



Ricerca di Sistema elettrico

## DALL'EFFICIENTAMENTO ENERGETICO ALLO SVILUPPO DI UNA SMART GRID PER IL CENTRO RICERCHE SOTACARBO

Ing. Pier Francesco Orrù

*Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali - Università degli Studi di Cagliari  
Consorzio Interuniversitario Nazionale per l'Ingegneria delle Georisorse*



**PIÙ EFFICIENZA:  
obiettivo COMUNE**

**L'EFFICIENTAMENTO  
NELL'EDILIZIA  
PUBBLICA:  
PROGETTI ED  
OPPORTUNITÀ**

*Carbonia, 21 dicembre 2018*



# Sommario

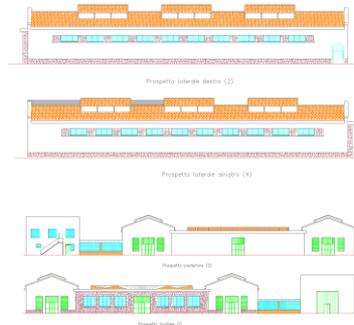
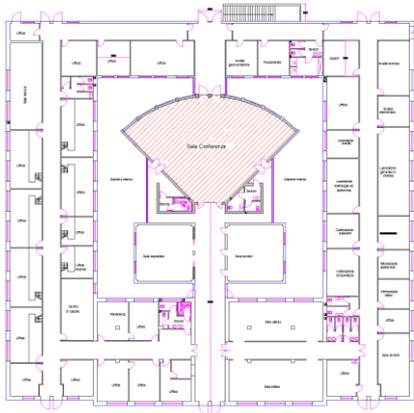
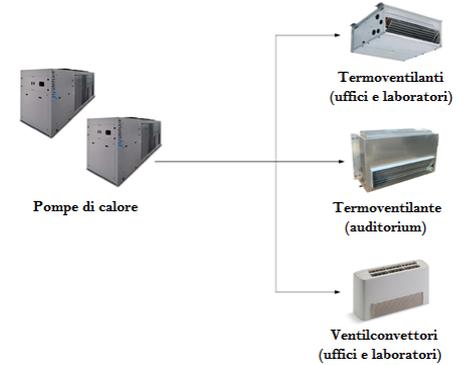
1. Analisi energetica CRS
2. Interventi di efficientamento
3. Analisi economica ed ambientale
4. Risultati
5. Sviluppi futuri



# **1 - DIAGNOSI ENERGETICA**

---

# Involucro edilizio e impianti





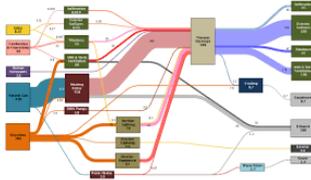
**Bollette  
elettriche**



**Dati  
quart'orari**



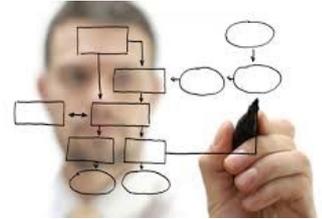
**Rilevazioni  
monitoraggio**



**Modello  
energetico**



**Prestazioni  
energetiche**

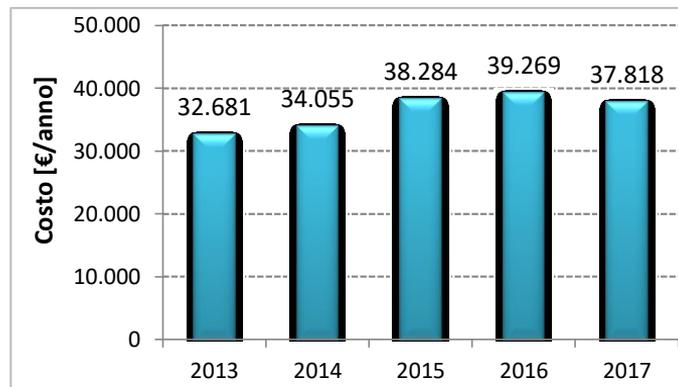
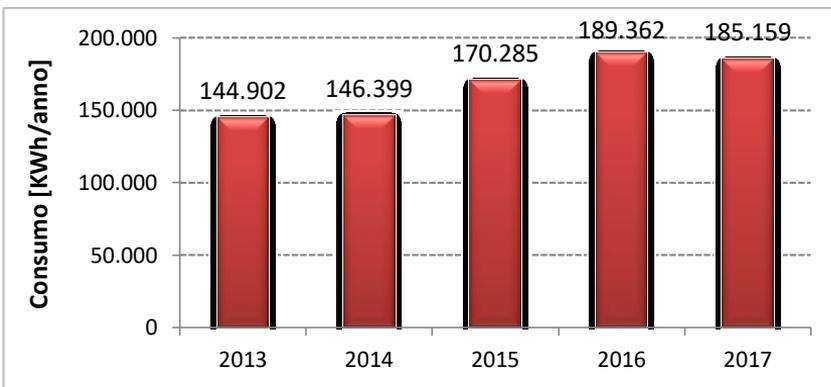


**Confronto con  
benchmark**



**Struttura  
energivora**

# Bollette elettriche

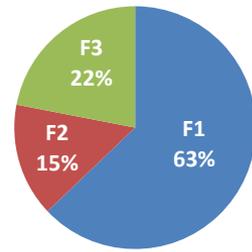
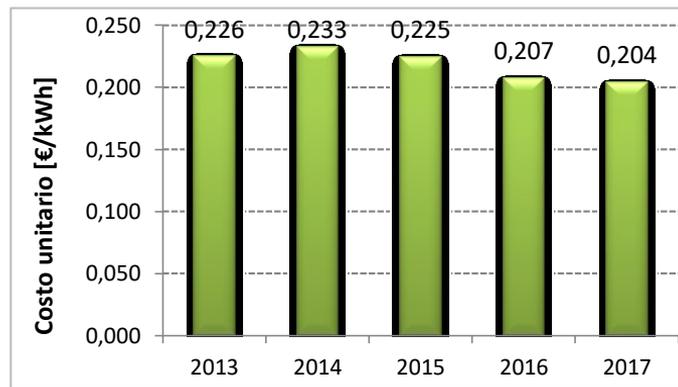
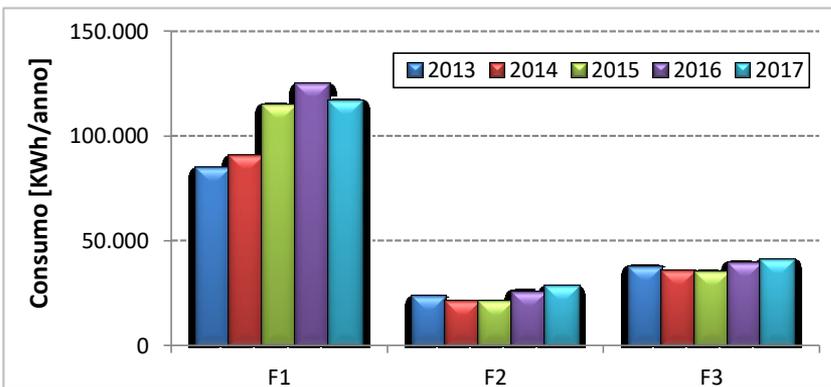


