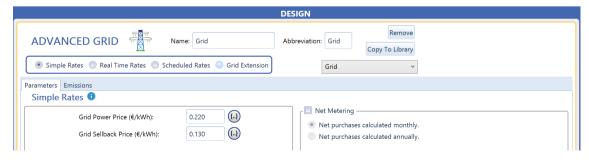


Figura 4-5 – Rete elettrica

#### 4.1.5 - Convertitore

Il convertitore (o inverter) si rende necessario quando bisogna dialogare tra corrente alternata AC e corrente continua DC. I pannelli solari e le batterie elettriche rientrano nel dominio DC, mentre la rete e la domanda elettrica nel dominio AC. In figura 4-6 è presentato il modulo del convertitore. Nella sezione "Capacity Optimization" è stata inserita una capacità pari alla potenza di picco dei pannelli solari. Infatti, con delle simulazioni precedenti volte all'ottimizzazione proprio dell'inverter (L'HOMER Optimizer non è disponibile attivando la sezione "Multi-Year"), si sono avute delle capacità inferiori alla potenza di picco de pannelli. Questo è dovuto al fatto che HOMER PRO non massimizza l'energia prodotta dai pannelli e trasformata dall'inverter, ma ottimizza il sistema al livello economico, e può succedere che nelle logiche di ottimizzazione venga preferito installare un inverter più piccolo per evitare i costi maggiori dovuti all'installazione di una capacità superiore. Tuttavia, quando si progetta un impianto fotovoltaico, la capacità dell'inverter è almeno pari alla potenza di picco dei pannelli, così il valore inserito è proprio quello di 574 kW. Il costo al chilowatt dell'inverter diminuisce con l'aumentare della taglia e, poiché quasi tutti gli impianti solari da installare sui tetti sono superiori ai 20 kW, si è assunto un costo di 0,16 €/W, che è un costo trovato in rete valido per taglie di inverter dai 10 ai 100 kW. Il tempo di vita dell'inverter è stimato di 15 anni, ciò significa che nel tempo di riferimento dell'impianto, pari a 25 anni, ci sarà una sostituzione programmata di tutti gli inverter. Non sono stati presi in considerazione costi di manutenzione, poiché si considerano inglobati nei costi di manutenzione associati ai pannelli fotovoltaici.



Figura 4-6 – Convertitore

#### 4.1.6 - Risorse



Figura 4-7 - Risorse

Sono state caricate, utilizzando le mappe integrate in HOMER PRO, le risorse relative all'irradianza solare globale (Solar GHI) e alla temperatura (Temperature). Entrambe servono al software per calcolare la produzione di energia dei pannelli fotovoltaici.

#### 4.1.7 - Controller

Il controller è un componente in *HOMER PRO* che permette di decidere come si comporta il sistema durante la simulazione. Ogni controller ha un suo algoritmo e una sua logica di dispacciamento. Per il sistema proposto, vengono lasciati i controller attivi di default: *Cycle Charging* e *Load Following*. Il primo indica ai generatori, qualora fossero presenti, di lavorare alla capacità massima quando richiesti, e il surplus di energia viene usato per caricare le batterie. Il secondo indica ai generatori di funzionare per soddisfare solo la domanda. *HOMER PRO* esegue le simulazioni con tutti e due i controller e sceglie la migliore da utilizzare per ottimizzare i risultati.

#### 4.1.8 - Economia

In figura 4-8 è presentato il modulo dell'economia.

Il "nominal discount rate", cioè tasso di sconto nominale, è un valore che serve per attualizzare il valore di flussi di cassa futuri. Esso è in pratica un indicatore di quali flussi di cassa può generare un progetto di investimento. La sua valutazione varia in base a molteplici fattori, e dipende da chi effettua questa valutazione in sede di progetto. In generale, il tasso di sconto può essere preso pari al tasso che l'investitore si aspetta di ricevere dal denaro speso, ma appunto questo valore non è univoco, e varia in base all'investimento. Per questo motivo, si effettua un'analisi di sensitività per questo valore, ponendolo pari a 4 valori: 2, 3, 4 e 5%. Per quanto riguarda il tasso di inflazione ("expected inflation rate"), esso varia di anno in anno. Nel 2019 è stato pari a circa 1% [16].

Il tempo di vita del progetto, nonché il tempo di riferimento per l'analisi, è di 25 anni, come accennato all'inizio del capitolo.

System fixed capital cost (€): costo iniziale del sistema. Come accennato nel paragrafo 3.1, l'unità polivalente non può essere modellata in *HOMER PRO*. La conseguenza è che i costi relativi alla sua installazione, e a quella dei ventilconvettori, deve essere tenuta in

considerazione tramite la sezione "economics". Si è considerato un costo specifico dell'unità polivalente pari a 250 €/kW, con una manodopera pari al 40%. Si prevedono infatti onerosi lavori di messa in opera, nonostante l'idea sia quella di sfruttare i tubi del teleriscaldamento già presenti. Il costo delle unità polivalenti, manodopera inclusa è di 2171400 €. I ventilconvettori, invece, hanno un costo di circa 250 € ciascuno, e si intende installarli nelle postazioni occupate dai vecchi radiatori. Il costo della manodopera è stimato in 200 € ciascuno. Il costo totale dei ventilconvettori è pari a 620100 €. Sommando i costi per le unità e per i ventilconvettori, si ottiene il valore in figura 4-8, alla voce "System fixed capital cost".

System fixed O&M cost (€/y): costi di operazione e manutenzione. Si stima che le unità polivalenti abbiano bisogno di una revisione ogni 4 anni, per un importo pari a 300 € ciascuna. Per tradurla in costi all'anno si moltiplica per il numero di unità e si divide per 4.

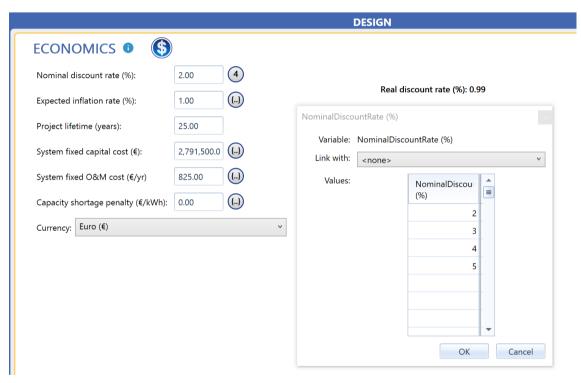


Figura 4-8 – Economia

# 4.1 – Schema del sistema

In figura 4-9 è rappresentato lo schema del sistema energetico proposto. Le frecce indicano le connessioni con le linee di corrente alternata (AC) e continua (DC), e il verso delle frecce indica banalmente la direzione dell'energia. L'unico modulo ad avere la sola freccia entrante è quello della domanda elettrica (SH+SC+ACS+EL). La rete e i panelli fotovoltaici hanno invece frecce solo uscenti. Il converter e le batterie hanno la doppia freccia: il converter perché serve da tramite per l'energia in corrente continua prodotta

dai pannelli e le batterie; le batterie perché funzionano appunto sia da accumulatori che da generatori.

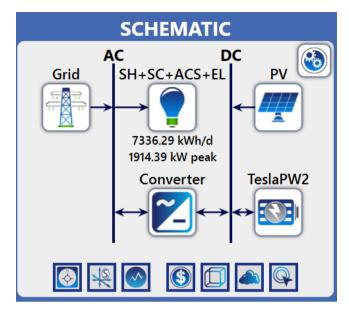


Figura 4-9 – Schema del sistema

# 4.2 – Risultati delle simulazioni

In questo paragrafo vengono analizzati i risultati delle simulazioni del caso studio con l'impianto proposto.

#### 4.2.1 - Sensitività



Figura 4-10 – Sensitività

Nella figura 4-10 sono presentati i risultati, già ottimizzati, delle analisi di sensitività. Sono infatti 8 risultati, corrispondenti alle combinazioni dei 4 valori delle variabili tasso di sconto e vita delle batterie (sezione "Sensitivity"). Nella sezione "Architecture" sono presenti i componenti previsti (e loro potenze o capacità) per ogni caso: da sinistra, pannelli, batterie, rete e convertitore. Si nota come l'icona delle batterie sia assente in tutti i risultati, e successivamente verrà spiegato perché. Il *NPC* è il "Net Present Cost" alla fine dell'analisi, cioè al 25-esimo anno di vita dell'impianto. Si nota come esso diminuisca con l'aumentare del tasso di sconto, proprio perché i flussi di cassa negli anni

diminuiscono con l'aumentare del tasso di sconto. Il *COE* è il "Cost of Electricity" e invece aumenta con l'aumentare del tasso di sconto.

#### 4.2.2 – Ottimizzazione

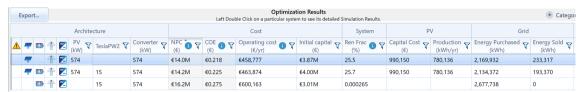


Figura 4-11 – Ottimizzazione

In figura 4-11 sono presentati i risultati dell'ottimizzazione relativa al primo caso della figura 4-10, cioè con tasso di sconto pari a 2% e vita delle batterie di 10 anni. Si nota come la configurazione ottimizzata, quindi quella con i più bassi NPC e COE, è composta da pannelli, rete e convertitore. Le batterie sono escluse, e questo rimane valido per tutti i casi dell'analisi di sensitività in figura 4-10 (ecco spiegata l'assenza dell'icona della batteria notata in precedenza), anche in quelli in cui la vita delle batterie è stata impostata in modo tale da non doverle sostituire qualora non avessero superato il throughput. Il motivo è presto detto: l'aggiunta delle batterie aumenta sia il NPC che il COE. Inoltre, esse aumentano la frazione da fonti rinnovabili (in figura indicata come "Ren Frac") in maniera tutt'altro che apprezzabile. La conclusione quindi è:

Si sceglie una configurazione definitiva composta da pannelli fotovoltaici, inverter, unità polivalenti e ventilconvettori.

