ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E L'AMBIENTE

POLITECNICO DI BARI

ECODESIGN DI UN EDIFICIO: analisi ambientale ed energetica mediante Life-Cycle Assessment (LCA)

Tesi di laurea di:
Gaetano Berlingerio

Tutor ENEA:
Ing. Paolo NERI

Relatore:
Prof. Ing. G.R. Dell'Osso

Obiettivo dello studio

Valutare il danno ambientale dovuto al ciclo di vita di un alloggio e la sua diminuzione a seguito di un processo di ecodesign;

Valutare il vantaggio ottenuto, grazie alla scelta di materiali locali effettuata dai progettisti, rispetto ad una struttura in c.a.

Analisi del Ciclo di Vita
(Life Cycle Assessment – LCA)

Unità funzionale - confini del sistema

Unità funzionale:

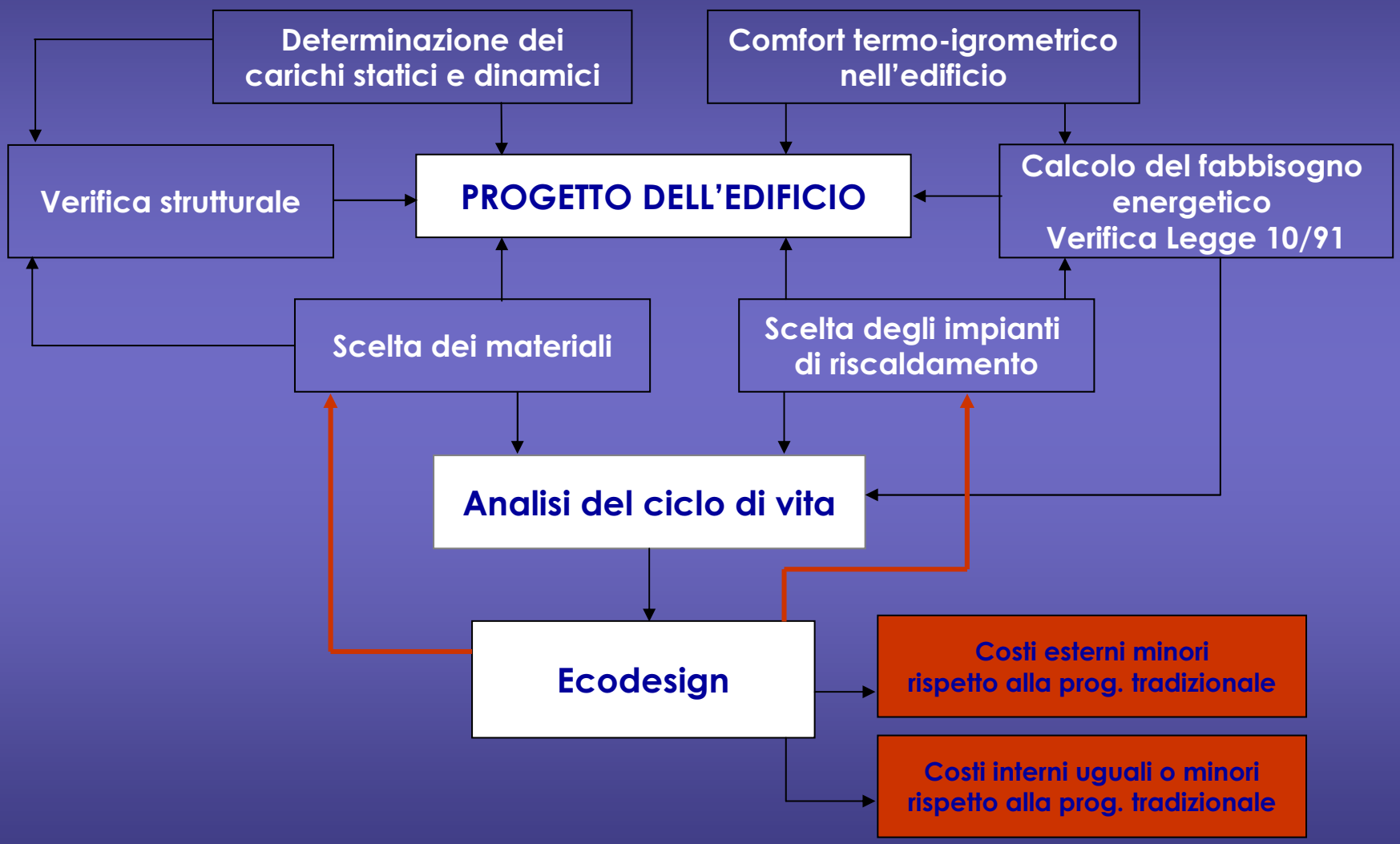
alloggio tipo del primo piano del centro per anziani, con impianto termico autonomo, della superficie utile di 61,53 m^2, durante la sua vita supposta di 80 anni.

Confini del sistema:

- I confini del sistema includono i processi che vanno dalla raccolta delle materie prime al fine vita dei materiali.
- Nell'inventario vengono inclusi tutti i materiali di costruzione dell'alloggio, compresi gli arredi fissi (sanitari), la rubinetteria e gli impianti elettrico, termico e solare termico.
- Vengono inclusi i consumi energetici (gas da riscaldamento ed energia elettrica da rete) ed il consumo di acqua potabile.

- Non vengono incluse nell'inventario le macchine di cantiere
- Non vengono inclusi i consumi di cantiere, ad eccezione di quelli per l'impasto dei cementi e delle malte.

Ecodesign di un edificio



LCA nell'ecodesign

LCA viene utilizzato per:

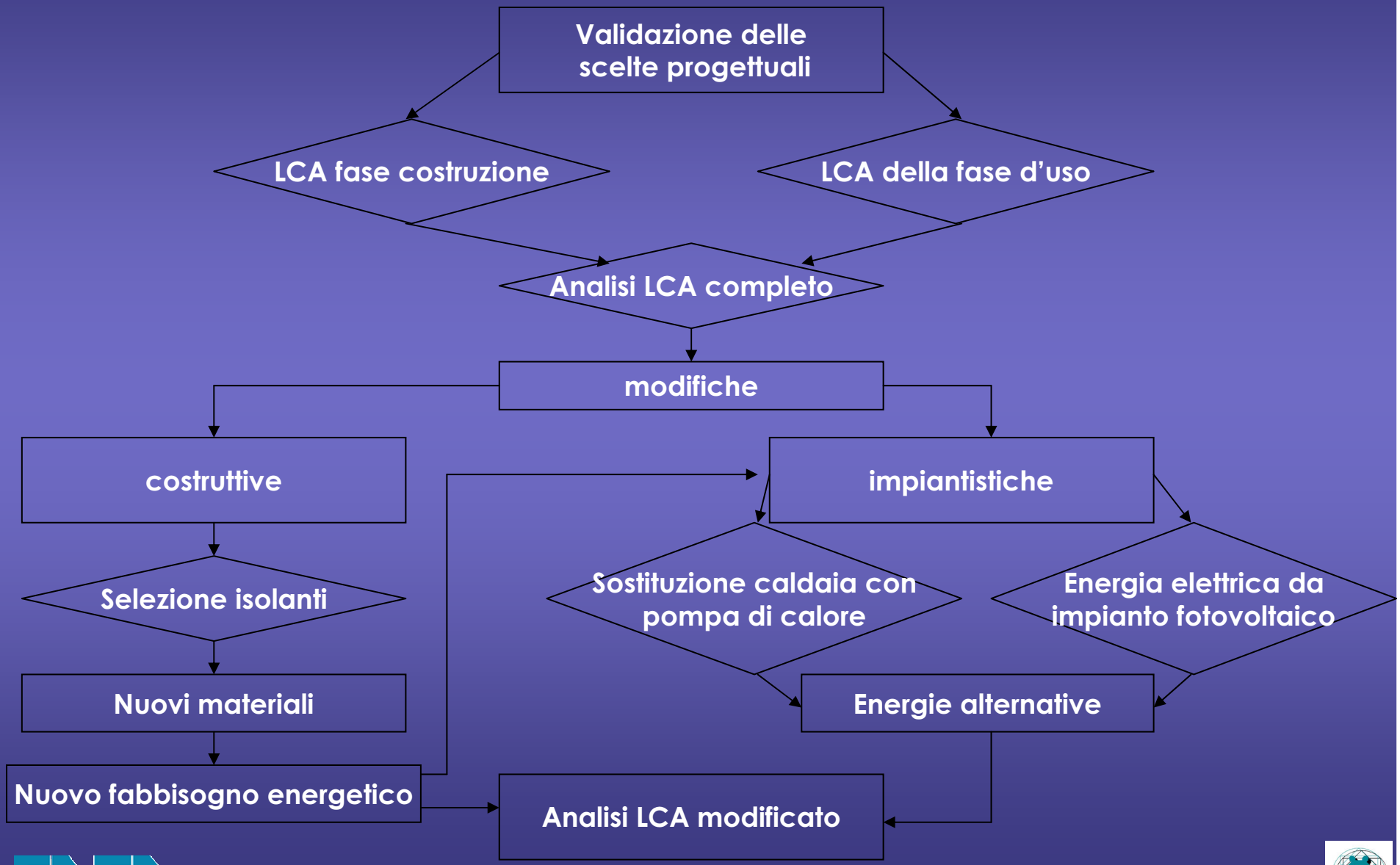
- Validazione delle scelte progettuali (struttura in pietra calcarea locale)

- Analisi completa del ciclo di vita (fase di costruzione e di uso/gestione)
  - Individuazione delle fasi del ciclo di vita più dannose
  - Proposte di varianti migliorative al progetto
    - Modifiche ai materiali (isolamento)
    - Modifiche agli impianti (pompa di calore, impianto fotovoltaico)

- Selezione di alternative progettuali:
  - Confronto tra pannelli di isolante
  - Confronto tra diverse fonti di alimentazione della pompa di calore

- Analisi delle criticità ambientali legate ai sottosistemi dell'organismo
  - L'impatto dei pannelli fotovoltaici – impostazione del fine vita.