**2017**

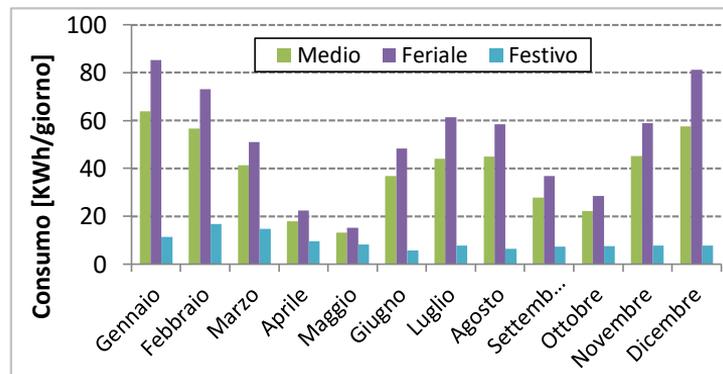
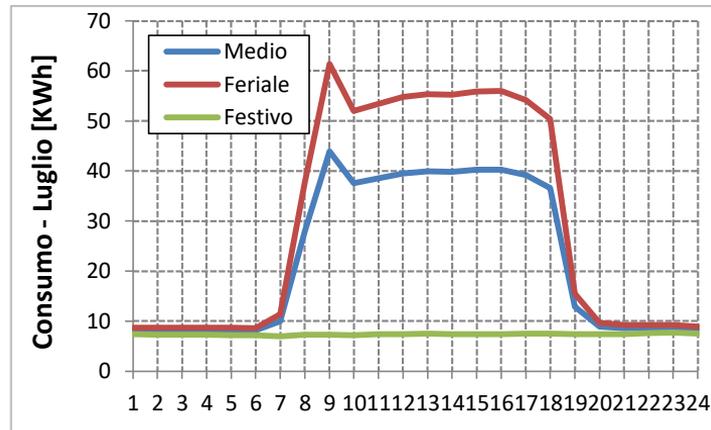
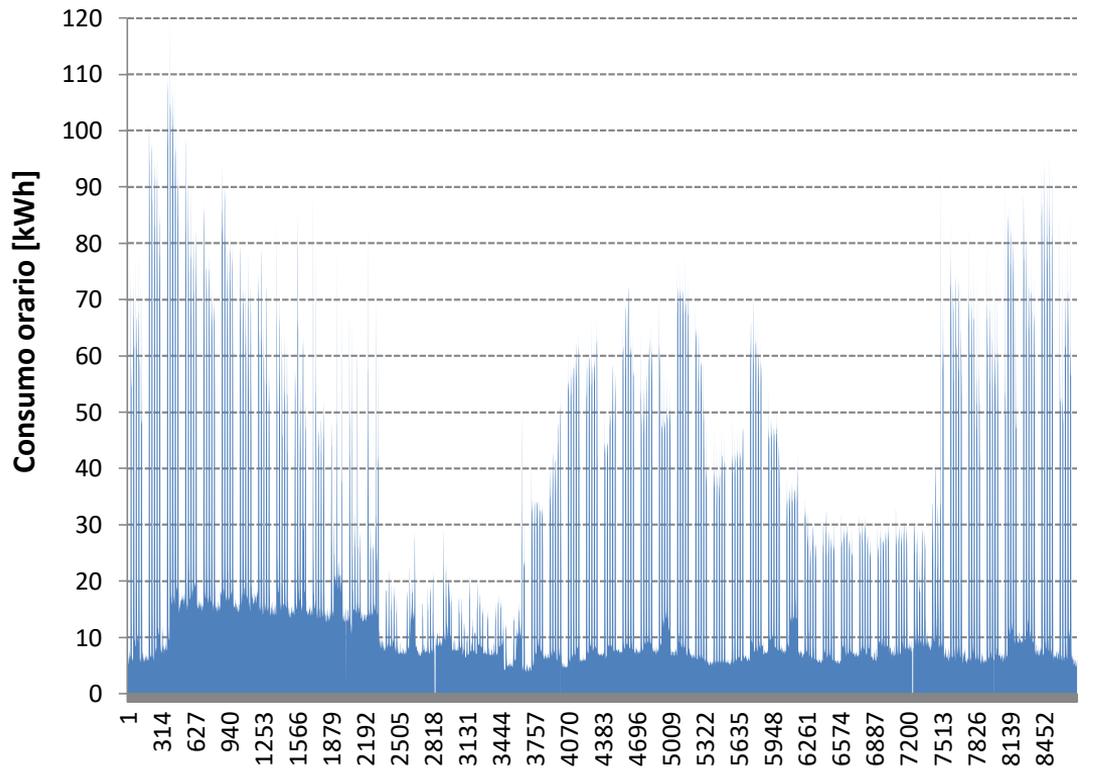
**Consumo**  
185.159 kWh