#### 4.2.3 – Pannelli fotovoltaici Cost Summary Cash Flow Compare Economics Electrical Renewable Penetration Sunpower Mono 390W Grid System Converter Emissions Quantity Value Units Quantity Value Units Rated Capacity 574 kW 0 kW Minimum Output Mean Output 92.8 kW Maximum Output 586 kW Mean Output 2.227 kWh/d PV Penetration 30.4 0/6 Capacity Factor 16.2 Hours of Operation 4.385 Total Production 812,917 kWh/yr Levelized Cost 0.0658 €/kWh PV Power Output 600 kW 360 kW 240 kW 120 kW

Figura 4-12 – Risultati dei pannelli solari

0 kW

In figura 4-12 è mostrato il pannello dei risultati relativi ai pannelli fotovoltaici, nel primo anno. È importante specificarlo, perché nel corso degli anni la produzione totale dei

pannelli, che in figura è di circa 813 MWh/y, diminuirà. Le ore di funzionamento sono 4385, praticamente metà dell'anno. Il risultato impressionante è il *Levelized Cost* che, se paragonato al costo dell'energia elettrica acquistata dalla rete, è davvero molto basso. Tutti gli altri risultati fanno riferimento a valori medi, pertanto non molto utili per l'analisi in questione. Nel grafico, si nota un andamento di crescita man mano che ci si avvicina ai mesi estivi. La produzione negli altri mesi, tuttavia, è comunque rilevante.

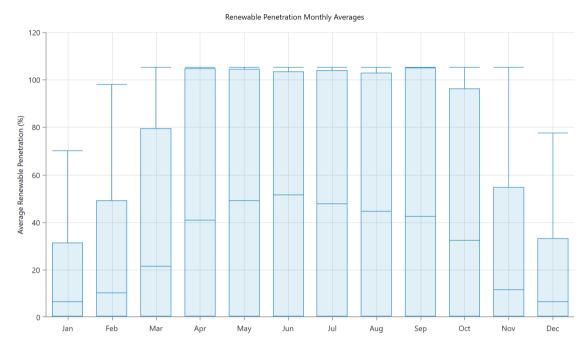


Figura 4-13 – Penetrazione delle fonti rinnovabili

In figura 4-13 vi è la penetrazione delle fonti rinnovabili, per ogni mese. Essa corrisponde banalmente alla penetrazione dei pannelli solari. Ogni barra dell'istogramma presenta tre livelli, e a partire dall'alto sono:

- massimo annuale;
- media dei massimi giornalieri nel mese;
- · media mensile.

Il dato più rilevante è sicuramente il terzo, la media mensile: la penetrazione delle rinnovabili media mensile è superiore al 40% da aprile a settembre, per poi scendere drasticamente tra novembre e febbraio (per effetto soprattutto dell'aumento della domanda, non tanto invece per la diminuzione della produzione dei pannelli nei mesi invernali).

| le Penetration     | Sunpower N                   | Mono 390W            | Grid Systen                      | n Converter       | Emissions          |                    |  |  |
|--------------------|------------------------------|----------------------|----------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--|--|
| Rate Schedule: All |                              |                      |                                  |                   |                    |                    |  |  |
| Month              | Energy<br>Purchased<br>(kWh) | Energy<br>Sold (kWh) | Net Energy<br>Purchased<br>(kWh) | Peak Load<br>(kW) | Energy<br>Charge € | Demand<br>Charge € |  |  |
| January            | 504,989                      | 0                    | 504,989                          | 1,914             | €111,097.5         | €0                 |  |  |
| February           | 368,350                      | 0                    | 368,350                          | 1,814             | €81,036.99         | €0                 |  |  |
| March              | 214,686                      | 5,323                | 209,362                          | 1,648             | €46,538.79         | €0                 |  |  |
| April              | 58,454                       | 29,039               | 29,415                           | 611               | €9,084.77          | €0                 |  |  |
| May                | 37,960                       | 43,980               | -6,020                           | 282               | €2,633.74          | €0                 |  |  |
| June               | 36,861                       | 42,344               | -5,483                           | 295               | €2,604.66          | €0                 |  |  |
| July               | 55,133                       | 31,768               | 23,365                           | 402               | €7,999.36          | €0                 |  |  |
| August             | 52,252                       | 34,958               | 17,294                           | 427               | €6,950.81          | €0                 |  |  |
| September          | 38,407                       | 42,464               | -4,057                           | 273               | €2,929.19          | €0                 |  |  |
| October            | 85,355                       | 19,968               | 65,387                           | 1,196             | €16,182.34         | €0                 |  |  |
| November           | 266,791                      | 1,817                | 264,973                          | 1,502             | €58,457.68         | €0                 |  |  |
| December           | 437,899                      | 0                    | 437,899                          | 1,907             | €96,337.77         | €0                 |  |  |
| Annual             | 2,157,135                    | 251,662              | 1,905,473                        | 1,914             | €441,853.6         | €0                 |  |  |

Figura 4-14 – Riepilogo dell'energia acquistata e venduta

In figura 4-14 sono mostrati i valori relativi all'energia acquistata e venduta per ogni mese, e il totale annuale. Si nota come nei mesi più freddi si abbia un valore di energia venduta pressoché nullo. Ciò significa che tutta l'energia prodotta dai pannelli in questi mesi viene autoconsumata. Questo è sicuramente un altro motivo per cui *HOMER PRO* ha scartato le batterie elettriche: venendo appunto autoconsumata tutta l'energia prodotta, d'inverno esse risulterebbero praticamente inutilizzate. Solo in 3 mesi dello anno si riescono ad avere dei valori di energia venduta superiore a quella acquistata, ma i valori associati a questa situazione non sono nemmeno significativi. Si ricorda sempre che, anche questi valori, sono associati al primo anno sui 25 totali.

# 4.2.5 – Valori energetici su base mensile

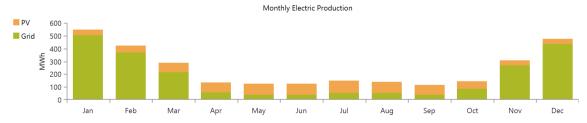


Figura 4-15 - Valori energetici su base mensile

# 5 – Analisi economica

In questo capitolo viene analizzata la fattibilità economica della configurazione proposta per l'intero complesso residenziale del caso studio. Si ricorda essere:

- 11 unità polivalenti AERMEC NRP 1800;
- 1378 ventilconvettori AERMEC OMNIA UL36;
- 1472 pannelli fotovoltaici SUNPOWER SPR MAX3 390W.

Per eseguire l'analisi bisogna avere a disposizione i flussi di cassa sia della configurazione proposta, sia del caso base, ovverosia il caso in cui non viene installato nessun componente e la situazione rimane quella attuale. Alcuni dei flussi di cassa sono inclusi nei risultati delle simulazioni di *HOMER PRO*, e questo significa che bisogna impostare la simulazione del caso base.

## 5.1 – Simulazione con HOMER PRO del caso base

Ancora una volta, vengono descritti gli input per la simulazione, ma più brevemente.

# 5.1.1 – Carichi e componenti

In figura 5-1 è raffigurato lo schema del caso base. Partendo da sinistra e in senso orario si hanno:

- rete elettrica;
- domanda elettrica, relativa al condizionamento estivo e agli elettrodomestici;
- domanda termica, relativa all'acqua calda sanitaria;
- caldaia tradizionale.

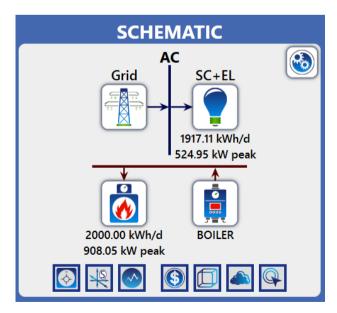


Figura 5-1 – Schema del caso base

La rete elettrica è modellata come descritto nel paragrafo 4.1.4.

La domanda elettrica si compone delle due parti, elettrodomestici e condizionamento estivo. La parte per il condizionamento estivo è stata costruita con due ipotesi:

- 1. Tutti gli appartamenti dispongono di un condizionatore. In realtà, in Piemonte la superficie condizionata per raffrescamento è circa il 40%, ma se si prendesse questa percentuale come ipotesi, le conseguenze sarebbero:
  - bisogna tenere in conto il costo dell'installazione dei condizionatori, che potrebbe essere molto ingente o comunque vario da caso a caso. Inoltre, chi non ha un condizionatore potrebbe non volerlo installare;
  - chi ha già un condizionatore vedrebbe un risultato economico peggiore, influenzato dal fatto che la domanda elettrica per il condizionamento estivo sarebbe più bassa nel caso base che nel caso elettrificato. Una alternativa sarebbe quella di considerare, anche approssimativamente, il costo di installazione dei condizionatori per il 60% della superficie non realmente condizionata, ma il risultato peggiorerebbe di nuovo per chi ha già un condizionatore.
- 2. L'efficienza dei condizionatori del caso base è uguale a quella delle unità polivalenti in modalità refrigeratori (ma senza il recuperatore totale). Di solito le unità più grandi lavorano ad efficienze superiori a quelle delle unità più piccole, ecco perché ci si è messi comunque in una posizione conservativa da questo punto di vista.

In definitiva, la domanda elettrica per condizionamento estivo è uguale per i due casi, quello elettrificato e quello base. In questo modo, chi non ha il condizionatore vedrebbe come ulteriore vantaggio, derivato dall'elettrificazione, quello di avere il proprio appartamento raffrescato, mentre chi ha già il condizionatore vedrebbe comunque un risultato economico più congruo alla propria situazione.

La domanda termica per acqua calda sanitaria è quella calcolata con la (2.7).

La caldaia è considerata essere quella tradizionale, con una efficienza di circa 85%. Il combustibile usato è il gas naturale, il cui prezzo medio nel 2018 è stato pari a 1,13 €/m³ [13]. Questo prezzo così elevato si riferisce ai consumatori più piccoli, precisamente con consumi inferiori ai 526 m³/y, dove le imposte e le spese di gestione del trasporto e del contatore incidono di più sul prezzo del metro cubo. Questa assunzione è compatibile con il fatto che gli edifici in questione sono teleriscaldati, e quindi non hanno un consumo elevato di gas naturale poiché la quota del riscaldamento è appunto servita dal teleriscaldamento. Infatti, le famiglie del caso studio consumano una media di circa 120 m³/y per l'acqua calda sanitaria, a cui vanno aggiunti circa 100 m³/y per la cottura dei cibi. Sommando queste due quote, si è ampiamente al di sotto dei 526 m³/y.