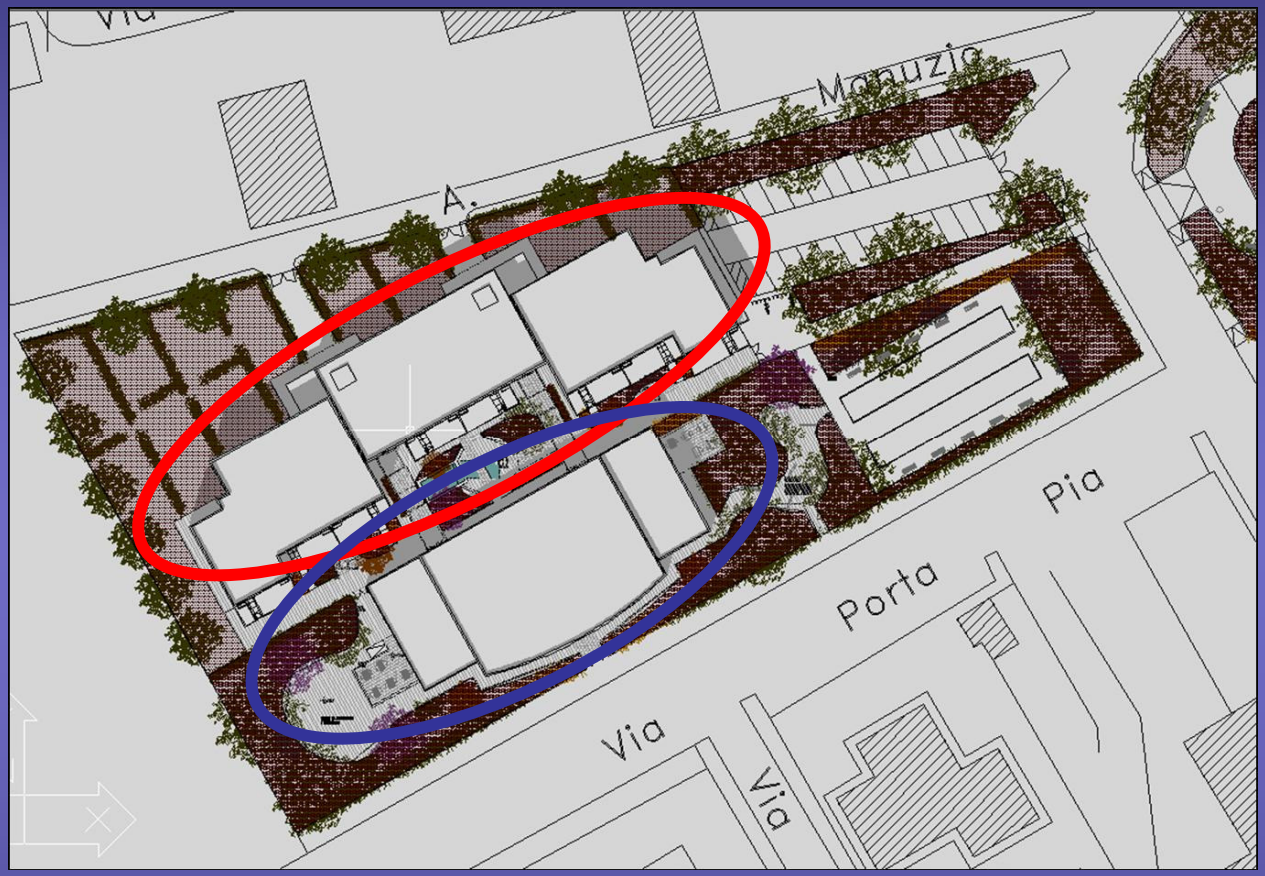
Iter progettuale



L'oggetto dello studio

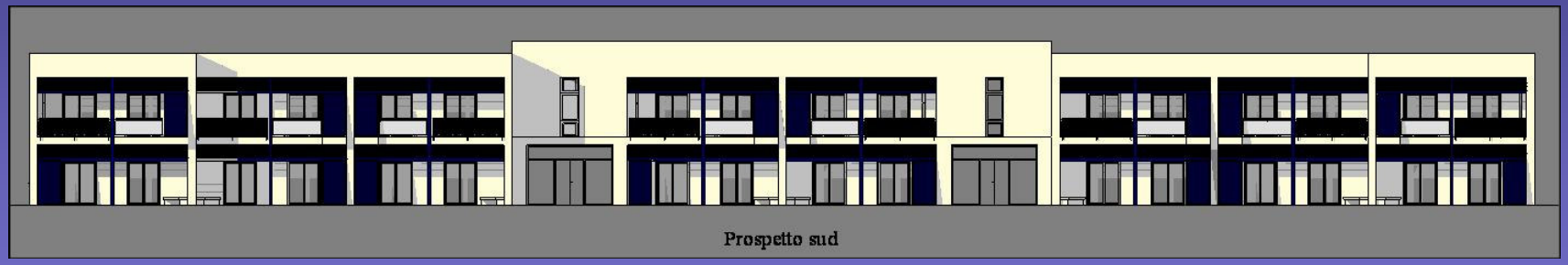
Il centro per anziani nella città di Andria