**Costo**  
€ 37.818

**Costo unitario**  
0,204 €/kWh

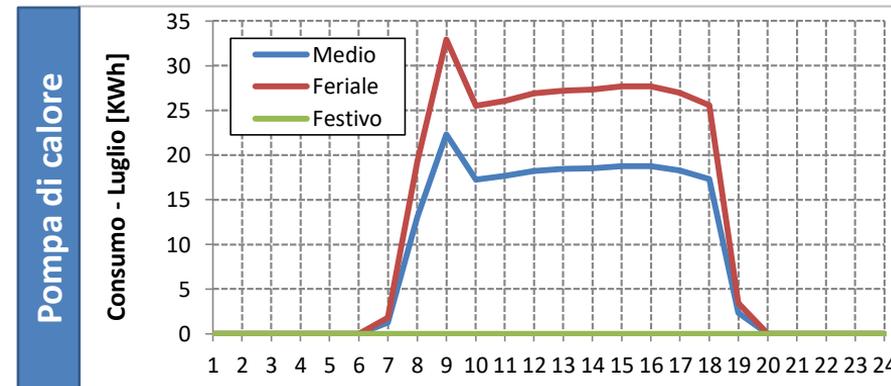
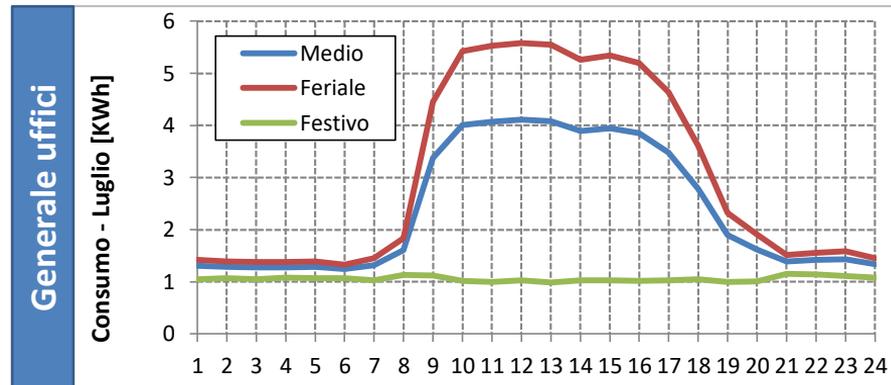
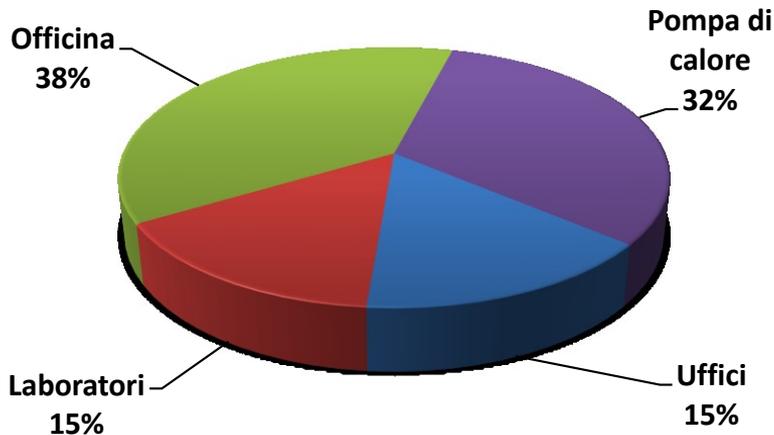
# Dati quart'orari



# Rilevazioni monitoraggio

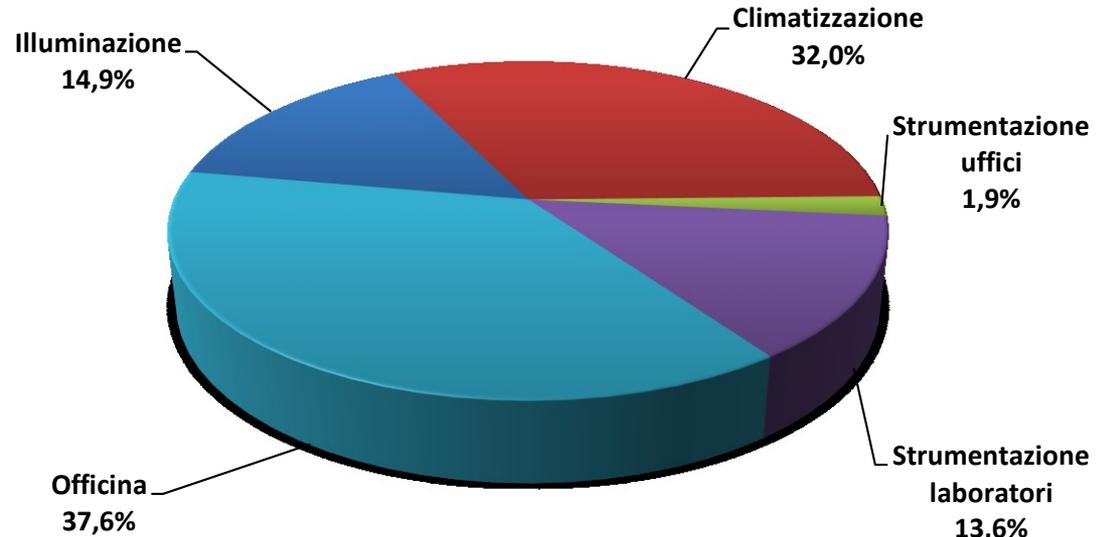


Sezione	Consumo [kWh/anno]
Generale uffici	28.178
Generale laboratori	28.057
Ufficio tipo	3.669
Pompa di calore	59.275

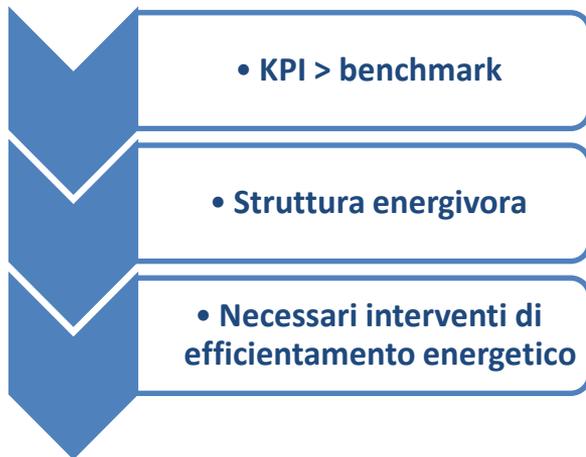


# Modello energetico

Funzione	Consumo [KWh/anno]
illuminazione	27.556
Condizionamento	59.275
Strumentazione laborat.	25.191
Strumentazione uffici	3.488
Officina	69.649
<b>TOTALE</b>	<b>185.159</b>



1. Definizione indicatori di prestazione energetica (KPI)
2. Calcolo KPI
3. Definizione benchmark
4. Confronto KPI-benchmark



## GENERALE

KPI	Valore	Benchmark	U.M.
Consumo di energia elettrica annua per unità di superficie	69,6	27,8	kWh/(m <sup>2</sup> anno)
Consumo di energia elettrica annua per operatore	5.004	740	kWh/(operatore anno)