#### 5.1.2 - Economia

|                                    |            |          | DESIGN                       |
|------------------------------------|------------|----------|------------------------------|
| ECONOMICS <b>(</b>                 | )          |          |                              |
| Nominal discount rate (%):         | 2.00       | 4        |                              |
| Expected inflation rate (%):       | 1.00       | ()       | Real discount rate (%): 0.99 |
| Project lifetime (years):          | 25.00      |          |                              |
| System fixed capital cost (€):     | 0.00       |          |                              |
| System fixed O&M cost (€/yr)       | 428,444.56 |          |                              |
| Capacity shortage penalty (€/kWh): | 0.00       | (.)      |                              |
| Currency: Euro (€)                 |            | <b>~</b> |                              |

Figura 5-2 – Economia

In figura 5-2 è raffigurato il modulo dell'economia per quanto riguarda il caso base. I tassi di sconto, inflazione e il tempo di vita sono stati lasciati invariati rispetto al caso elettrificato; gli input che cambiano sono quelli relativi ai costi di investimento e di manutenzione e operazione. I costi di investimento sono ovviamente nulli per ipotesi, mentre i costi O&M sono diversi da zero. Come si sarà sicuramente notato, nel paragrafo 5.1.1 è assente la domanda termica per riscaldamento. Il motivo risiede nel fatto che per l'analisi economica è importante solo il prezzo dell'energia termica, fornita dal teleriscaldamento, al chilowattora. Il prezzo del teleriscaldamento varia in base al periodo di fornitura del servizio [17]. Il prezzo medio per la stagione di riscaldamento 2018/2019 risulta essere

$$C_{kWh,tel} = 0.0880915 \stackrel{\text{e}}{=} /_{kWh}$$
 (5.1)

Il costo totale del teleriscaldamento per ogni anno si calcola con la seguente equazione:

$$C_{tel} = C_{kWh,tel} \cdot E_{SH} = 428444,56$$
 (5.2)

Con  $E_{SH}$  espresso in kWh.  $C_{tel}$  deve quindi essere inserito nella casella O&M.

#### 5.1.3 – Risultati della simulazione del caso base

L'unico risultato ad interessare per l'analisi economica è il totale dei costi operativi (in figura 5-3 sono gli "Operating Cost", validi per tutti gli anni), espressi in €/y. Per come è stato modellato il caso base, i costi operativi corrispondono alla spesa annuale per l'energia, sia elettrica che termica.



Figura 5-3 – Costi operativi

## 5.2 – Valore Attuale Netto

Il risultato finale che si vuole ottenere è una quantificazione in anni del tempo di ritorno dell'investimento. Per ottenere il tempo di ritorno, si utilizza il concetto di *Valore Attuale Netto*:

$$VAN = -I + \sum_{t=1}^{n} \frac{V_t}{(1+i)^t}$$
 (5.3)

Con

- *VAN* Valore Attuale Netto espresso in €;
- I costo di investimento iniziale;
- *n* numero di anni di riferimento, pari a 25;
- t anno t-esimo;
- $V_t$  flusso di cassa nell'anno t;
- $\frac{V_t}{(1+i)^t}$  flusso di cassa attualizzato;
- *i* tasso di sconto reale.

Per quanto riguarda il tasso di sconto reale, esso si calcola a partire dal tasso di sconto nominale  $i^\prime$  e dal tasso di inflazione f

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \tag{5.4}$$

il termine  $\frac{1}{(1+i)^t}$  presente nella equazione ... è chiamato fattore di sconto, e serve per attualizzare i flussi di cassa negli anni t-esimi. L'anno t per cui il VAN si annulla, è chiamato tempo di ritorno dell'investimento.

Il costo di investimento è stato calcolato, i fattori di sconto (per ogni anno e per ogni tasso di sconto) anche, rimangono da calcolare i flussi di cassa.

Per il calcolo dei flussi di cassa, bisogna individuare tutti i fattori che li compongono.

## 5.2.1 – Flussi di cassa, risparmi energetici

l risparmi energetici annuali  $RE_t$  vengono calcolati sottraendo la spesa per l'energia del caso elettrificato  $S_t^{el}$  alla spesa per l'energia del caso base  $S_t^{base}$ :

$$RE_{t} = \frac{1}{(1+i)^{t}} (S_{t}^{base} - S_{t}^{el})$$
 (5.5)

I risparmi energetici si hanno durante tutto il periodo di analisi, quindi tutti e 25 gli anni. In tabella 5-1 sono presentati i valori espressi in € delle spese per l'energia e i risparmi, con attualizzazione al 2% (il 2% è il tasso di sconto nominale, cui corrisponde un tasso di sconto reale dello 0,99%). Come si può notare, la spesa nominale energia nel caso elettrificato cresce ogni anno: il motivo risiede nella degradazione dei pannelli che, generando una minore quantità di energia, portano a un aumento dell'energia prelevata dalla rete di anno in anno. Tuttavia, se si passa all'attualizzazione tramite l'applicazione del tasso di sconto, la spesa energia diminuisce comunque. Questo effetto non si riversa sui risparmi, che invece diminuiscono di anno in anno, poiché l'attualizzazione influisce alla stessa maniera sia per la spesa energia del caso base che per quella del caso elettrificato.

| Spesa ener | gia caso base | Spesa energia | caso elettrificato | Risparmi  |             |  |
|------------|---------------|---------------|--------------------|-----------|-------------|--|
| Nominale   | Scontata 2%   | Nominale      | Scontata 2%        | Nominali  | Scontati 2% |  |
| € 0        | €0            | €0            | €0                 | €0        | €0          |  |
| € 680.664  | € 673.991     | €441.854      | €437.522           | € 238.810 | € 236.469   |  |
| € 680.664  | € 667.383     | €442.297      | €433.667           | € 238.367 | € 233.716   |  |
| € 680.664  | € 660.840     | €442.738      | €429.844           | € 237.926 | € 230.996   |  |
| € 680.664  | € 654.361     | €443.179      | €426.053           | € 237.485 | € 228.308   |  |
| € 680.664  | € 647.946     | €443.618      | €422.294           | € 237.046 | € 225.652   |  |
| € 680.664  | € 641.593     | €444.056      | €418.567           | € 236.608 | € 223.026   |  |
| € 680.664  | € 635.303     | €444.493      | €414.871           | € 236.171 | € 220.432   |  |
| € 680.664  | € 629.075     | €444.928      | €411.206           | € 235.736 | € 217.869   |  |
| € 680.664  | € 622.907     | €445.363      | €407.573           | € 235.301 | € 215.335   |  |
| € 680.664  | € 616.800     | €445.796      | €403.969           | € 234.868 | € 212.831   |  |
| € 680.664  | € 610.753     | €446.228      | €400.396           | € 234.436 | € 210.357   |  |
| € 680.664  | € 604.766     | €446.658      | €396.853           | € 234.006 | € 207.913   |  |
| € 680.664  | € 598.837     | €447.087      | €393.340           | € 233.577 | € 205.497   |  |
| € 680.664  | € 592.966     | €447.515      | €389.856           | € 233.149 | € 203.109   |  |
| € 680.664  | € 587.152     | €447.942      | €386.402           | € 232.722 | € 200.750   |  |
| € 680.664  | € 581.396     | €448.367      | €382.977           | € 232.297 | € 198.419   |  |
| € 680.664  | € 575.696     | €448.791      | €379.581           | € 231.873 | € 196.115   |  |
| € 680.664  | € 570.052     | €449.214      | €376.214           | € 231.450 | € 193.838   |  |
| € 680.664  | € 564.463     | €449.635      | €372.875           | € 231.029 | € 191.588   |  |
| € 680.664  | € 558.929     | €450.055      | €369.564           | € 230.609 | € 189.365   |  |
| € 680.664  | € 553.449     | €450.474      | €366.281           | € 230.190 | € 187.168   |  |
| € 680.664  | € 548.023     | €450.892      | €363.027           | € 229.772 | € 184.996   |  |
| € 680.664  | € 542.651     | €451.309      | €359.800           | € 229.355 | € 182.850   |  |
| € 680.664  | € 537.331     | €451.724      | €356.601           | € 228.940 | € 180.730   |  |
| € 680.664  | € 532.063     | €452.138      | €353.428           | € 228.526 | € 178.634   |  |

Tabella 5-1 – Spese e risparmi energetici

# 5.2.2 – Flussi di cassa, sostituzione degli inverter

La vita degli inverter è stata assunta di 15 anni, ciò significa che alla fine del quindicesimo anno si prevede la sostituzione degli stessi, per una cifra attualizzata pari a

$$SI_{15} = \frac{1}{(1+i)^{15}}CI_0 = 79223$$
 (5.6)

Con  $SI_{15}$  sostituzione degli inverter alla fine del quindicesimo anno e  $CI_0$  costo degli inverter al tempo zero. Il valore si riferisce ad un tasso di sconto nominale i' pari al 2%.

# 5.2.3 – Flussi di cassa, detrazioni IRPEF o sconti immediati

Per incentivare l'installazione di componenti che fanno uso di fonti rinnovabili, sono previsti dei benefici fiscali che variano di anno in anno, e per ogni tipo di intervento. Sul sito della Gazzetta Ufficiale è stata pubblicata la *Legge di Bilancio 2019* [18], che prevede la proroga per tutto il 2019 delle condizioni di accesso alle agevolazioni fiscali per quanto riguarda gli interventi di recupero edilizio e di riqualificazione energetica. Le installazioni delle pompe di calore (nel caso studio, le unità polivalenti) e dei pannelli fotovoltaici rientrano in questa casistica, e si ha diritto ad una detrazione IRPEF (Imposta sul Reddito delle Persone Fisiche) così quantificata:

- dal 50% al 65% del costo di investimento per le pompe di calore;
- il 50% del costo di investimento per i pannelli fotovoltaici.

I benefici sono erogati in 10 rate per 10 anni, una rata all'anno. Per quanto riguarda la detrazione inerente alle unità polivalenti, la percentuale riconosciuta dipende dall'efficienza dell'impianto; poiché l'impianto proposto non lavora ad una efficienza così alta da accedere al 65% (i terminali non sono stati infatti sostituiti con terminali a bassa temperatura), si assume un beneficio fiscale del 50%. La detrazione IRPEF sarà quindi del 50% del costo totale di investimento. Ovviamente, le rate corrispondono quindi al 5% dell'investimento totale, per 10 anni, e devono essere attualizzate tramite l'applicazione dei tassi di sconto reali presi in considerazione.

Un'alternativa è rappresentata dall'approvazione del *Decreto Crescita* [19], che prevede la sostituzione delle detrazioni IRPEF con uno sconto immediato. Questa soluzione è sicuramente più vantaggiosa, perché la somma scontata non deve essere attualizzata.

Verranno analizzati entrambi i casi: detrazione IRPEF e sconto immediato.