Centro per anziani - planimetrie

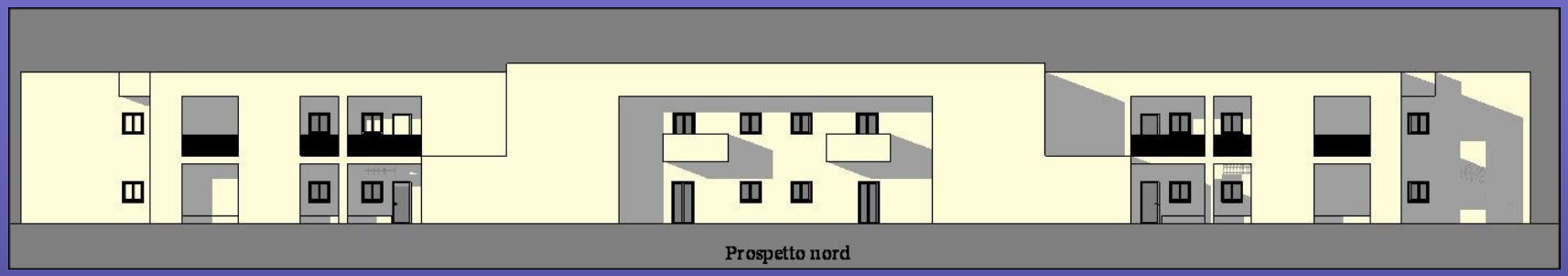


planovolumetria del complesso

Centro per anziani – prospetti

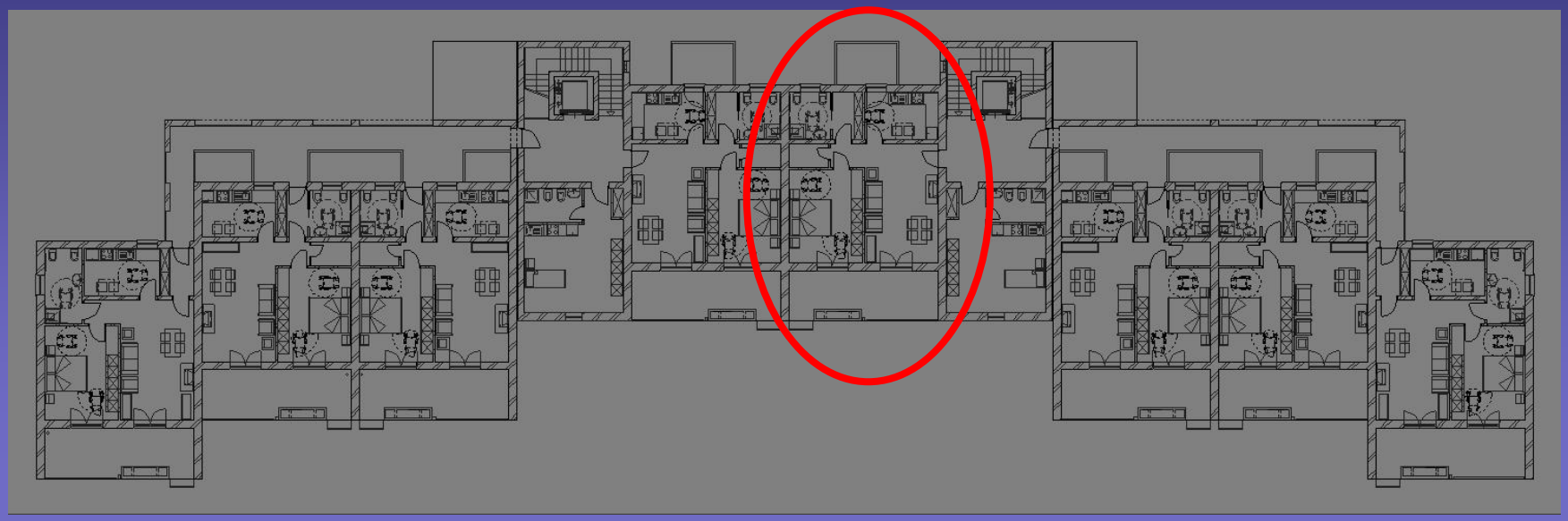


Prospetto Sud



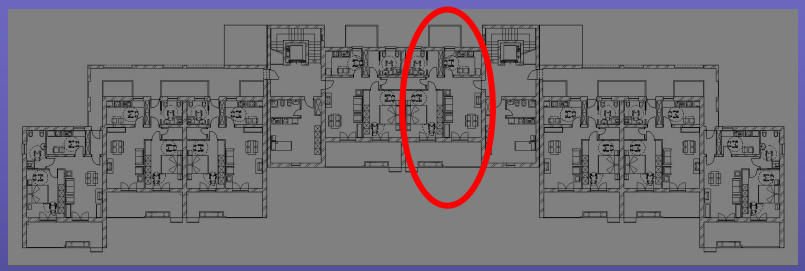
Prospetto Nord

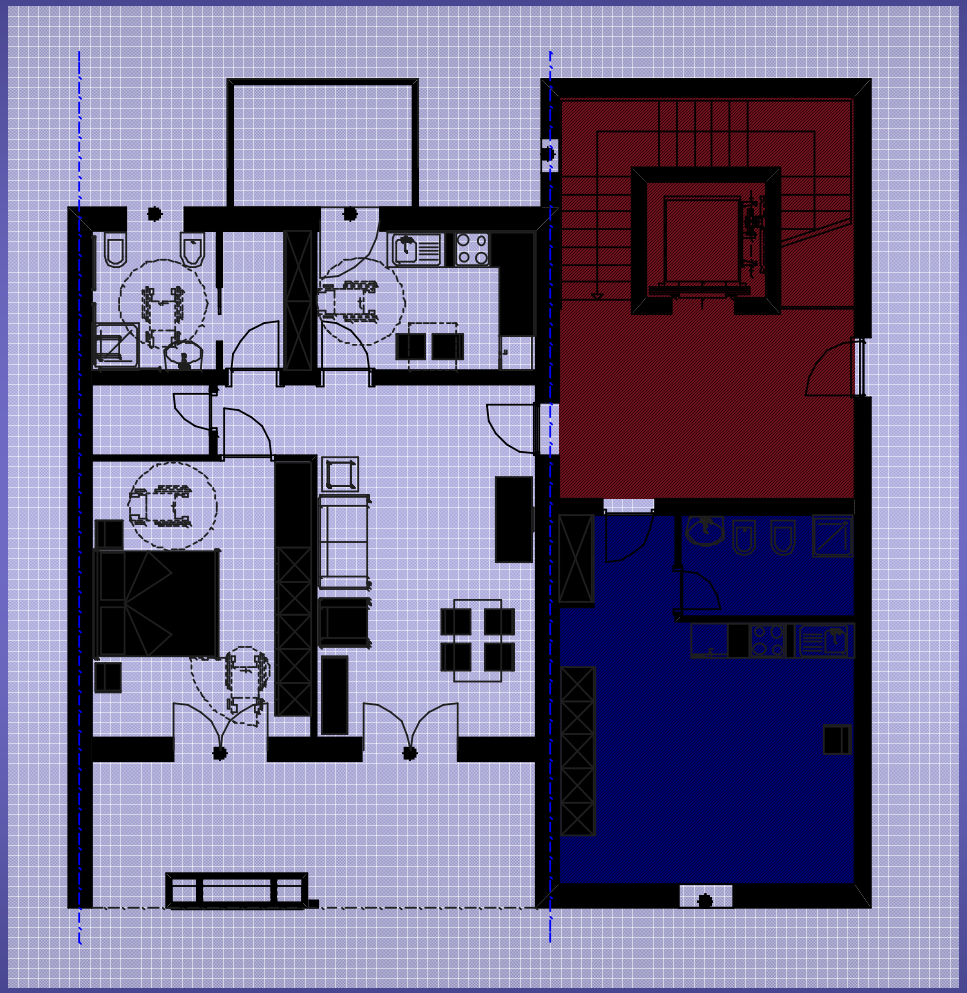
Centro per anziani – pianta residenze



Pianta primo piano - residenze

Centro per anziani – pianta residenze



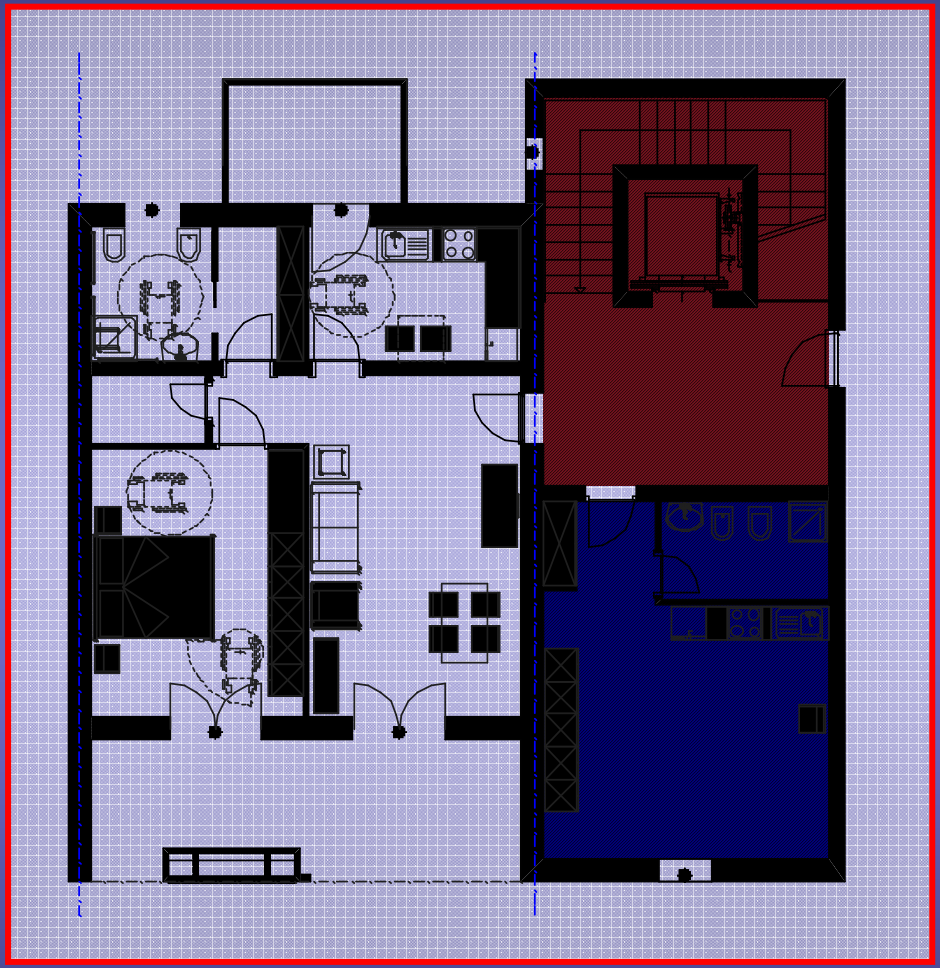


Alloggio termo-autonomo

Inventario

- Fondazioni: calcestruzzo armato (x 0,5)
- Setti portanti entro terra: c.a. (x 0,5)
- Solai: latero-cemento - spessore 30 cm (x 0,5)
- Struttura in elevazione: muratura portante in tufo locale - spessori 30, 40, 50 cm
- Tramezzature: laterizio
- Impianto elettrico
- Impianto idrico
- Impianto a.c.s.: solare
- Impianto termico: gas metano
- Sanitari
- Finitura pareti: intonaco e pittura
- Infissi esterni ed interni: legno