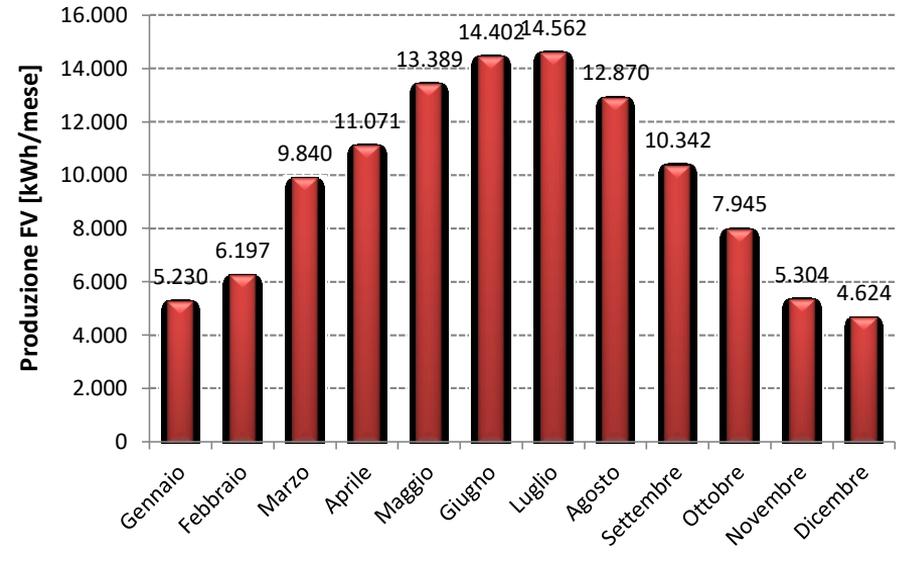
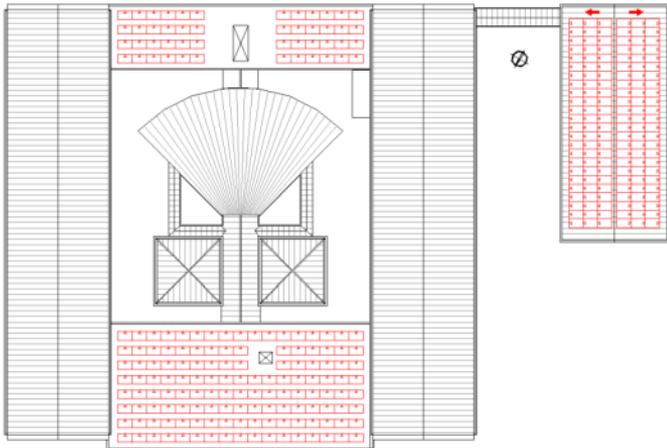
## ZONA UFFICI

KPI	Valore	Benchmark	U.M.
Consumo di energia elettrica annua del condizionamento per unità di superficie	131	15,0	kWh/(m <sup>2</sup> anno)
Consumo di energia elettrica annua dell'illuminazione per unità di superficie	10,0	9,0÷13,0	kWh/(m <sup>2</sup> anno)

## **2 - INTERVENTI DI EFFICIENTAMENTO ENERGETICO**

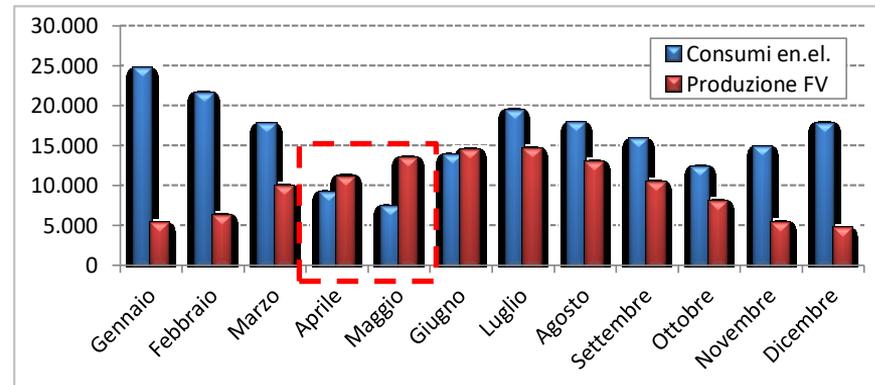
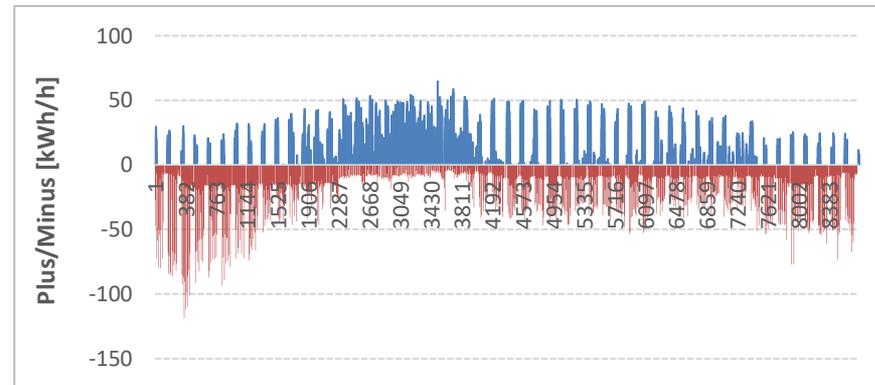
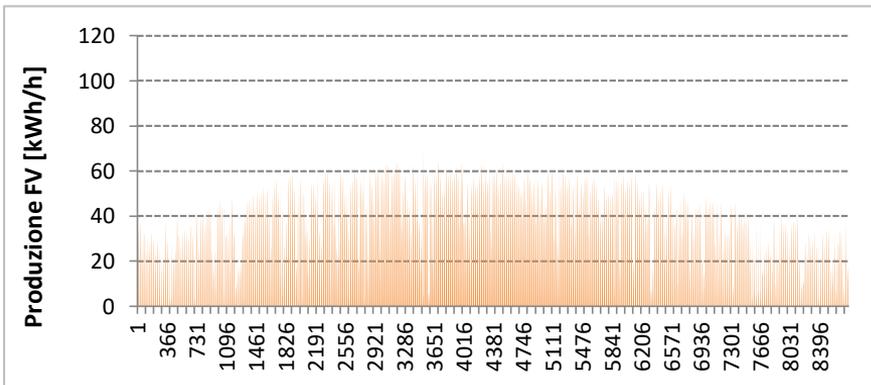
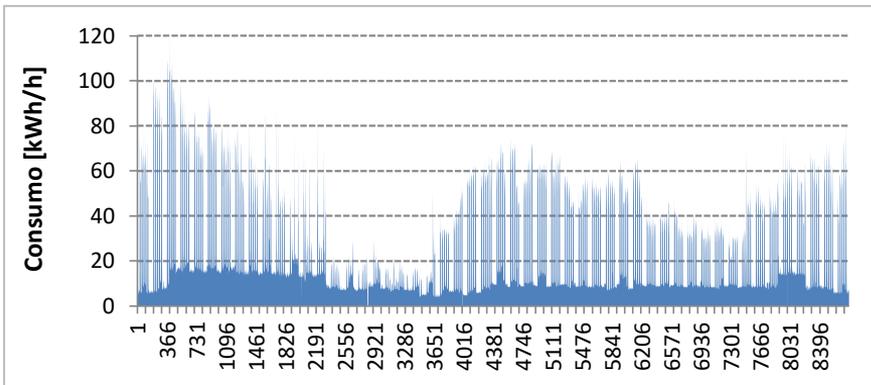
---