**Detrazione IRPEF:** 

$$De_{t'} = \frac{1}{(1+i)^{t'}} 0,05 \cdot I \tag{5.7}$$

Con t' che va da 1 a 10.

Sconto immediato:

$$Sc_0 = 0.5 \cdot I \tag{5.8}$$

# 5.3 – Risultati

Nelle prossime tabelle e grafici sono presentati i risultati dei due casi, detrazione IRPEF e sconto immediato. Si ricorda che le denominazioni di sconto si riferiscono al tasso di sconto nominale (2%, 3%, 4% e 5%), mentre il tasso applicato per la quantificazione è quello reale, cioè includendo l'inflazione.

5.3.1 – Caso detrazione IRPEF

| J.J.1 | Cuso activizione |              |                 |             |             |
|-------|------------------|--------------|-----------------|-------------|-------------|
|       |                  |              | caso detrazione |             |             |
| Anno  | Nominale         | Scontata 2%  | Scontata 3%     | Scontata 4% | Scontata 5% |
| 0     | -€3.873.490      | -€3.873.490  | -€3.873.490     | -€3.873.490 | -€3.873.490 |
| 1     | € 432.484        | € 428.244    | € 424.087       | € 420.009   | € 416.009   |
| 2     | € 432.041        | € 423.611    | € 415.426       | € 407.475   | € 399.751   |
| 3     | € 431.600        | € 419.030    | € 406.944       | € 395.317   | € 384.130   |
| 4     | € 431.159        | € 414.498    | € 398.634       | € 383.522   | € 369.119   |
| 5     | € 430.720        | € 410.017    | € 390.496       | € 372.079   | € 354.696   |
| 6     | € 430.282        | € 405.584    | € 382.524       | € 360.979   | € 340.836   |
| 7     | € 429.845        | € 401.200    | € 374.715       | € 350.210   | € 327.519   |
| 8     | € 429.410        | € 396.864    | € 367.067       | € 339.764   | € 314.723   |
| 9     | € 428.975        | € 392.575    | € 359.575       | € 329.628   | € 302.427   |
| 10    | € 428.542        | € 388.334    | € 352.237       | € 319.797   | € 290.613   |
| 11    | € 234.436        | € 210.357    | € 188.951       | € 169.900   | € 152.924   |
| 12    | € 234.006        | € 207.913    | € 184.942       | € 164.696   | € 146.829   |
| 13    | € 233.577        | € 205.497    | € 181.019       | € 159.652   | € 140.976   |
| 14    | € 233.149        | € 203.109    | € 177.179       | € 154.762   | € 135.357   |
| 15    | € 140.882        | € 121.527    | € 104.983       | € 90.819    | € 78.675    |
| 16    | € 232.297        | € 198.419    | € 169.742       | € 145.429   | € 124.783   |
| 17    | € 231.873        | € 196.115    | € 166.142       | € 140.976   | € 119.811   |
| 18    | € 231.450        | € 193.838    | € 162.619       | € 136.660   | € 115.036   |
| 19    | € 231.029        | € 191.588    | € 159.171       | € 132.476   | € 110.452   |
| 20    | € 230.609        | € 189.365    | € 155.797       | € 128.421   | € 106.052   |
| 21    | € 230.190        | € 187.168    | € 152.494       | € 124.490   | € 101.826   |
| 22    | € 229.772        | € 184.996    | € 149.262       | € 120.679   | € 97.769    |
| 23    | € 229.355        | € 182.850    | € 146.098       | € 116.986   | € 93.874    |
| 24    | € 228.940        | € 180.730    | € 143.002       | € 113.406   | € 90.135    |
| 25    | € 228.526        | € 178.634    | € 139.971       | € 109.935   | € 86.544    |
|       |                  | _ , ,, , _ , |                 |             |             |

Tabella 5-2 – Flussi di cassa, caso detrazione IRPEF

In tabella 5-2 sono quantificati i flussi di cassa nel caso della detrazione IRPEF. I flussi sono molto alti per i primi 10 anni, per effetto delle detrazioni IRPEF, per poi subire una drastica diminuzione dall'undicesimo anno in poi e diminuire ancora. Si nota il flusso di cassa più basso nel quindicesimo anno, in cui c'è la sostituzione degli inverter.

| Cumulata flussi di cassa, caso detrazione IRPEF |             |             |             |             |             |  |  |  |  |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|--|--|--|
| Anno  | Nominale    | Scontata 2% | Scontata 3% | Scontata 4% | Scontata 5% |  |  |  |  |
| 0   | -€3.873.490 | -€3.873.490 | -€3.873.490 | -€3.873.490 | -€3.873.490 |  |  |  |  |
| 1   | -€3.441.006 | -€3.445.246 | -€3.449.403 | -€3.453.481 | -€3.457.481 |  |  |  |  |
| 2   | -€3.008.964 | -€3.021.634 | -€3.033.978 | -€3.046.006 | -€3.057.730 |  |  |  |  |
| 3   | -€2.577.364 | -€2.602.604 | -€2.627.034 | -€2.650.689 | -€2.673.601 |  |  |  |  |
| 4   | -€2.146.205 | -€2.188.106 | -€2.228.400 | -€2.267.167 | -€2.304.482 |  |  |  |  |
| 5   | -€1.715.485 | -€1.778.089 | -€1.837.904 | -€1.895.088 | -€1.949.786 |  |  |  |  |
| 6   | -€1.285.202 | -€1.372.506 | -€1.455.381 | -€1.534.109 | -€1.608.950 |  |  |  |  |
| 7   | -€855.357   | -€971.306   | -€1.080.666 | -€1.183.899 | -€1.281.431 |  |  |  |  |
| 8   | -€425.947   | -€574.442   | -€713.598   | -€844.135   | -€966.707   |  |  |  |  |
| 9   | €3.029      | -€181.866   | -€354.023   | -€514.507   | -€664.280   |  |  |  |  |
| 10  | €431.571    | €206.468    | -€1.786     | -€194.710   | -€373.668   |  |  |  |  |
| 11  | €666.007    | €416.825    | €187.165    | -€24.811    | -€220.743   |  |  |  |  |
| 12  | €900.013    | €624.738    | €372.107    | €139.885    | -€73.914    |  |  |  |  |
| 13  | €1.133.589  | €830.235    | €553.126    | €299.537    | €67.062     |  |  |  |  |
| 14  | €1.366.738  | €1.033.344  | €730.305    | €454.300    | €202.420    |  |  |  |  |
| 15  | €1.507.620  | €1.154.871  | €835.287    | €545.118    | €281.094    |  |  |  |  |
| 16  | €1.739.917  | €1.353.290  | €1.005.030  | €690.548    | €405.878    |  |  |  |  |
| 17  | €1.971.790  | €1.549.405  | €1.171.172  | €831.524    | €525.688    |  |  |  |  |
| 18  | €2.203.239  | €1.743.242  | €1.333.791  | €968.184    | €640.724    |  |  |  |  |
| 19  | €2.434.268  | €1.934.831  | €1.492.962  | €1.100.661  | €751.177    |  |  |  |  |
| 20  | €2.664.877  | €2.124.196  | €1.648.759  | €1.229.082  | €857.229    |  |  |  |  |
| 21  | €2.895.067  | €2.311.364  | €1.801.253  | €1.353.572  | €959.055    |  |  |  |  |
| 22  | €3.124.839  | €2.496.360  | €1.950.515  | €1.474.251  | €1.056.824  |  |  |  |  |
| 23  | €3.354.193  | €2.679.210  | €2.096.613  | €1.591.237  | €1.150.698  |  |  |  |  |
| 24  | €3.583.133  | €2.859.940  | €2.239.614  | €1.704.642  | €1.240.833  |  |  |  |  |
| 25  | €3.811.659  | €3.038.575  | €2.379.586  | €1.814.578  | €1.327.377  |  |  |  |  |

Tabella 5-3 – Cumulata dei flussi di cassa, caso detrazione IRPEF

In tabella 5-3 è presentata invece la cumulata. I valori in grassetto al venticinquesimo anno rappresentano il VAN, che banalmente assume il valore più alto nelle condizioni nominali, vale a dire le condizioni in cui non è stato applicato nessun tasso di sconto, che equivale a non considerare l'attualizzazione dei flussi di cassa futuri. Il VAN decresce con l'aumentare del tasso di sconto proprio perché, aumentando il tasso di sconto, i flussi di cassa pesano sempre meno.

Il momento in cui si passa da un valore negativo della cumulata a uno positivo è proprio il tempo di ritorno dell'investimento: esso cresce con il crescere del tasso di sconto, per lo stesso motivo della decrescita del VAN. Il tempo di ritorno senza considerare il tasso

di sconto è chiamato "tempo di ritorno semplice", e in questo caso è pari a poco meno di 9 anni. I valori assunti dal tempo di ritorno con i vari tassi di sconto sono:

- tasso di sconto reale 0,99% (nominale 2%): circa 9 anni e mezzo;
- tasso di sconto reale 1,98% (nominale 3%): poco più di 10 anni;
- tasso di sconto reale 2,97% (nominale 4%): poco più di 11 anni;
- tasso di sconto reale 3,96% (nominale 5%): circa 12 anni e mezzo.

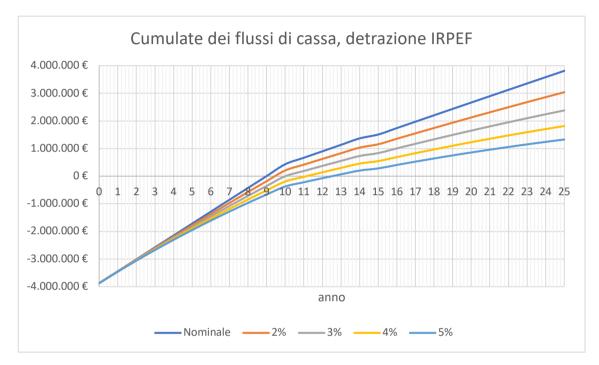


Grafico 5-1 – Cumulate dei flussi dicassa nel caso di detrazione IRPEF

# 5.3.2 – Caso sconto immediato

Ora invece viene presentato il caso in cui si applica lo sconto immediato. Ci si aspetta un tempo di ritorno inferiore al caso precedente.

In tabella 5-4 sono elencati i flussi di cassa nel caso di sconto immediato. Questa tipologia di beneficio fiscale va applicata come sconto direttamente nel termine dello investimento iniziale, ecco perché all'anno zero si ha un termine che è la metà del caso precedente.