Principali componenti di inventario



Pianta alloggio

LCA di un edificio

Computo metrico dei materiali

Fabbisogno energetico termico ed elettrico, consumo di acqua

Fine vita dei materiali

LCA fase di costruzione

Strutture, chiusure, impianti, finiture

LCA fase d'uso

Manutenzione,energie, risorse

LCA fine vita

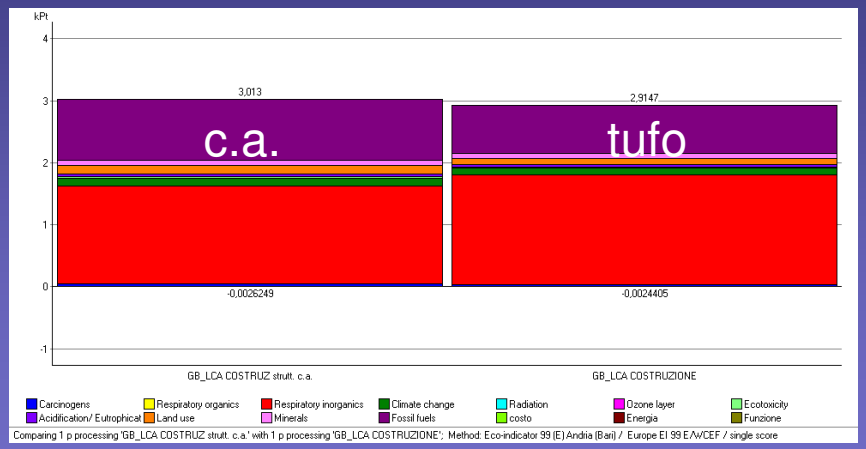
Incluso in ogni processo

LCA completo

Validazione delle scelte progettuali

Confronto con struttura in c.a. e tompagnamenti in laterizio

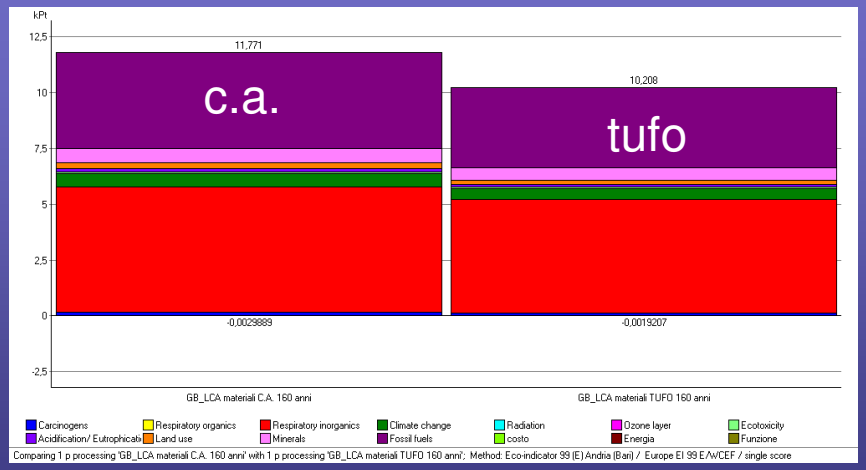
1. **Con vita pari (= 80 anni) il danno è molto simile**



80 anni

2. **Con vita della muratura portante doppia (= 160 anni)**

Considerando che la muratura portante in tufo tende ad una vita più che doppia, il danno relativo alla struttura in c.a. è più elevato. I risultati a fianco sono cautelativi, poiché la vita di una struttura in tufo va oltre il doppio di quella della struttura in c.a.



160 anni

Il processo “blocco di tufo”

Documentation | Input/output | System description

Data

PRODUCTS

Known outputs to technosphere. Products and co-products

Name	Amount	Unit	Quantity	Low value	High value	Allocation %	Waste type	Category	Comment
blocco di tufo 15x25x40cm	1	p	Amount	0	0	100 %	not defined	Building mat	1 blocco di tufo 15x25x40cm=0.015m3 profondità: 25cm 2000kg/m3 2000kg/m3*0.015m3=30kg tempo totale di uso delle due machine da taglio 1.44+0.18=1.62sec

Known outputs to technosphere. Avoided products

Name	Amount	Unit	Low value	High value	Comment

INPUTS

Known inputs from nature (resources)

Name	Amount	Unit	Low value	High value	Comment
water (well, for processing)	0,243	kg	0	[illegible]	0.15l/sec*1.62sec=0.243l

Known inputs from nature (emissions/land)

Name	Amount	Unit	Low value	High value	Comment

Known inputs from technosphere (electricity/heat)

Name	Amount	Unit	Low value	High value	Comment
Electricity LV use in I + imports 20(	1,864E-3	kWh	0	0	macchina tracciatrice: 37.28kW velocità: 0.268m/sec tempo necessario per il percorso di 1 m: 1/0.268=3.6sec/m tempo necessario per il percorso di 15 cm: (3.6sec/m/100)*15=0.54sec in 0.54sec la tracciatrice predispone il taglio di 3 blocchi 0.54/3=0.18sec energia 37.28*0.18sec/3600sec/h=1.864E-3kWh
motore elettrico 22 kW (230kg)	6,139E-9	p	0	0	p/22kW*37.28kW=1.6945p durata 10 anni 1.6945p/[[(10a*230g/a*6h/g*3600sec/h)/0.18sec/blocco]] *1blocco=6.139E-9p
Electricity LV use in I + imports 20(	1,193E-2	kWh	0	0	macchina scalzatrice: motore per taglio da 40CV=29.83kW velocità: 0.268m/sec tempo necessario per il percorso di 1 m: 1/0.268=3.6sec/m tempo necessario per il percorso di 40 cm: (3.6sec/m/100)*40=1.44sec in 0.144sec la scalzatrice predispone il taglio di 1 blocco energia 29.83*1.44sec/3600sec/h=1.193E-2kWh
motore elettrico 22 kW (230kg)	3,930E-8	p	0	0	p/22kW*29.83kW=1.356p durata 10 anni 1.356p/[[(10a*230g/a*6h/g*3600sec/h)/1.44sec/blocco]] *1blocco=3.930E-8p
Electricity LV use in I + imports 20(	5,964E-4	kWh	0	0	macchina scalzatrice: motore per avanzamento da 2CV=1.491kW velocità: 0.268m/sec tempo necessario per il percorso di 1 m: 1/0.268=3.6sec/m tempo necessario per il percorso di 40 cm: (3.6sec/m/100)*40=1.44sec in 0.144sec la scalzatrice predispone il taglio di 1 blocco energia 1.491*1.44sec/3600sec/h=5.964E-4kWh
motore elettrico 22 kW (230kg)	1,965E-9	p	0	0	p/22kW*1.491kW=0.0678p durata 10 anni 0.0678p/[[(10a*230g/a*6h/g*3600sec/h)/1.44sec/blocco]] *1blocco=1.965E-9p

OUTPUTS

Emissions to air

Name	Amount	Unit	Low value	High value	Comment
dust	0,045	kg	0	0	0.15%*30kg=0.045kg

Emissions to water

Name	Amount	Unit	Low value	High value	Comment

Emissions to soil

Name	Amount	Unit	Low value	High value	Comment

Solid emissions

Name	Amount	Unit	Low value	High value	Comment

Non material emissions

Name	Amount	Unit	Low value	High value	Comment
Occupation, mineral extraction site	9,783E-3	m2a	0	0	Area: 300*100=30000m2 vita: 5 anni [30000m2*5a/[(5a*230g/a*6h/g*3600sec/h)/1.62sec/blocco	
Transformation, to mineral extract	1,9565E-3	m2		0	30000/[(5a*230g/a*6h/g*3600sec/h)/1.62sec/blocco]] *1blocco=1.9565E-3m2a