# Impianto fotovoltaico

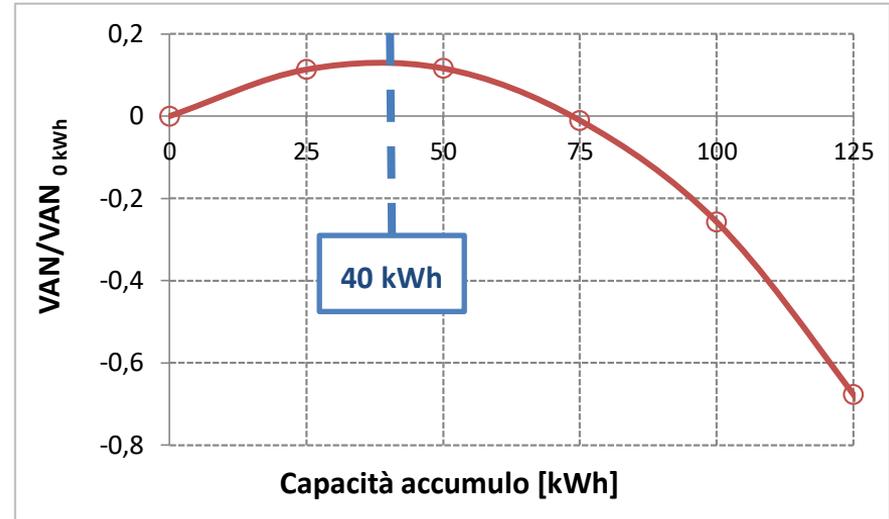


Numero totale moduli	324
Potenza totale	87,48 kW <sub>p</sub>
Superficie captante moduli	518 m <sup>2</sup>
Energia totale prodotta	115.778 kWh/anno

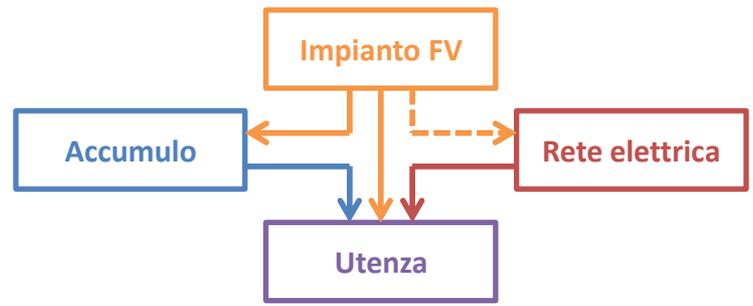
# Accoppiamento consumi - produzione impianto FV



# Accumulo elettrico

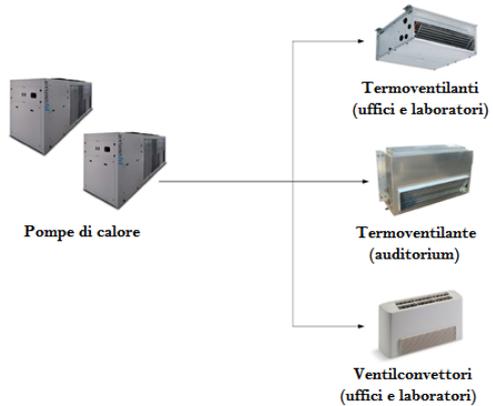


Grandezza	Senza accumulo	Con accumulo (40 kWh)
Copertura FV	44,9%	50,9%
Imnessa in rete	34,6%	27,2%
Autoconsumo	65,4%	72,8%



# Sonde geotermiche a bassa entalpia

## Pompa di calore aria-acqua



### n.2 pompe di calore Uniflair mod. ARAH0744A

Funzionamento	Potenza termica [kW]	Potenza elettrica[kW]	EER/COP
Raffrescamento	165	54,0	3,38
Riscaldamento	179	63,4	3,09

## Sonda geotermica e pompa di calore aria-acqua



Acqua pozzo CRS  
(T = 24°C)

EER = 5,77  
COP = 5,50

### n.1 pompa di calore Aermec mod. WRL 650

Funzionamento	Potenza termica [kW]	Potenza elettrica[kW]	EER/COP
Raffrescamento	169	33,5	5,05
Riscaldamento	187	40,2	4,65

# Dimensionamento sonda ad acqua di falda



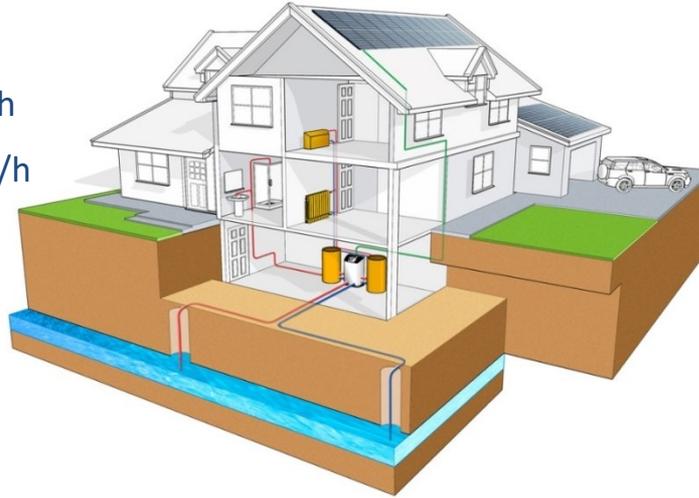
## Pompa sommersa

### Portata utile

- In riscaldamento: 24.540 l/h
- In raffreddamento: 29.130 l/h

### Prevalenza

- Perdite di carico  
(concentrate, distribuite)