Come si nota in tabella 5-5, Il VAN rimane identico nel caso nominale, ma è più alto rispetto a prima nei casi con il tasso di sconto applicato. Inoltre, i tempi di ritorno sono più brevi, ma questi risultati erano attesi in quanto lo sconto immediato non deve essere attualizzato come le rate di detrazione IRPEF. Il tempo di ritorno semplice è pari a poco più di 8 anni, leggermente inferiore al caso precedente. Per quanto riguarda invece i tempi di ritorno con i tassi applicati, essi sono:

- tasso di sconto reale 0,99% (nominale 2%): circa 8 anni e mezzo;
- tasso di sconto reale 1,98% (nominale 3%): poco meno di 9 anni;
- tasso di sconto reale 2,97% (nominale 4%): circa 9 anni e mezzo;
- tasso di sconto reale 3,96% (nominale 5%): poco più di 10 anni.

Le differenze di tempo di ritorno sonno sottili pe quanto riguarda il caso nominale, ma crescono non trascurabilmente al crescere del tasso di sconto applicato. Per esempio, con un tasso di 3,96%, si ha una ragguardevole differenza di 2 anni e mezzo.

|      | Flussi di cassa, caso sconto immediato |             |             |             |             |  |  |  |  |  |
|------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|--|--|--|--|--|
| Anno | Nominale                               | Scontata 2% | Scontata 3% | Scontata 4% | Scontata 5% |  |  |  |  |  |
| 0    | -€1.936.745                            | -€1.936.745 | -€1.936.745 | -€1.936.745 | -€1.936.745 |  |  |  |  |  |
| 1    | € 238.810                              | € 236.469   | € 234.173   | € 231.921   | € 229.712   |  |  |  |  |  |
| 2    | € 238.367                              | € 233.716   | € 229.200   | € 224.813   | € 220.551   |  |  |  |  |  |
| 3    | € 237.926                              | € 230.996   | € 224.333   | € 217.924   | € 211.757   |  |  |  |  |  |
| 4    | € 237.485                              | € 228.308   | € 219.570   | € 211.246   | € 203.313   |  |  |  |  |  |
| 5    | € 237.046                              | € 225.652   | € 214.908   | € 204.773   | € 195.206   |  |  |  |  |  |
| 6    | € 236.608                              | € 223.026   | € 210.346   | € 198.499   | € 187.422   |  |  |  |  |  |
| 7    | € 236.171                              | € 220.432   | € 205.881   | € 192.417   | € 179.950   |  |  |  |  |  |
| 8    | € 235.736                              | € 217.869   | € 201.511   | € 186.522   | € 172.775   |  |  |  |  |  |
| 9    | € 235.301                              | € 215.335   | € 197.234   | € 180.807   | € 165.887   |  |  |  |  |  |
| 10   | € 234.868                              | € 212.831   | € 193.048   | € 175.268   | € 159.274   |  |  |  |  |  |
| 11   | € 234.436                              | € 210.357   | € 188.951   | € 169.900   | € 152.924   |  |  |  |  |  |
| 12   | € 234.006                              | € 207.913   | € 184.942   | € 164.696   | € 146.829   |  |  |  |  |  |
| 13   | € 233.577                              | € 205.497   | € 181.019   | € 159.652   | € 140.976   |  |  |  |  |  |
| 14   | € 233.149                              | € 203.109   | € 177.179   | € 154.762   | € 135.357   |  |  |  |  |  |
| 15   | € 140.882                              | € 121.527   | € 104.983   | € 90.819    | € 78.675    |  |  |  |  |  |
| 16   | € 232.297                              | € 198.419   | € 169.742   | € 145.429   | € 124.783   |  |  |  |  |  |
| 17   | € 231.873                              | € 196.115   | € 166.142   | € 140.976   | € 119.811   |  |  |  |  |  |
| 18   | € 231.450                              | € 193.838   | € 162.619   | € 136.660   | € 115.036   |  |  |  |  |  |
| 19   | € 231.029                              | € 191.588   | € 159.171   | € 132.476   | € 110.452   |  |  |  |  |  |
| 20   | € 230.609                              | € 189.365   | € 155.797   | € 128.421   | € 106.052   |  |  |  |  |  |
| 21   | € 230.190                              | € 187.168   | € 152.494   | € 124.490   | € 101.826   |  |  |  |  |  |
| 22   | € 229.772                              | € 184.996   | € 149.262   | € 120.679   | € 97.769    |  |  |  |  |  |
| 23   | € 229.355                              | € 182.850   | € 146.098   | € 116.986   | € 93.874    |  |  |  |  |  |
| 24   | € 228.940                              | € 180.730   | € 143.002   | € 113.406   | € 90.135    |  |  |  |  |  |
| 25   | € 228.526                              | € 178.634   | € 139.971   | € 109.935   | € 86.544    |  |  |  |  |  |

Tabella 5-4 – Flussi di cassa, caso sconto immediato

| Cumulata flussi di cassa, caso sconto immediato |                          |                          |                          |                          |                          |  |  |  |  |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--|--|--|--|
| Anno  | Nominale                 | Scontata 2%              | Scontata 3%              | Scontata 4%              | Scontata 5%              |  |  |  |  |
| 0   | -€1.936.745              | -€1.936.745              | -€1.936.745              | -€1.936.745              | -€1.936.745              |  |  |  |  |
| 1   | -€1.697.935              | -€1.700.276              | -€1.702.572              | -€1.704.824              | -€1.707.033              |  |  |  |  |
| 2   | -€1.459.568              | -€1.466.561              | -€1.473.373              | -€1.480.011              | -€1.486.481              |  |  |  |  |
| 3   | -€1.221.643              | -€1.235.564              | -€1.249.039              | -€1.262.086              | -€1.274.724              |  |  |  |  |
| 4   | -€984.158                | -€1.007.257              | -€1.029.469              | -€1.050.841              | -€1.071.412              |  |  |  |  |
| 5   | -€747.112                | -€781.605                | -€814.561                | -€846.068                | -€876.206                |  |  |  |  |
| 6   | -€510.504                | -€558.579                | -€604.215                | -€647.569                | -€688.784                |  |  |  |  |
| 7   | -€274.333                | -€338.147                | -€398.335                | -€455.153                | -€508.834                |  |  |  |  |
| 8   | -€38.598                 | -€120.278                | -€196.824                | -€268.631                | -€336.059                |  |  |  |  |
| 9   | €196.703                 | €95.057                  | €410                     | -€87.824                 | -€170.172                |  |  |  |  |
| 10  | €431.571                 | €307.888                 | €193.458                 | €87.445                  | -€10.898                 |  |  |  |  |
| 11  | €666.007                 | €518.245                 | €382.409                 | €257.344                 | €142.026                 |  |  |  |  |
| 12  | €900.013                 | €726.158                 | €567.351                 | €422.040                 | €288.855                 |  |  |  |  |
| 13  | €1.133.589               | €931.655                 | €748.370                 | €581.692                 | €429.832                 |  |  |  |  |
| 14  | €1.366.738               | €1.134.764               | €925.548                 | €736.455                 | €565.189                 |  |  |  |  |
| 15  | €1.507.620               | €1.256.292               | €1.030.531               | €827.274                 | €643.864                 |  |  |  |  |
| 16  | €1.739.917               | €1.454.710               | €1.200.273               | €972.703                 | €768.647                 |  |  |  |  |
| 17  | €1.971.790               | €1.650.825               | €1.366.415               | €1.113.679               | €888.458                 |  |  |  |  |
| 18  | €2.203.239               | €1.844.663               | €1.529.035               | €1.250.339               | €1.003.494               |  |  |  |  |
| 19  | €2.434.268               | €2.036.251               | €1.688.206               | €1.382.816               | €1.113.947               |  |  |  |  |
| 20  | €2.664.877               | €2.225.616               | €1.844.003               | €1.511.237               | €1.219.998               |  |  |  |  |
|   |                          |                          |                          |                          |                          |  |  |  |  |
| 21  | €2.895.067               | €2.412.784               | €1.996.497               | €1.635.727               | €1.321.824               |  |  |  |  |
|   | €2.895.067<br>€3.124.839 | €2.412.784<br>€2.597.780 | €1.996.497<br>€2.145.759 | €1.635.727<br>€1.756.406 | €1.321.824<br>€1.419.594 |  |  |  |  |
| 21  |                          |                          |                          |                          |                          |  |  |  |  |
| 21<br>22  | €3.124.839               | €2.597.780               | €2.145.759               | €1.756.406               | €1.419.594               |  |  |  |  |

Tabella 5-5 – Cumulata dei flussi di cassa, caso sconto immediato

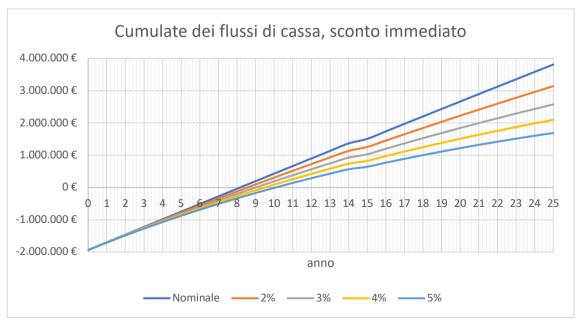


Grafico 5-2 – Cumulate dei flussi di cassa, caso sconto immediato

# 6 - Conclusioni

Il caso studio è composto da un insieme di 20 edifici, con vari numeri di piani, differenti epoche di costruzione e prestazioni energetiche dell'involucro diverse. Lo scopo dello studio è stato quello di elettrificare i consumi termici relativi al riscaldamento e l'acqua calda sanitaria, per poi proporre una soluzione impiantistica in grado di soddisfare la domanda elettrica utilizzando anche le fonti rinnovabili. L'obiettivo è stato perseguito mediante la modellizzazione di un impianto composto da una pluralità di unità polivalenti per la produzione di acqua calda e fredda e una quantità di pannelli fotovoltaici pari alla massima disponibile sui tetti degli edifici. La proposta delle batterie al litio è risultata non economicamente vantaggiosa, ed è quindi stata scartata.