Known outputs to technosphere. Waste and emissions to treatment

Name	Amount	Unit	Low value	High value	Waste treatment	Comment

Acqua di raffreddamento

tracciatrice

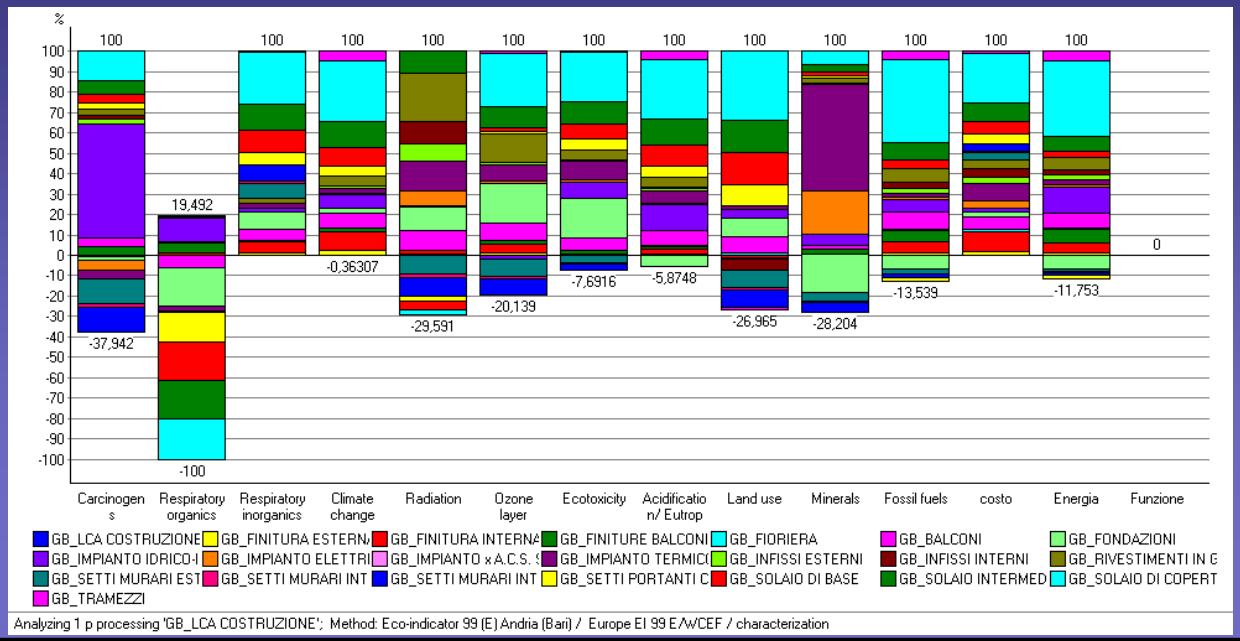
scalzatrice

stoccaggio

polveri

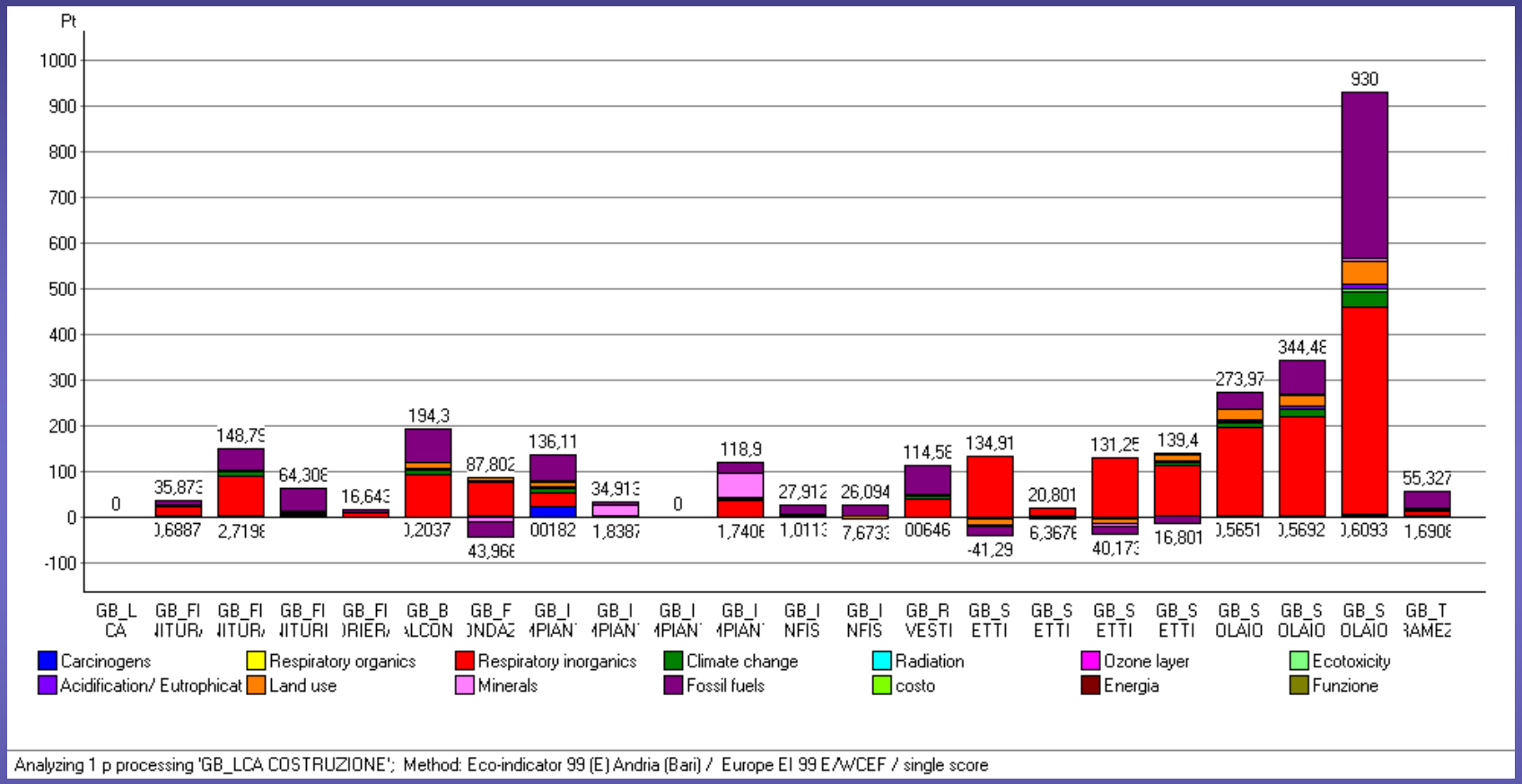
Trasformazione ed occupazione del suolo

LCA fase di costruzione - caratterizzazione



Categorie di danno	Valore danno	Sostanza e % sul tot.	Processo
Human Health	0.08506 DALY	78.25% polveri	Cement (copertura)
Ecosystem Quality	2414 PDFm^{2}yr	36.58% Conv. to ind. area	For.spruce (copertura)
Resources	21224 MJ Spl	34.59% Natural gas ETH	Heat gas (copertura)
Energia	2.7178E5 MJ	30.3% Natural gas ETH	Heat gas (copertura)
Costo	38156 €	24,5% solaio di copertura	(copertura)

LCA fase di costruzione - valutazione



Il **solaio di copertura** è responsabile del maggior danno, ma va considerato che esso è lievemente più esteso rispetto agli altri.

L'impatto più marcato di questo processo è dovuto alla presenza dei polimeri utilizzati per le guaine e di un maggiore spessore di calcestruzzo alleggerito con argilla espansa

Fase d'uso – fabbisogno energetico

Vengono calcolati:

- Fabbisogno termico (legge 10/1991): **RECAL 10**
- Fabbisogno idrico
- Fabbisogno di energia elettrica

Per l'intero arco di vita considerato (80 anni)

Verifiche energetiche (legge n. 10/1991)

La legge 10/91 impone 3 verifiche, al fine del rilascio di concessione edilizia:

- $C_d < C_d$ lim

(*coefficiente volumico di dispersione*) [W/m^{3}K]

- $\eta_g > \eta_g$ min

(*rendimento globale medio stagionale nel periodo di riscaldamento*)

- F.E.N. < F.E.N. lim

(*fabbisogno energetico normalizzato*) [KJ/m^{3}GG]

Sistema edificio-impianto

Metodo di calcolo secondo la legge 10/91

EDIFICIO

Q_L (energia dispersa)

Per ventilazione

- Qv (verso l'esterno)
- Qvu (verso locali non riscaldati)
- Qva (verso locali a temp. fissa)

Per trasmissione

- Qt (verso l'esterno)
- QG (verso il terreno)
- Qtu (verso locali non riscaldati)
- Qta (verso locali a temp. fissa)

Q_L : apporti energetici gratuiti utilizzati (sorgenti interne e guadagno solare) =

Q_h (energia utile necessaria a garantire la temperatura interna di progetto in regime di funzionamento continuo)

IMPIANTO

$$\eta_g = \eta_p \times \eta_d \times \eta_c \times \eta_e$$

- Perdite di produzione
- Perdite di distribuzione
- Perdite di regolazione
- Perdite di emissione

$$\eta_g = Q_{hvs} / Q$$

Q_{hvs} (energia utile necessaria a garantire la temperatura interna di progetto in regime di funzionamento non continuo: intermittenza ed attenuazione)

Legge n. 10/91: energia primaria

<u>Energia primaria</u> complessivamente impiegata durante il periodo di riscaldamento:

Consumo AUSILIARI

Consumo GENERATORE

$$Q = Q_h / \eta_g$$

involucro

generatore

impianto

Zona clim.

$$FEN = \frac{Q}{(t_i - t_{em}) \cdot N \cdot V}$$

[KJ/m³Kd]

$$FEN = \frac{Q}{GG \cdot V}$$

[KJ/m³GG]