## Caratterizzazione pozzo

1. Portata acqua disponibile
2. Temperatura acqua
3. Caratteristiche chimiche acqua
4. Utilizzo acqua emunta

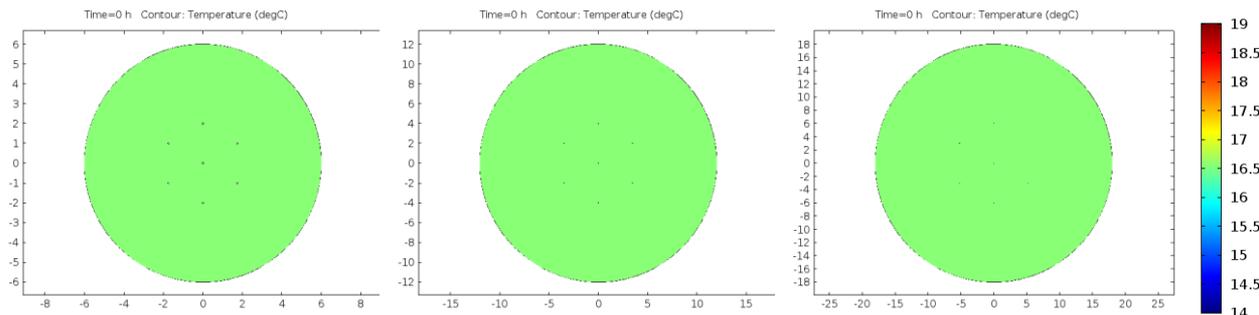
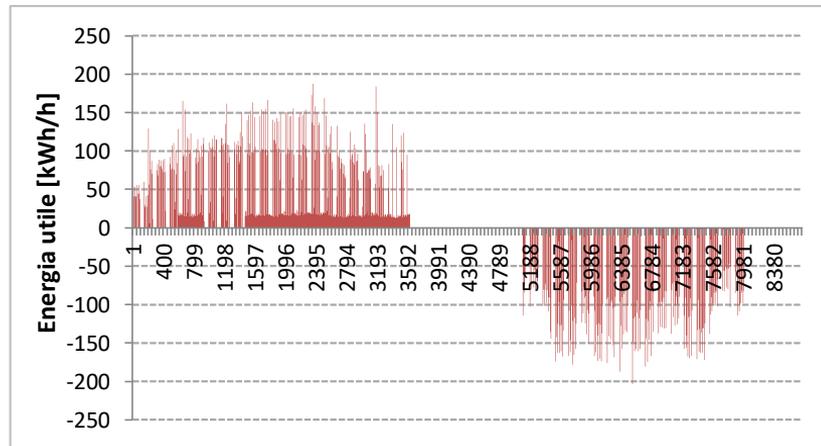
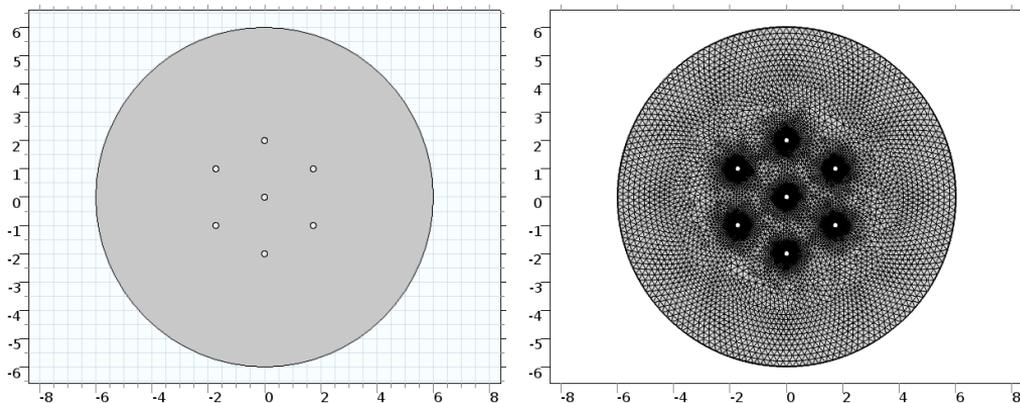
## Scambiatore di calore a piastre

- Separa circuito primario (sonda) e secondario (pompa di calore)
- Resistenza attacco fisico-chimico acqua di falda



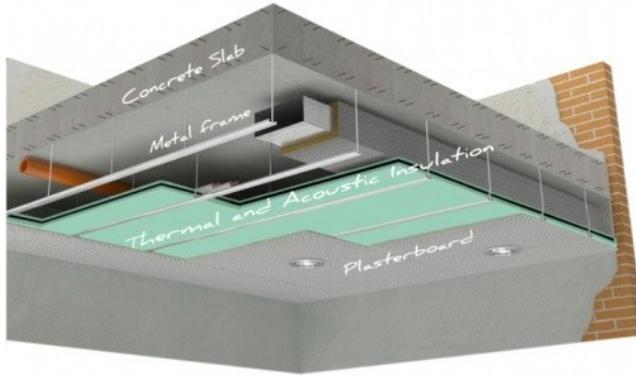
# Dimensionamento sonda geotermica verticale

## Metodo IGSHPA - International Ground Source Heat Pump Association

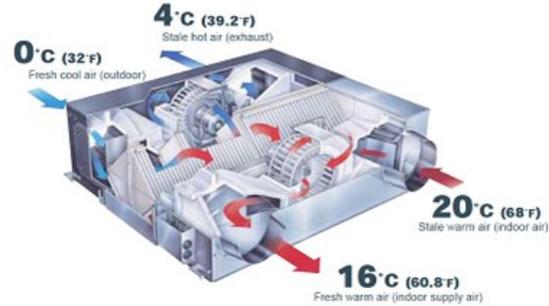


Grandezza	Valore
Tipologia tubazione	Doppio U
Diametro tubo	40 mm
Spessore tubo	3,7 mm
Numero sonde	7
Lunghezza sonda	97 m

## Coibentazione controsoffitto



## Recupero calore aria primaria



## Sostituzione/Modifica infissi esterni



## Cambio fornitore energia elettrica

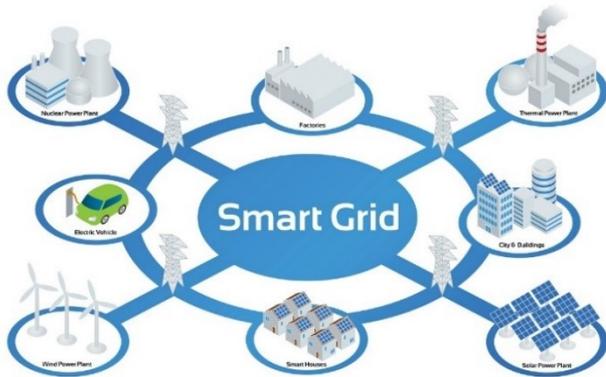


## Sostituzione apparecchi illuminanti



## Componenti

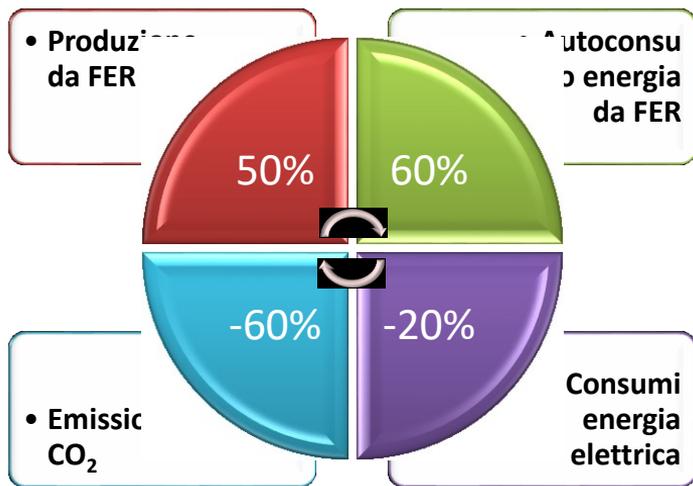
- Impianto fotovoltaico
- Pompa di calore
- Utilities (illuminazione, ACS, etc.)
- Accumulo elettrico
- Rete elettrica