Il risultato principale è il calcolo di un tempo di ritorno indicativo, utile a verificare una preliminare fattibilità del progetto. I tempi di ritorno sono stati calcolati con differenti condizioni iniziali, per esempio con tassi reali di sconto variabili dal 2% al 5% e come alternative il rimborso IRPEF o lo sconto immediato sull'investimento. I tassi di sconto sono altamente variabili, in quanto dipendono da chi investe il denaro, se e quanto è prestato o anticipato, o comunque da quanto l'investitore si aspetterebbe di guadagnare dal suo capitale se non lo volesse investire nel progetto, ma in altro. Comunque, il suo valore dipende da tutte le parti in gioco, e va discusso e fissato in sede progettuale; proprio per questo il tasso di sconto è stato inserito come variabile per uno studio di sensitività. Includendo anche il caso nominale, ovverosia senza tasso di sconto applicato, i tempi di ritorno variano da un minimo di 8 anni e mezzo a un massimo di 12 anni e mezzo. Non sono tempi brevi ma nemmeno insostenibili, e inoltre il Valore Attuale Netto è molto alto: nel caso del calcolo senza tasso di sconto, esso arriva quasi al valore dell'investimento, e questo significa che in 25 anni l'impianto genera un guadagno di quasi il 100% del valore di investimento.

Si può concludere che la fattibilità economica dell'impianto proposto è dimostrata.

# 6.1 – Osservazioni e sviluppi futuri

Questi valori dei tempi di ritorno sono validi con le ipotesi di calcolo fatte, vale a dire considerando il complesso residenziale come un insieme. Perciò, il valore rimane accurato se appunto il complesso residenziale ha un comportamento univoco, per esempio nell' andamento della domanda elettrica, e idealmente l'energia prodotta dai pannelli possa essere scambiata tra un edificio e l'altro. È inevitabile infatti che un edificio, se isolato, possa trovarsi in condizioni più sfavorevoli di un altro, dal punto di vista del rapporto tra pannelli fotovoltaici e consumi, ed è altrettanto inevitabile che dal punto di vista della domanda termica ogni edificio si comporterà diversamente. Nella realtà questo però non esiste questo comportamento univoco, di conseguenza i tempi di ritorno assumono più una valenza media tra un edificio nelle condizioni migliori e uno nelle condizioni peggiori.

Inoltre, questo risultato è conservativo, perché ad esempio i 5 edifici che non ospitano i pannelli solari, in verità hanno il tetto piatto, e alcuni pannelli fotovoltaici (che rappresentano la fonte di energia elettrica inserita) potrebbero essere comunque messi. Essi sono stati esclusi per una questione di incertezza sulla potenza da installare e sulla producibilità, ma con uno studio più approfondito si potrebbe prevedere l'installazione anche su questi edifici, che porterebbe sicuramente ad una ulteriore diminuzione del tempo di ritorno. Un altro motivo per cui il risultato è conservativo, è che i consumi per riscaldamento stimati utilizzando il *TABULA WebTool* sono considerevolmente più alti dei consumi dell'unico edificio di cui si avevano appunto i consumi monitorati. Ovviamente, non si è potuta eseguire una estrapolazione su tutti gli altri edifici, motivo per il quale si è deciso di operare con i consumi stimati, ma c'è un'alta probabilità che i consumi reali possano essere inferiori a quelli stimati, e questo significherebbe ridurre la capacità delle unità polivalenti da installare. Se si potessero avere tutti i consumi reali degli edifici, si potrebbe arrivare ad un risultato più preciso, ma sicuramente migliore dal punto di vista della fattibilità economica.

Per tutta la durata dello studio si è parlato di domanda per riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria ed elettrodomestici; all'appello manca la domanda di gas per la cottura dei cibi. Se ipoteticamente tutti gli abitanti del complesso residenziale decidessero di passare alla cottura per induzione, e si combinasse questo intervento con l'impianto proposto, il complesso sarebbe completamente indipendente dal gas, e conseguentemente si azzererebbero le emissioni di CO<sub>2</sub> in atmosfera da parte di questi edifici.

Per quanto riguarda i benefici fiscali, al livello condominiale essi possono raggiungere una percentuale altissima dell'investimento, pari addirittura al 75%, se gli interventi eseguiti permettono il raggiungimento di una certa prestazione energetica. Si potrebbe combinare l'impianto proposto con una riqualificazione dell'involucro degli edifici, magari iniziando delle ristrutturazioni che prevedono anche la sostituzione dei terminali per il condizionamento degli ambienti con terminali a bassa temperatura.

# Appendice 1

|           |             |                                      |                                   |                                      |                                   | TABULA                              | <b>.</b>                         |                                      |                                   |                                      |                                   |                                      |                                   |
|-----------|-------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Tipologia | Epoca C.    | U <sub>w1</sub> [W/m <sup>2</sup> K] | A <sub>w1</sub> [m <sup>2</sup> ] | U <sub>w2</sub> [W/m <sup>2</sup> k] | A <sub>w2</sub> [m <sup>2</sup> ] | U <sub>r</sub> [W/m <sup>2</sup> K] | A <sub>r</sub> [m <sup>2</sup> ] | U <sub>f1</sub> [W/m <sup>2</sup> K] | A <sub>f1</sub> [m <sup>2</sup> ] | U <sub>f2</sub> [W/m <sup>2</sup> K] | A <sub>f2</sub> [m <sup>2</sup> ] | U <sub>wi</sub> [W/m <sup>2</sup> K] | A <sub>wi</sub> [m <sup>2</sup> ] |
| MF        | 1919 - 1945 | 1,48                                 | 1050,4                            | 0,86                                 | 467,5                             | 1,48                                | 291,3                            | 1,23                                 | 291,3                             |                                      |                                   | 4,9                                  | 143,1                             |
| MF        | 1946 - 1960 | 1,48                                 | 586,1                             | 1,25                                 | 192,6                             | 1,1                                 | 320,4                            | 0,94                                 | 320,4                             |                                      |                                   | 4,9                                  | 149,6                             |
| АВ        | 1946 - 1960 | 1,15                                 | 1050,2                            | 1,68                                 | 591,3                             | 1,1                                 | 440,7                            | 0,94                                 | 440,7                             |                                      |                                   | 4,9                                  | 216,6                             |
| MF        | 1946 - 1960 | 1,48                                 | 586,1                             | 1,25                                 | 192,6                             | 1,1                                 | 320,4                            | 0,94                                 | 320,4                             |                                      |                                   | 4,9                                  | 149,6                             |
| АВ        | 1961 - 1970 | 1,10                                 | 2239                              | 0,91                                 | 1033                              | 1,1                                 | 358,2                            | 1,3                                  | 299,2                             | 0,94                                 | 59                                | 4,9                                  | 320,7                             |
| MF        | 1961 - 1970 | 1,15                                 | 944,6                             | 1,15                                 | 252,2                             | 1,1                                 | 186,7                            | 0,94                                 | 186,7                             |                                      |                                   | 4,9                                  | 97,2                              |
| АВ        | 1961 - 1970 | 1,10                                 | 2239                              | 0,91                                 | 1033                              | 1,1                                 | 358,2                            | 1,3                                  | 299,2                             | 0,94                                 | 59                                | 4,9                                  | 320,7                             |
| MF        | 1961 - 1970 | 1,15                                 | 944,6                             | 1,15                                 | 252,2                             | 1,1                                 | 186,7                            | 0,94                                 | 186,7                             |                                      |                                   | 4,9                                  | 97,2                              |
| АВ        | 1961 - 1970 | 1,10                                 | 2239                              | 0,91                                 | 1033                              | 1,1                                 | 358,2                            | 1,3                                  | 299,2                             | 0,94                                 | 59                                | 4,9                                  | 320,7                             |
| АВ        | 1961 - 1970 | 1,10                                 | 2239                              | 0,91                                 | 1033                              | 1,1                                 | 358,2                            | 1,3                                  | 299,2                             | 0,94                                 | 59                                | 4,9                                  | 320,7                             |
| АВ        | 1961 - 1970 | 1,10                                 | 2239                              | 0,91                                 | 1033                              | 1,1                                 | 358,2                            | 1,3                                  | 299,2                             | 0,94                                 | 59                                | 4,9                                  | 320,7                             |
| MF        | 1961 - 1970 | 1,15                                 | 944,6                             | 1,15                                 | 252,2                             | 1,1                                 | 186,7                            | 0,94                                 | 186,7                             |                                      |                                   | 4,9                                  | 97,2                              |
| MF        | 1961 - 1970 | 1,15                                 | 944,6                             | 1,15                                 | 252,2                             | 1,1                                 | 186,7                            | 0,94                                 | 186,7                             |                                      |                                   | 4,9                                  | 97,2                              |
| MF        | 1961 - 1970 | 1,15                                 | 944,6                             | 1,15                                 | 252,2                             | 1,1                                 | 186,7                            | 0,94                                 | 186,7                             |                                      |                                   | 4,9                                  | 97,2                              |
| AB        | 1961 - 1970 | 1,10                                 | 2239                              | 0,91                                 | 1033                              | 1,1                                 | 358,2                            | 1,3                                  | 299,2                             | 0,94                                 | 59                                | 4,9                                  | 320,7                             |
| AB        | 1961 - 1970 | 1,10                                 | 2239                              | 0,91                                 | 1033                              | 1,1                                 | 358,2                            | 1,3                                  | 299,2                             | 0,94                                 | 59                                | 4,9                                  | 320,7                             |
| MF        | 1961 - 1970 | 1,15                                 | 944,6                             | 1,15                                 | 252,2                             | 1,1                                 | 186,7                            | 0,94                                 | 186,7                             |                                      |                                   | 4,9                                  | 97,2                              |
| MF        | 1961 - 1970 | 1,15                                 | 944,6                             | 1,15                                 | 252,2                             | 1,1                                 | 186,7                            | 0,94                                 | 186,7                             |                                      |                                   | 4,9                                  | 97,2                              |
| АВ        | 1961 - 1970 | 1,10                                 | 2239                              | 0,91                                 | 1033                              | 1,1                                 | 358,2                            | 1,3                                  | 299,2                             | 0,94                                 | 59                                | 4,9                                  | 320,7                             |
| АВ        | 1961 - 1970 | 1,10                                 | 2239                              | 0,91                                 | 1033                              | 1,1                                 | 358,2                            | 1,3                                  | 299,2                             | 0,94                                 | 59                                | 4,9                                  | 320,7                             |
|           |             |                                      |                                   |                                      |                                   |                                     |                                  |                                      |                                   |                                      |                                   |                                      |                                   |

# Appendice 2



# **System Simulation Report**



File: Torino 2080 con multiyear.homer

**Author:** 

Location: Corso Monte Cucco, 44, 10139 Torino TO, Italy (45°4.3'N, 7°38.0'E)