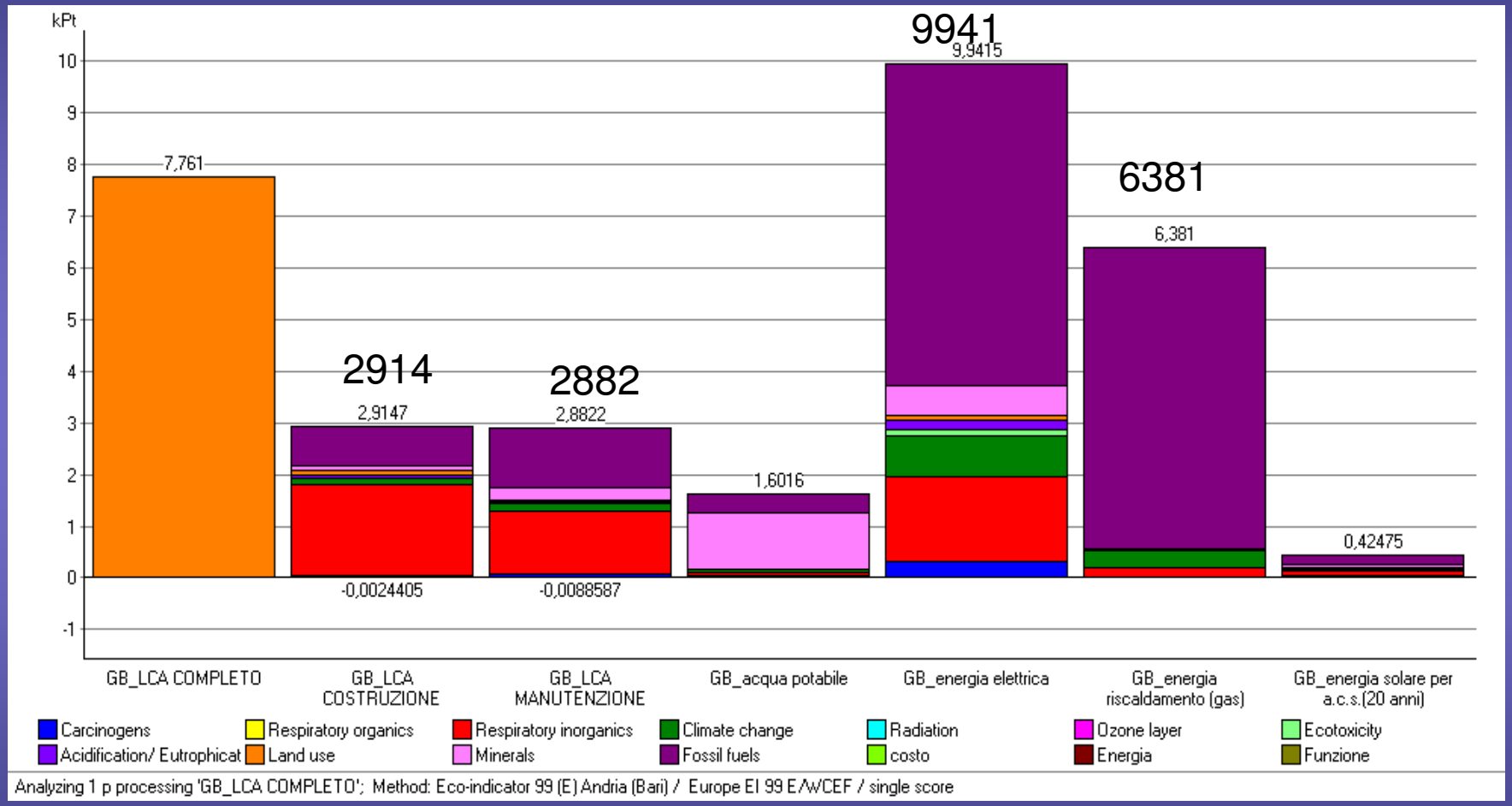
Legge n. 10/91: risultati principali

Grandezza	valore	verifica
Potenza dell'edificio	3654 [W]	
Fabbisogno di energia primaria	14705 [MJ/anno]	
Cd	0,567 [W/m^{3}K]	**positiva**
Cd_{lim}	0,669 [W/m^{3}K]	
F.E.N.	44,61 [kJ/m^{3}Kd]	**positiva**
$F.E.N._{lim}$	78,53 [kJ/m^{3}Kd]	
h_g	0,677 [%]	**positiva**
$h_{g,lim}$	0,676 [%]	

Principali risultati relativi al progetto originario

LCA completo – valutazione con Eco-Indicator

Viene valutata l'incidenza della fase di costruzione sull'intera vita dell'alloggio



I consumi energetici (gas ed elettricità) sono causa del **51%** del danno totale

La fase di costruzione determina il **9,1%** del danno totale

LCA completo – interpretazione e miglioramento

- Le scelte progettuali che determinano la struttura portano ad un valore del danno già basso, grazie all'uso di materiali locali e dalla bassa energia intrinseca.

- Circa la metà del danno totale è dovuta ai consumi energetici

- E' evidente che gli sforzi progettuali devono essere orientati al miglioramento delle qualità ambientali dei processi più impattanti, che in questo caso sono rappresentati dal consumo di gas naturale per riscaldamento e dal consumo di energia elettrica.

Si procede alla proposta di varianti al progetto relative a:

1. Tecnologia costruttiva
2. Dotazioni impiantistiche

Modifiche costruttive – direttiva 2002/91/CE

- **D.Lgs. 19-08-2005**

Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia

Il decreto stabilisce dei valori limite di trasmittanza per le strutture

Il progetto originario era soggetto unicamente alle prescrizioni relative alla legge 10/91, poiché la domanda di concessione edilizia è stata presentata in data precedente al decreto

Tipo di struttura	Trasmittanza limite per Zona climatica C (1377 GG)	Trasmittanza progetto originario
Verticali opache	< 0,57 W/m^2K	1,007 W/m^2K
Orizzontali opache	< 0,55 W/m^2K	0,611 W/m^2K
Verticali trasparenti	< 3,3 W/m^2K	2,97 W/m^2K

Selezione di alternative progettuali con LCA

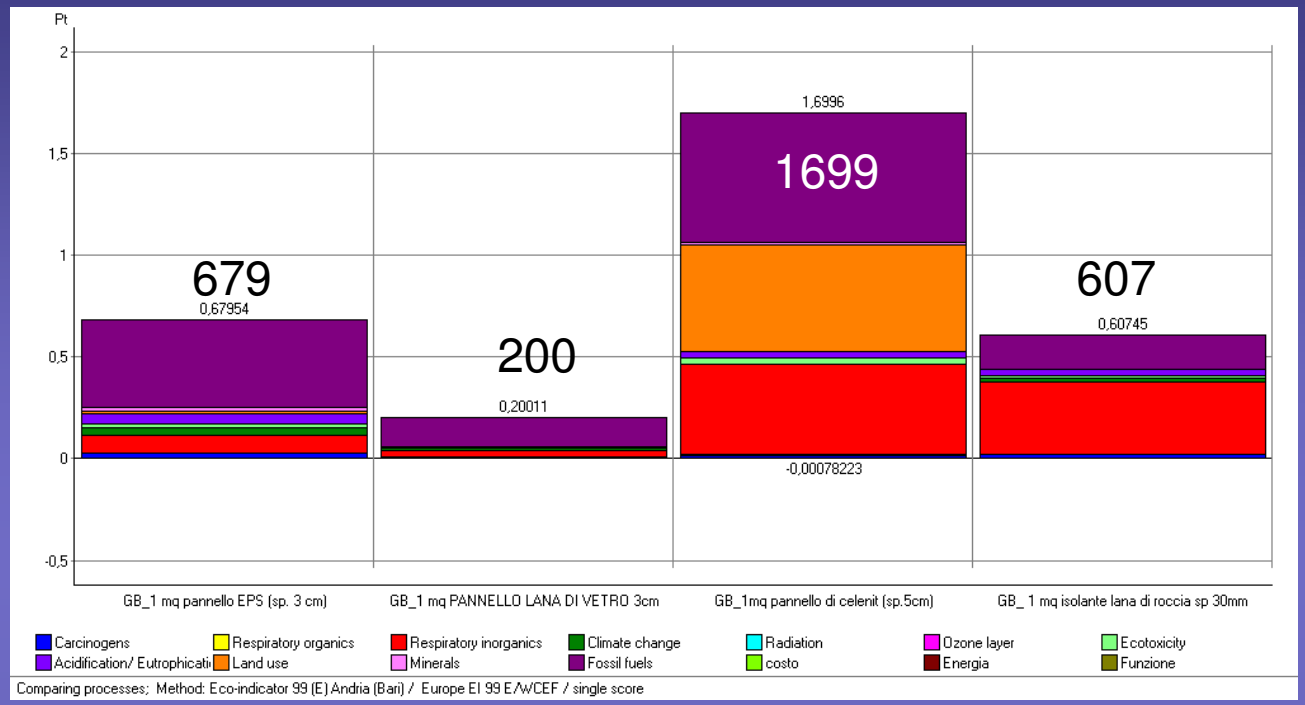
Sono stati esaminati pannelli di isolante di cinque materiali diversi:

- EPS (polistirene)
- Lana di vetro
- Lana di roccia
- Sughero
- Fibre di legno e cemento (Celenit)

Parametro di confronto: prestazione (resistenza termica) ~ 0,75 m^2K/W

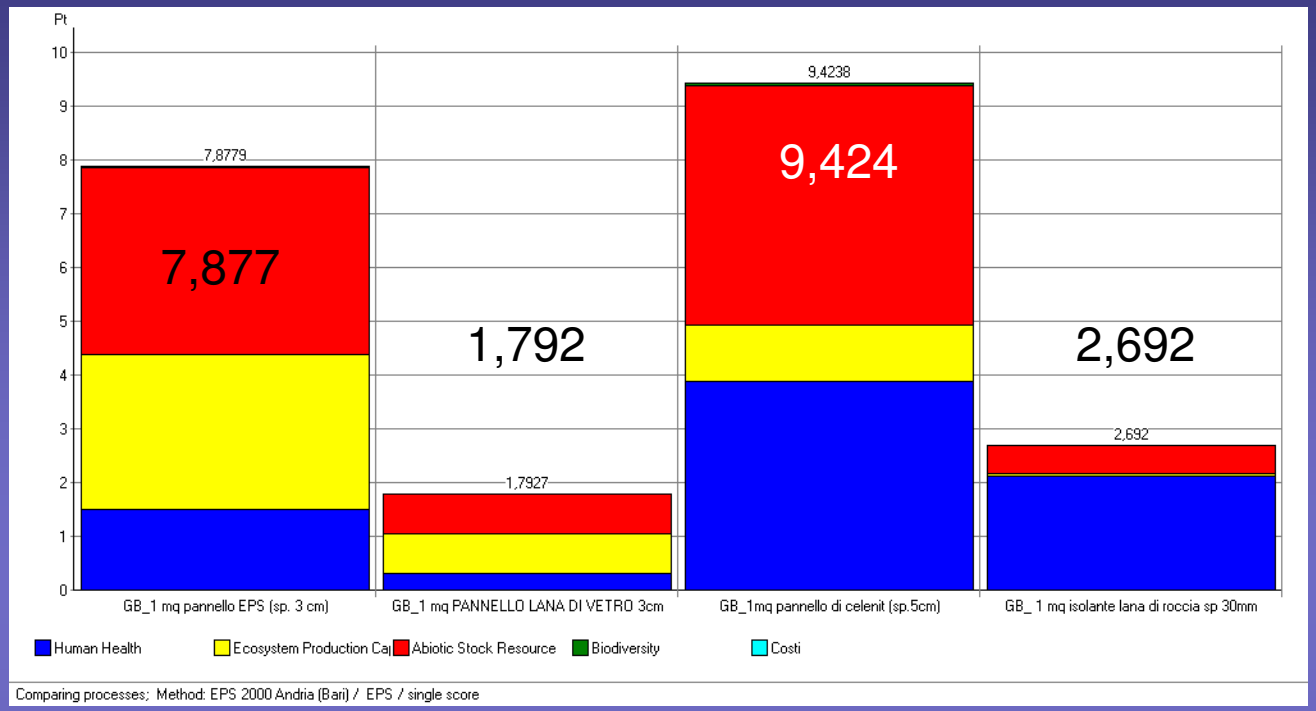
Materiale	Spessore [cm]	Peso [kg/m^2]
EPS	3	1.15
Lana di vetro	~ 3	0.9
Lana di roccia	~ 3	3
Fibre "celenit"	5	18