## Logica di gestione

- Privilegiare l'uso dell'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico
- Massimizzare l'uso dell'energia autoprodotta (autoconsumo)
- Minimizzare l'energia prelevata dalla rete
- In caso di sovrapproduzione del fotovoltaico, l'energia deve essere inviata all'accumulo elettrico
- Precedenza all'accumulo delle batterie rispetto alla ricarica dei veicoli
- L'energia sovrapprodotta deve essere immessa in rete solo dopo la saturazione dei sistemi di accumulo (batterie e veicoli)
- In caso di consumi maggiori rispetto alla produzione da FER, deve essere privilegiata l'energia accumulata rispetto a quella proveniente dalla rete
- Gestione delle utilities: funzionamento di determinati componenti nelle ore in cui si prevede di avere sovrapproduzione dell'impianto fotovoltaico

# Sistema di gestione dell'energia



Obiettivo	Percentuale raggiungimento annuo			Totale
	1	2	3	
Produzione da FER	-	50%	-	50%
Autoconsumo energia da FER	-	-	60%	60%
Consumi energia elettrica	-7,5%	-	-12,5%	-20%
Emissioni di CO <sub>2</sub>	-7,5%	-22,5%	-30%	-60%



# Traguardi energetici

Intervento	Produzione FER [kWh/anno]	Autoconsumo FER [kWh/anno]	Risparmio energia [kWh/anno]	Riduzione emissioni CO <sub>2</sub> [kg/anno]
Coibentazione controsoffitto	-	-	-8.056	-4.028
Sostituzione infissi	-	-	-2.503	-1.251
Recupero calore aria primaria	-	-	-6.515	-3.258
Impianto fotovoltaico	115.776	-	-	-57.888
Accumulo elettrico	-	84.297	-	-
Sostituzione lampade	-	-	-11.708	-5.854
Sostituzione pompa di calore e sonda geotermica	-	-	-24.350	-12.175
<b>TOTALE</b>	<b>115.776</b>	<b>84.297</b>	<b>-53.132</b>	<b>-84.454</b>



## MADM Multi Attribute Decision Making



Criterio	Peso
1 - Performance energetica	25
2 - Performance economica	15
3 - Basso costo d'investimento	25
4 - Miglioramento del comfort ambientale	10
5 - Semplicità di realizzazione tecnica	25
<b>TOTALE</b>	<b>100</b>

Intervento	1	2	3	4	5
Sostituzione centri illuminanti	5	5	3	2	5
Coibentazione controsoffitto	3	3	2	5	2
Sostituzione infissi esterni	4	2	3	5	5
Impianto fotovoltaico	4	4	2	1	3
Accumulo elettrico	2	1	3	1	5
Recupero calore aria primaria	2	2	3	5	2
Sostituzione pompa di calore e sonda geot.	4	3	2	1	3

Intervento	Giudizio pesato
Sostituzione centri illuminanti	420
Coibentazione controsoffitto	270
Sostituzione infissi esterni	380
Impianto fotovoltaico	295
Accumulo elettrico	275
Recupero calore aria primaria	255
Sostituzione pompa di calore e sonda geotermica	280

Obiettivo	Traguardi annuali			Totale	Target
	1	2	3		
Produzione da FER	-	62,5%	-	<b>62,5%</b>	<b>50,0%</b>
Autoconsumo energia da FER	-	-	72,8%	<b>72,8%</b>	<b>60,0%</b>
Consumi energia elettrica	-7,7%	-	-21,0%	<b>-28,7%</b>	<b>-20,0%</b>
Emissioni di CO <sub>2</sub>	-7,7%	-62,5%	-21,0%	<b>-91,2%</b>	<b>-60,0%</b>



## **3 - ANALISI ECONOMICA ED AMBIENTALE**

---

## Costi

- Impianto
- Esercizio
- Dismissione



## Indicatori economici

- Valore Attuale Netto (VAN)
- Pay Back Time (PBT)

Intervento	Costo	VAN	PBT
Fotovoltaico	105.000	185.800	6
Accumulo	20.000	2.500	9
Pompa di calore + SAF	35.000	35.700	9
Pompa di calore + SGV	85.000	< 0	-
Coibentazione controsoffitto	79.000	< 0	-
Recupero calore aria primaria	30.000	6.700	12
Apparecchi illuminanti	28.400	34.500	7
Infissi	45.000	21.000	14



## Water Footprint Assessment (WFA)

Green water footprint



It is the volume of rainwater consumed during production. It is most relevant for agricultural and forestry products (crops and wood).

Blue water footprint

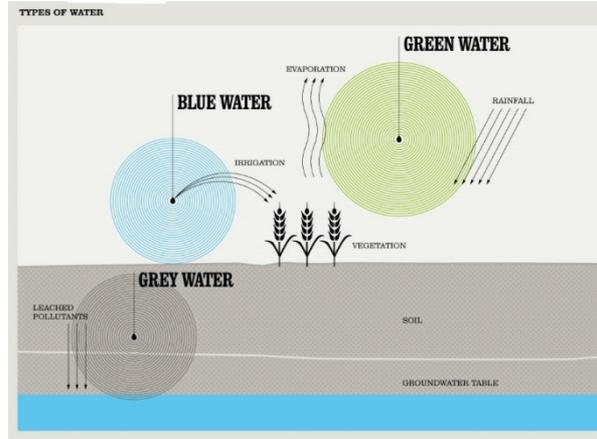


It is the volume of surface and groundwater consumed during production. It shows the amount of groundwater or surface water that is not returned to the catchment.