**Total Net Present Cost:** €13,989,590.00

Levelized Cost of Energy (€/kWh): €0.218

Notes:

Sensitivity variable values for this simulation

| Variable            | Value | Unit  |
|---------------------|-------|-------|
| NominalDiscountRate | 2.00  | %     |
| TeslaPW2 time       | 10.0  | years |



# **Table of Contents**

| System Architecture         | 3          |
|-----------------------------|------------|
| Cost Summary                | 4          |
| Cash Flow                   | 5          |
| Electrical Summary          | $\epsilon$ |
| PV: Sunpower Mono 390W      | 7          |
| Converter: System Converter | ç          |
| Grid: Grid                  | 11         |

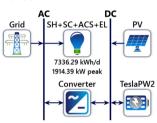
Page 2 of 15 System Simulation Report Generated 7/10/2019 7:05:02 PM



# **System Architecture**

| Component         | Name                 | Size    | Unit |  |
|-------------------|----------------------|---------|------|--|
| PV                | Sunpower Mono 390W   | 574     | kW   |  |
| System converter  | System Converter     | 574     | kW   |  |
| Grid              | Grid                 | 999,999 | kW   |  |
| Dispatch strategy | HOMER Cycle Charging |         |      |  |

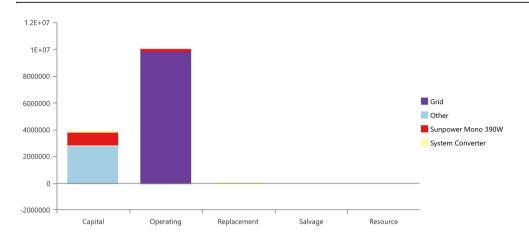
## Schematic



Page 3 of 15 System Simulation Report Generated 7/10/2019 7:05:02 PM



# **Cost Summary**



#### **Net Present Costs**

| Name      | Capital  | Operating | Replacement | Salvage  | Resource | Total    |
|-----------|----------|-----------|-------------|----------|----------|----------|
| Grid      | €0.00    | €9.85M    | €0.00       | €0.00    | €0.00    | €9.85M   |
| Other     | €2.79M   | €18,191   | €0.00       | €0.00    | €0.00    | €2.81M   |
| Sunpower  |          |           |             |          |          |          |
| Mono 390W | €990,150 | €189,852  | €0.00       | €0.00    | €0.00    | €1.18M   |
| System    |          |           |             |          |          |          |
| Converter | €91,840  | €0.00     | €79,223     | -€23,930 | €0.00    | €147,133 |
| System    | €3.87M   | €10.1M    | €79,223     | -€23,930 | €0.00    | €14.0M   |

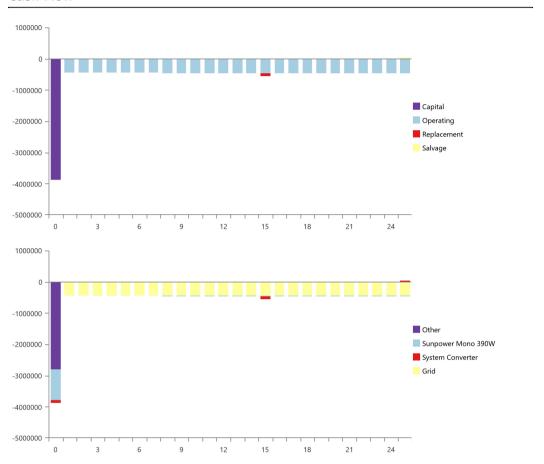
#### **Annualized Costs**

| Name      | Capital  | Operating | Replacement | Salvage | Resource | Total    |
|-----------|----------|-----------|-------------|---------|----------|----------|
| Grid      | €0.00    | €446,835  | €0.00       | €0.00   | €0.00    | €446,835 |
| Other     | €126,598 | €825.00   | €0.00       | €0.00   | €0.00    | €127,423 |
| Sunpower  |          |           |             |         |          |          |
| Mono 390W | €44,904  | €8,610    | €0.00       | €0.00   | €0.00    | €53,514  |
| System    |          |           |             |         |          |          |
| Converter | €4,165   | €0.00     | €3,593      | -€1,085 | €0.00    | €6,673   |
| System    | €175,667 | €456,270  | €3,593      | -€1,085 | €0.00    | €634,445 |

Page 4 of 15 System Simulation Report Generated 7/10/2019 7:05:02 PM



## **Cash Flow**



Page 5 of 15 System Simulation Report Generated 7/10/2019 7:05:02 PM



# **Electrical Summary**

## **Excess and Unmet**

| Quantity            | Value | Units  |
|---------------------|-------|--------|
| Excess Electricity  | 0     | kWh/yr |
| Unmet Electric Load | 0     | kWh/yr |
| Capacity Shortage   | 0     | kWh/vr |

## **Production Summary**

| Component          | Production (kWh/yr) | Percent |  |
|--------------------|---------------------|---------|--|
| Sunpower Mono 390W | 812,917             | 27.4    |  |
| Grid Purchases     | 2,157,135           | 72.6    |  |
| Total              | 2,970,052           | 100     |  |

# **Consumption Summary**

| Component       | Consumption (kWh/yr) | Percent |  |
|-----------------|----------------------|---------|--|
| AC Primary Load | 2,677,745            | 91.4    |  |
| DC Primary Load | 0                    | 0       |  |
| Deferrable Load | 0                    | 0       |  |
| Grid Sales      | 251,662              | 8.59    |  |
| Total           | 2,929,406            | 100     |  |

Page 6 of 15 System Simulation Report Generated 7/10/2019 7:05:02 PM



# PV: Sunpower Mono 390W

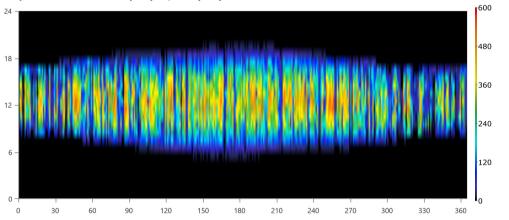
Sunpower Mono 390W Electrical Summary (First Year)

| Quantity           | Value  | Units  |
|--------------------|--------|--------|
| Minimum Output     | 0      | kW     |
| Maximum Output     | 586    | kW     |
| PV Penetration     | 30.4   | %      |
| Hours of Operation | 4,385  | hrs/yr |
| Levelized Cost     | 0.0658 | €/kWh  |

Sunpower Mono 390W Statistics (First Year)

| Quantity         | Value   | Units  |
|------------------|---------|--------|
| Rated Capacity   | 574     | kW     |
| Mean Output      | 92.8    | kW     |
| Mean Output      | 2,227   | kWh/d  |
| Capacity Factor  | 16.2    | %      |
| Total Production | 812,917 | kWh/yr |

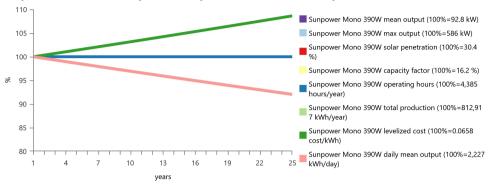
## Sunpower Mono 390W Output (kW, first year)



Page 7 of 15 System Simulation Report Generated 7/10/2019 7:05:02 PM



## Sunpower Mono 390W Multiyear Trends (Percent of First Year Value)



Page 8 of 15 System Simulation Report Generated 7/10/2019 7:05:02 PM



## **Converter: System Converter**

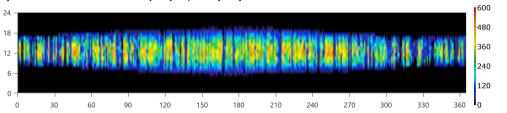
System Converter Electrical Summary (First Year)

| Quantity           | Value   | Units  |
|--------------------|---------|--------|
| Hours of Operation | 4,385   | hrs/yr |
| Energy Out         | 772,271 | kWh/yr |
| Energy In          | 812,917 | kWh/yr |
| Losses             | 40,646  | kWh/yr |

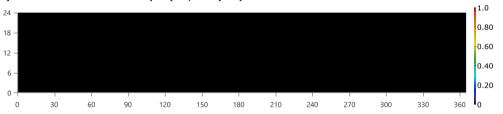
## System Converter Statistics (First Year)

| - / - · · · · · · · · · · · · · · · · · |       |       |  |  |  |
|---|-------|-------|--|--|--|
| Quantity                                | Value | Units |  |  |  |
| Capacity                                | 574   | kW    |  |  |  |
| Mean Output                             | 88.2  | kW    |  |  |  |
| Minimum Output                          | 0     | kW    |  |  |  |
| Maximum Output                          | 557   | kW    |  |  |  |
| Capacity Factor                         | 15.4  | %     |  |  |  |

## System Converter Inverter Output (kW, first year)



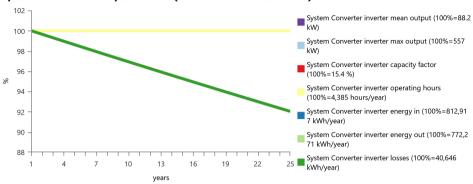
## System Converter Rectifier Output (kW, first year)



Page 9 of 15 System Simulation Report Generated 7/10/2019 7:05:02 PM



## System Converter Multiyear Trends (Percent of First Year Value)



Page 10 of 15 System Simulation Report Generated 7/10/2019 7:05:03 PM

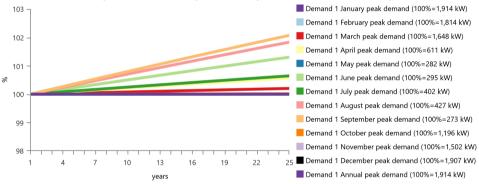


## **Grid: Grid**

#### Grid rate: Demand 1

| Month     | Energy<br>Purchased<br>(kWh) | Energy Sold<br>(kWh) | Net Energy<br>Purchased<br>(kWh) | Peak Demand<br>(kW) | Energy Charge | Demand<br>Charge |
|-----------|------------------------------|----------------------|----------------------------------|---------------------|---------------|------------------|
| January   | 0                            | 0                    | 0                                | 1,914               | €0.00         | €0.00            |
| February  | 0                            | 0                    | 0                                | 1,814               | €0.00         | €0.00            |
| March     | 0                            | 0                    | 0                                | 1,648               | €0.00         | €0.00            |
| April     | 0                            | 0                    | 0                                | 611                 | €0.00         | €0.00            |
| May       | 0                            | 0                    | 0                                | 282                 | €0.00         | €0.00            |
| June      | 0                            | 0                    | 0                                | 295                 | €0.00         | €0.00            |
| July      | 0                            | 0                    | 0                                | 402                 | €0.00         | €0.00            |
| August    | 0                            | 0                    | 0                                | 427                 | €0.00         | €0.00            |
| September | 0                            | 0                    | 0                                | 273                 | €0.00         | €0.00            |
| October   | 0                            | 0                    | 0                                | 1,196               | €0.00         | €0.00            |
| November  | 0                            | 0                    | 0                                | 1,502               | €0.00         | €0.00            |
| December  | 0                            | 0                    | 0                                | 1,907               | €0.00         | €0.00            |
| Annual    | 0                            | 0                    | 0                                | 1,914               | €0.00         | €0.00            |