Confronto tra isolanti – Eco-Indicator '99



Categorie di danno	EPS	Lana di vetro	Celenit	Lana di roccia
Human Health	0.15	0.0487	0.46038	0.3919
Ecosystem Quality	0.079139	0.0054	0.59106	0.047
Resources	0.44893	0.14584	0.64734	0.1676

Confronto tra isolanti – EPS 2000



Categorie di danno	EPS	Lana di vetro	Celenit	Lana di roccia
Human Health	1,5076	0,30429	3,8922	2,1242
Ecosystem Quality	2,8665	0,73901	1,0411	0,047986
Abiotic stock Resource	3,4919	0,74661	4,4576	0,51394
biodiversity	0,01194	0,0028362	0,032909	0,0058828

Verifiche termiche – nuovi risultati

Dati calcolati con RECAL 10

Unità tecnologica	Trasmittanza dopo le modifiche	trasmittanza progetto originario
Chiusura verticale esterna	0,57 [W/m²K]	1,008 [W/m²K]
Chiusura orizzontale di copertura	0,419 [W/m²K]	0,611 [W/m²K]

Grandezza	valore	valore progetto originario
Potenza dell'edificio	3012 [W]	3654 [W]
Fabbisogno di energia primaria	10861 [MJ/anno]	14705 [MJ/anno]
Cd	0,442 [W/m³K]	0,567 [W/m³K]
Cd_{lim}	0,669 [W/m³K]	0,669 [W/m³K]
F.E.N.	33,78 [kJ/m³Kd]	44,61 [kJ/m³Kd]
$F.E.N._{lim}$	78,53 [kJ/m³Kd]	78,53 [kJ/m³Kd]
η_g	0,605 [%]	0,677 [%]
$\eta_{g,lim}$	0,676 [%]	0,676 [%]

Modifiche costruttive - isolamento

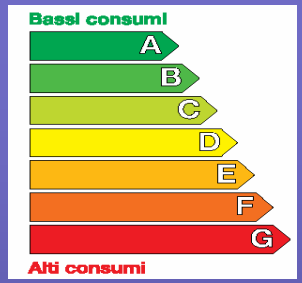
- **D.Lgs. 19-08-2005**

- Non esistono istruzioni tecniche sul calcolo del fabbisogno energetico secondo la direttiva 2002/91/CE per il territorio italiano.
- Viene qui confrontato il fabbisogno dell'alloggio con i parametri della certificazione Klimahaus-Casaclima, adottata dalla Provincia di Bolzano

CATEGORIA DI CONSUMO DI CALORE	INDICE TERMICO DELL'EDIFICIO
A	≤ 30 kWh/m2a
B	≤ 50 kWh/m2a
C	≤ 70 kWh/m2a
D	≤ 90 kWh/m2a
E	≤ 120 kWh/m2a
F	≤ 160 kWh/m2a
G	> 160 kWh/m2a

CLASSE B
47 kWh/m^{2}a

63 kWh/m^{2}a



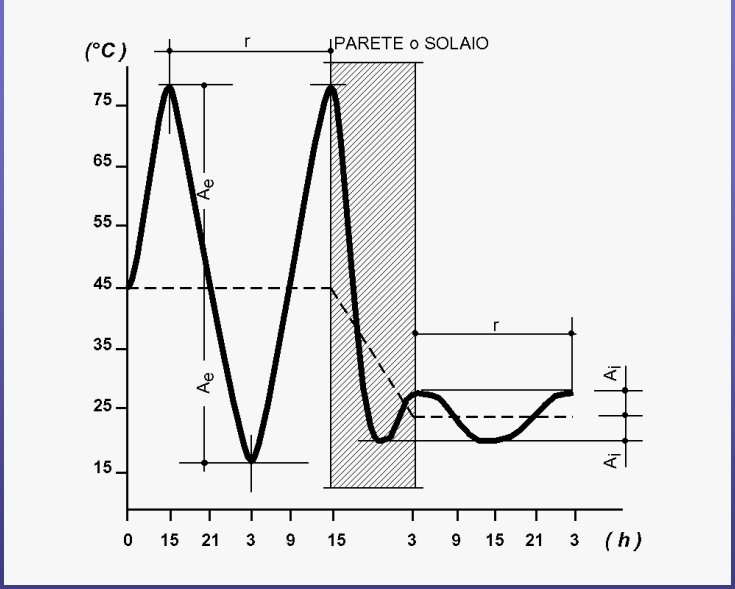
Etichetta energetica Casaclima

Inerzia termica

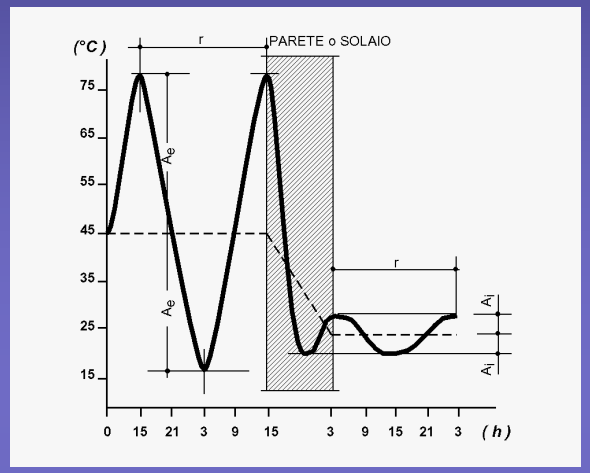
- La grande massa frontale (1000kg/m^2) consente di godere dei benefici effetti dell'azione combinata di:
  - Capacità termica
  - Resistenza termica

che vanno a costituire la qualità nota come "inerzia termica"

- <u>Questi influiscono sul confort interno mediante due effetti:</u>
  - Sfasamento dell'onda di calore
  - Attenuazione dell'onda di calore



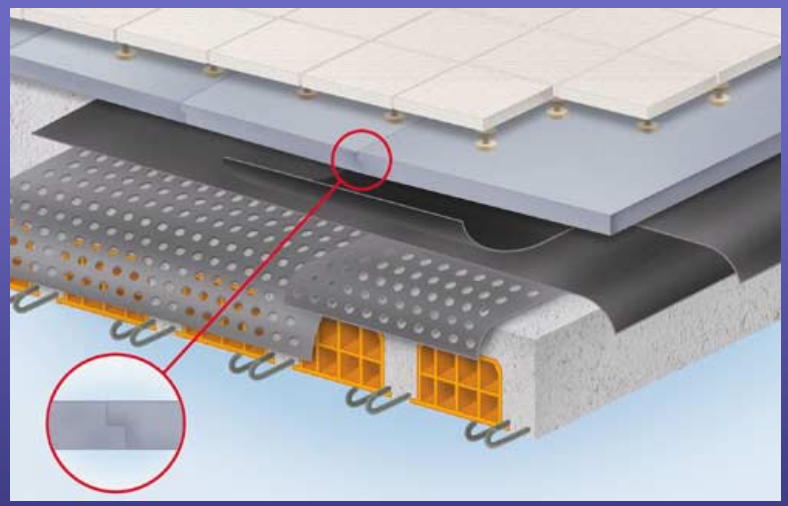
- Il D.M. 27-07-05 prevede che la trasmittanza venga corretta con un coefficiente che tiene conto dell'inerzia termica, funzione della massa frontale.



Massa frontale [kg/m2]	100	150	200	250	300	350	400
Coefficiente c_m	0.98	0.97	0.95	0.92	0.88	0.84	0.8