Grey water footprint

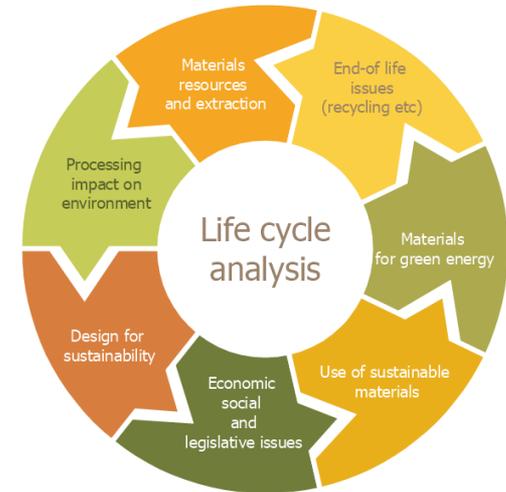


It is the volume of water that is required to dilute pollutants from the production process so that the quality of the water remains above the established water quality standards. It is an indicator of freshwater pollution.



## Life Cycle Analysis (LCA)

- ReCiPe (livello di midpoint, approccio gerarchico H)
- Eco-indicator 99 H
- CML Baseline



Indicatore	Unità di Misura	Scenario attuale	SGAF	SGV
GREY WATER FOOTPRINT	m <sup>3</sup> /kWh	150	102	82
BLUE WATER FOOTPRINT	m <sup>3</sup> /kWh	1,14	0,47	0,57

Categoria di impatto	Unità di Misura	Scenario attuale	Geotermia - acqua di falda	Geotermia - terreno
Cambiamento Climatico	kg CO <sub>2</sub> eq	0,51	0,13	0,15
Consumo di risorse fossili	kg petrolio eq	0,08	0,02	0,02
Ecotossicità delle acque dolci	kg 1,4-DB eq	6,1E-09	5,51E-09	5,46E-09
Eutrofizzazione delle acque dolci	kg P eq	3,6E-09	8,92E-10	1,01E-09
Tossicità per l'uomo	kg 1,4-DB eq	2,6E-04	1,64E-04	1,47E-04
Ecotossicità marina	kg 1,4-DB eq	6,9E-07	6,43E-07	6,16E-07
Eutrofizzazione marina	kg N eq	2,6E-05	7,08E-06	7,64E-06
Formazione di particolato solido	kg PM <sub>10</sub> eq	1,8E-04	5,01E-05	5,36E-05
Formazione di smog fotochimico	kg NMVOC	7,4E-04	1,99E-04	2,14E-04
Acidificazione terrestre	kg SO <sub>2</sub> eq	5,6E-04	1,58E-04	1,68E-04
Ecotossicità terrestre	kg 1,4-DB eq	4,5E-08	4,47E-08	4,13E-08
Esaurimento della risorsa idrica	m <sup>3</sup>	1,1E-03	4,73E-04	5,74E-04

# LCA - Metodo Eco-indicator 99 H



Categoria di impatto	Unità di Misura	Scenario attuale	Geotermia - acqua di falda	Geotermia - terreno
Ecosistemi - totale	PDF*m <sup>2</sup> *anno	4,06E-03	1,10E-03	1,18E-03
Qualità degli Ecosistemi – Acidificazione ed Eutrofizzazione	PDF*m <sup>2</sup> *anno	4,06E-03	1,10E-03	1,18E-03
Qualità degli Ecosistemi - Ecotossicità	PDF*m <sup>2</sup> *anno	1,56E-09	1,04E-09	8,63E-10
Salute Umana - totale	DALY	1,75E-07	4,64E-08	5,19E-08
Salute Umana - Cancerogeni	DALY	2,11E-12	1,40E-12	1,16E-12
Salute Umana – Cambiamento Climatico	DALY	1,06E-07	2,77E-08	3,18E-08
Salute Umana – Effetti respiratori causati da sostanze inorganiche	DALY	6,84E-08	1,87E-08	2,00E-08
Salute Umana - Effetti respiratori causati da sostanze organiche	DALY	6,42E-11	1,64E-11	1,82E-11

# LCA - Metodo CML Baseline



Categoria di impatto	Unità di Misura	Scenario attuale	Geotermia - acqua di falda	Geotermia - terreno
Acidificazione potenziale	kg SO <sub>2</sub> eq.	5,47E-04	1,56E-04	1,65E-04
Cambiamento Climatico - GWP100	kg CO <sub>2</sub> eq.	5,10E-01	1,33E-01	1,52E-01
Riduzione di risorse abiotiche – combustibili fossili	MJ	3,73E+00	8,82E-01	9,83E-01
Eutrofizzazione	kg PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> eq.	9,54E-05	2,64E-05	2,81E-05
Ecotossicità delle acque dolci	kg 1,4-diclorobenzene eq.	6,36E-06	2,91E-06	2,99E-06
Tossicità per l'uomo	kg 1,4-diclorobenzene eq.	3,80E-03	1,19E-03	1,25E-03
Ecotossicità marina	kg 1,4-diclorobenzene eq.	3,87E+01	1,03E+01	1,10E+01
Ossidazione fotochimica	kg etilene eq.	2,30E-05	7,24E-06	7,33E-06
Ecotossicità terrestre	kg 1,4-diclorobenzene eq.	1,84E-05	1,75E-05	1,58E-05

## **4 - RISULTATI**

---

## Analisi energetica



- Consumi principali: officina, climatizzazione, illuminazione, macchine laboratorio
- Posizionamento temporale: orario d'ufficio (dal lunedì al venerdì)
- Consumi specifici: superiori rispetto ai *benchmark* → Struttura energivora

## Analisi tecnica



- Valutazione di diversi interventi di efficientamento energetico
- Raggiungimento degli obiettivi di riduzione dei consumi energetici e delle emissioni di CO<sub>2</sub>, produzione da FER e quota autoconsumo

## Analisi economica



- Convenienza economica di alcuni interventi: impianto fotovoltaico, sostituzione pompa di calore e sonda geotermica ad acqua di falda, sostituzione apparecchi illuminanti, sostituzione/modifica infissi esterni

## Analisi ambientale



- Utilizzo dei metodi Life Cycle Analysis (LCA) e Water Footprint Assessment (WFA)
- L'utilizzo della geotermia, in entrambe le configurazioni analizzate, sono alternative valide a sostituire la soluzione tecnologica attuale, che ha mostrato impatti notevolmente superiori

## **5 - SVILUPPI FUTURI**

---

- Caratterizzazione del pozzo del CRS
- Realizzazione degli interventi di efficientamento energetico
- Monitoraggio e confronto dei risultati dell'impianto sperimentale con quelli del modello analitico
- Accoppiamento di un accumulo termico in associazione a quello elettrico
- Utilizzo del syngas per l'alimentazione di una pompa di calore con motore endotermico
- Realizzazione smart grid con CRS, Museo del Carbone e Museo dei Paleoambienti sulcitani





# GRAZIE PER L'ATTENZIONE



Pier Francesco Orrù  
Phone: (+39) 070 675 5350  
E-mail: [pforru@unica.it](mailto:pforru@unica.it)