#### Grid Rate: Demand 1 peak demand Multiyear Trends (Percent of First Year Value)



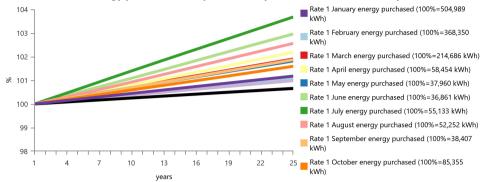
#### Grid rate: Rate 1

|           | Energy    |             | Net Energy |             |               |        |
|-----------|-----------|-------------|------------|-------------|---------------|--------|
|           | Purchased | Energy Sold | Purchased  | Peak Demand |               | Demand |
| Month     | (kWh)     | (kWh)       | (kWh)      | (kW)        | Energy Charge | Charge |
| January   | 504,989   | 0           | 504,989    | 0           | €111,098      | €0.00  |
| February  | 368,350   | 0           | 368,350    | 0           | €81,037       | €0.00  |
| March     | 214,686   | 5,323       | 209,362    | 0           | €46,539       | €0.00  |
| April     | 58,454    | 29,039      | 29,415     | 0           | €9,085        | €0.00  |
| May       | 37,960    | 43,980      | -6,020     | 0           | €2,634        | €0.00  |
| June      | 36,861    | 42,344      | -5,483     | 0           | €2,605        | €0.00  |
| July      | 55,133    | 31,768      | 23,365     | 0           | €7,999        | €0.00  |
| August    | 52,252    | 34,958      | 17,294     | 0           | €6,951        | €0.00  |
| September | 38,407    | 42,464      | -4,057     | 0           | €2,929        | €0.00  |
| October   | 85,355    | 19,968      | 65,387     | 0           | €16,182       | €0.00  |
| November  | 266,791   | 1,817       | 264,973    | 0           | €58,458       | €0.00  |
| December  | 437,899   | 0           | 437,899    | 0           | €96,338       | €0.00  |
| Annual    | 2,157,135 | 251,662     | 1,905,473  | 0           | €441,854      | €0.00  |

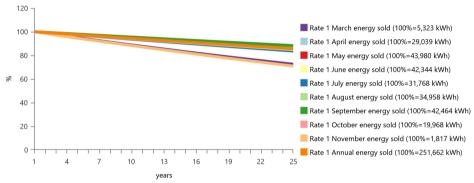
Page 11 of 15 System Simulation Report Generated 7/10/2019 7:05:03 PM



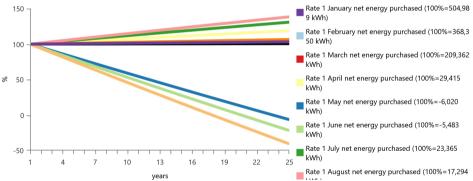
#### Grid Rate: Rate 1 energy purchased Multiyear Trends (Percent of First Year Value)



#### Grid Rate: Rate 1 energy sold Multiyear Trends (Percent of First Year Value)



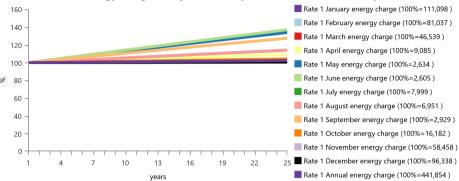
#### Grid Rate: Rate 1 net energy purchased Multiyear Trends (Percent of First Year Value)



Page 12 of 15 System Simulation Report Generated 7/10/2019 7:05:03 PM



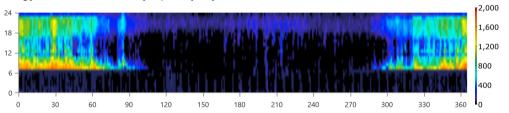
## Grid Rate: Rate 1 energy charge Multiyear Trends (Percent of First Year Value)



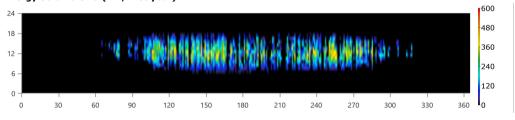
#### Grid rate: All

|           | Energy    |             | Net Energy |             |                      |        |
|-----------|-----------|-------------|------------|-------------|----------------------|--------|
|           | Purchased | Energy Sold | Purchased  | Peak Demand |                      | Demand |
| Month     | (kWh)     | (kWh)       | (kWh)      | (kW)        | <b>Energy Charge</b> | Charge |
| January   | 504,989   | 0           | 504,989    | 1,914       | €111,098             | €0.00  |
| February  | 368,350   | 0           | 368,350    | 1,814       | €81,037              | €0.00  |
| March     | 214,686   | 5,323       | 209,362    | 1,648       | €46,539              | €0.00  |
| April     | 58,454    | 29,039      | 29,415     | 611         | €9,085               | €0.00  |
| May       | 37,960    | 43,980      | -6,020     | 282         | €2,634               | €0.00  |
| June      | 36,861    | 42,344      | -5,483     | 295         | €2,605               | €0.00  |
| July      | 55,133    | 31,768      | 23,365     | 402         | €7,999               | €0.00  |
| August    | 52,252    | 34,958      | 17,294     | 427         | €6,951               | €0.00  |
| September | 38,407    | 42,464      | -4,057     | 273         | €2,929               | €0.00  |
| October   | 85,355    | 19,968      | 65,387     | 1,196       | €16,182              | €0.00  |
| November  | 266,791   | 1,817       | 264,973    | 1,502       | €58,458              | €0.00  |
| December  | 437,899   | 0           | 437,899    | 1,907       | €96,338              | €0.00  |
| Annual    | 2,157,135 | 251,662     | 1,905,473  | 1,914       | €441,854             | €0.00  |

## Energy Purchased From Grid (kW, first year)



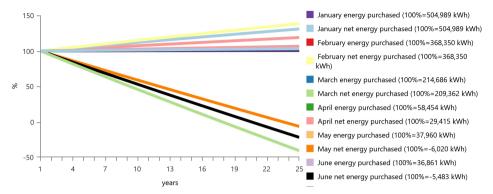
# Energy Sold To Grid (kW, first year)



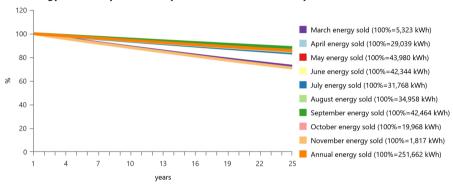
## Grid energy purchased Multiyear Trends (Percent of First Year Value)

Page 13 of 15 System Simulation Report Generated 7/10/2019 7:05:03 PM

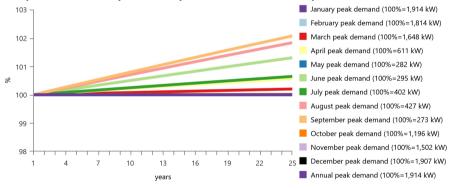




#### Grid energy sold Multiyear Trends (Percent of First Year Value)



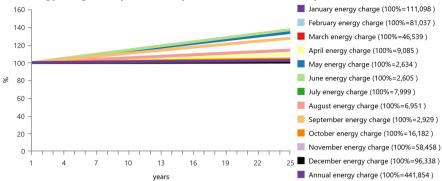
#### Grid peak demand Multiyear Trends (Percent of First Year Value)



Page 14 of 15 System Simulation Report Generated 7/10/2019 7:05:03 PM



## Grid energy charge Multiyear Trends (Percent of First Year Value)



Page 15 of 15 System Simulation Report Generated 7/10/2019 7:05:03 PM

# Bibliografia

- [1] Tabula WebTool, http://webtool.building-typology.eu/#bm
- [2] Tara Trafton, "Urban energy planning and economic—environmental impacts assessment through spatiotemporal modeling of residential energy consumptions"
- [3] ISTAT, "Censimento della popolazione e delle abitazioni 2011", http://dati-censimentopopolazione.istat.it/Index.aspx
- [4] Casaeclima, "Condizionamento estivo. L'importanza di usare il parametro dei gradi giorno", https://www.casaeclima.com/ar\_18958\_\_ITALIA-II-parere-di...-condizionamento-gradi-giorno-Condizionamento-estivo.-Limportanza-di-usare-il-parametro-dei-gradi-giorno-.html
- [5] UNI EN ISO 10077-1
- [6] UNI TS 11300-1
- [7] Web Tool PVGIS, http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\_tools/en/tools.html
- [8] UNI EN ISO 6946:2008
- [9] AERMEC, www.aermec.com
- [10] Sunpower, sunpowercorp.it
- [11] Tesla, www.tesla.com
- [12] HOMER Energy, www.homerenergy.com
- [13] ARERA, "Relazione annuale 2018", www.arera.it
- [14] GSE, www.gse.it
- [15] A2A, www.a2aenergia.eu
- [16] it.inflation.eu
- [17] IREN, "Teleriscaldamento", https://www.irenlucegas.it/business/condomini/teleriscaldamento
- [18] Gazzetta Ufficiale, Legge di Bilancio, https://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2018/12/31/302/so/62/sg/pdf
- [19] Gazzetta Ufficiale, Decreto Crescita, https://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2019/04/30/100/sg/pdf

# Ringraziamenti

Ringrazio il mio relatore e i miei co-relatori, per la professionalità e disponibilità che hanno mostrato durante il percorso di tesi.

Ringrazio i miei genitori, che mi hanno supportato durante tutto il percorso universitario, costantemente ma soprattutto nei momenti negativi, e tutta la mia famiglia.

Ringrazio la mia fidanzata, per essermi stata vicina sempre, specialmente nei momenti più difficili.

Ringrazio i miei amici più cari.

Vi ringrazio con il cuore, perché questo conseguimento è anche merito vostro.