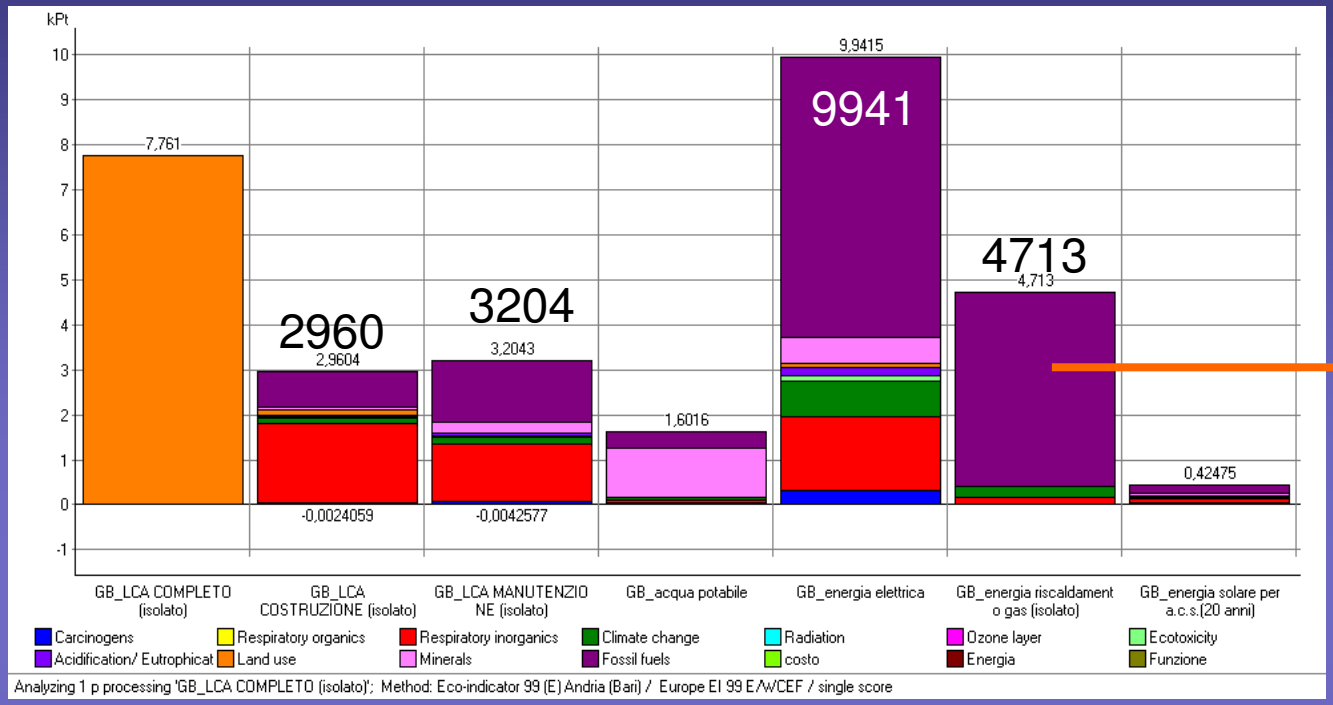
Modalità di applicazione

Chiusure verticali:
isolamento “a cappotto”



Chiusura orizzontale di copertura: isolamento sotto pavimento galleggiante

LCA completo dell'edificio isolato



- 26%

Categorie di danno	Valore danno	Sostanza e % sul tot.	Processo
Human Health DALY	0.31623 DALY	40.2% polveri	Dust (manutenzione)
Ecosystem Quality PDFm²yr	1.3068E5	67.99% Occupation as green urban land	principale
Resources MJ Spl	2.7351E5	50.94 natural gas ETH	Energie elettr.+term.
Energia MJ	2.9978E6	52.13% natural gas ETH	Energie elettr.+term.
Costo €	1.5995E5	41,9% manutenzione	

Valori della caratterizzazione

Generatori di calore - problematiche

- **Problema:**

  $\eta_{g,lim}$ non rispettato

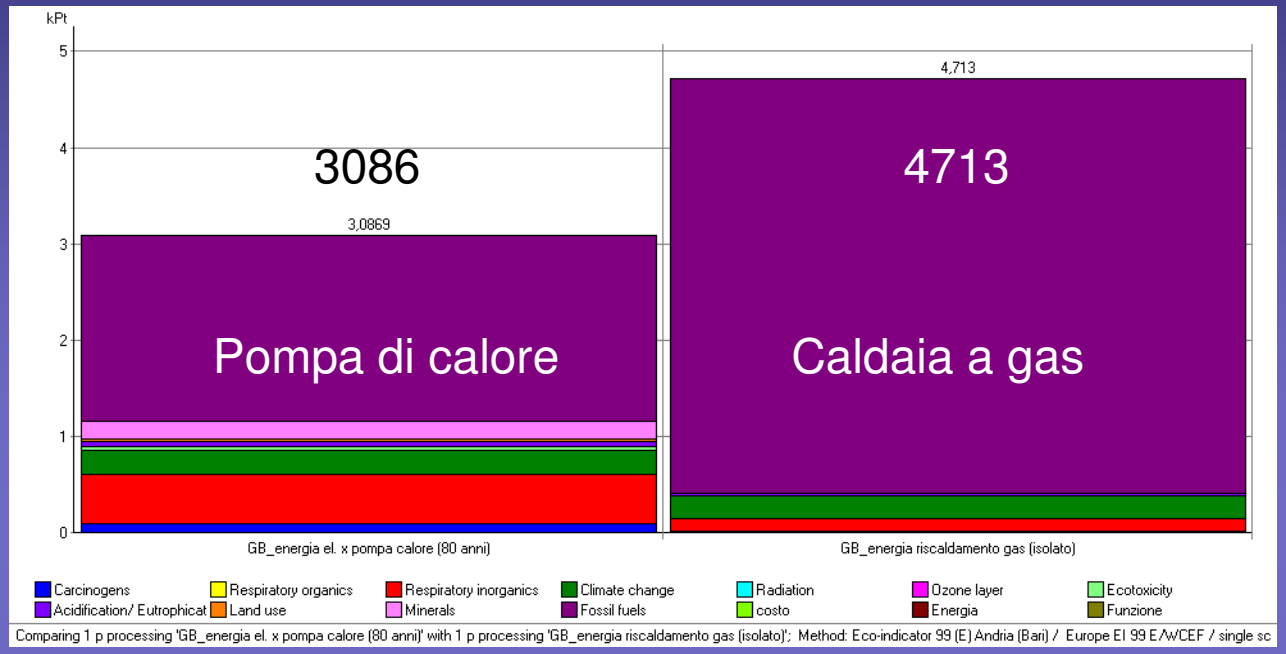
- **Causa:**

  Caldaia disponibile in commercio troppo grande.

- **Possibili soluzioni:**

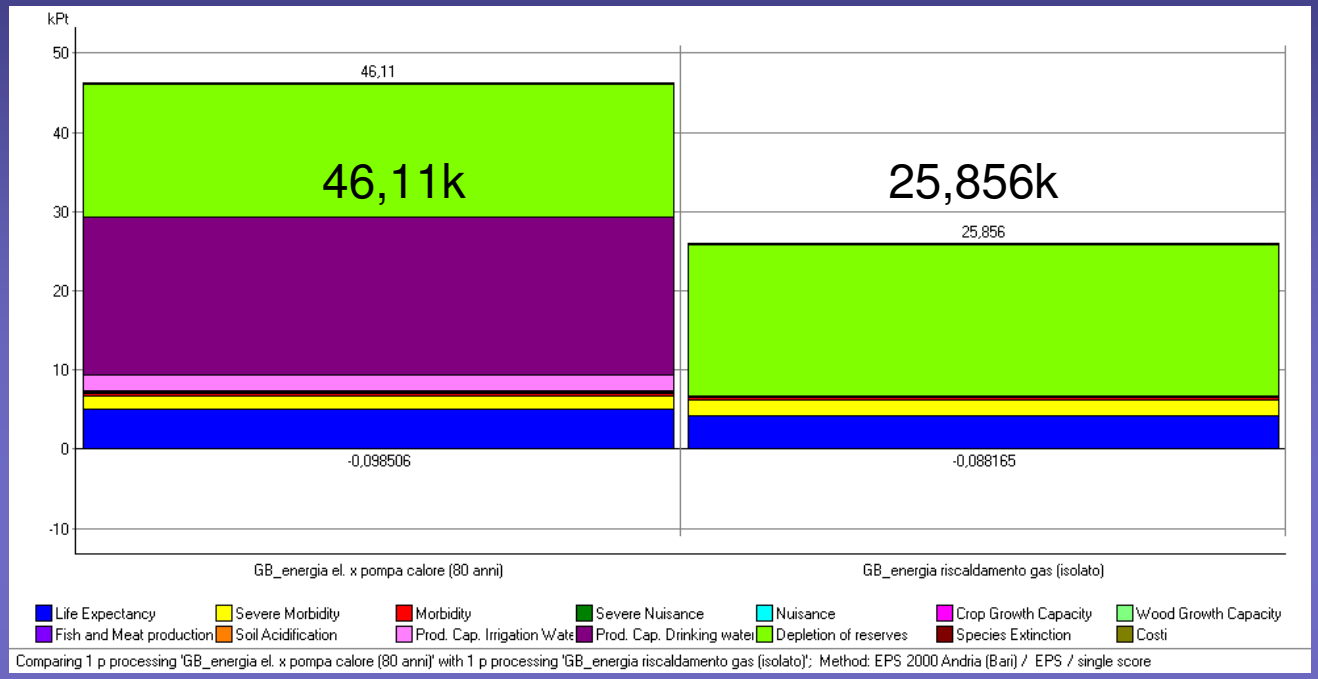
  1. Accorpare due alloggi per ogni generatore
  2. Introdurre un generatore a pompa di calore (elettrico)

Confronto tra generatori: caldaia a metano vs. pompa di calore elettrica



Categorie di danno	Pompa di calore	Caldaia a gas
Human Health	847,96	382,37
Ecosystem Quality	122,44	23,787
Resources	2116,5	4306,8

caldaia a metano vs. pompa di calore elettrica – EPS 2000



Categorie di danno	Pompa di calore	Caldaia a gas
Human Health	7239,7	6559,6
Ecosystem Quality	21839	-75,044
Abiotic stock Resource	16864	19210
Biodiversity	69,014	73,204

L'impianto fotovoltaico

- Fabbisogno di energia elettrica per l'alloggio :2883 kWh/anno.
  - Costo stimato da rete (0.12 €/kWh) : € 27676
  - Costo stimato da rete (0.22 €/kWh) : € 50740

- kit di pannelli in silicio monocristallino, con inverter, 2 kWp
  - Certificato per rendimento min. 80% dopo 25 anni
  - Produzione: circa 2900 kWh/anno presso Andria
  - Costo: € 11000 x 3 impianti/80 anni = € 33000

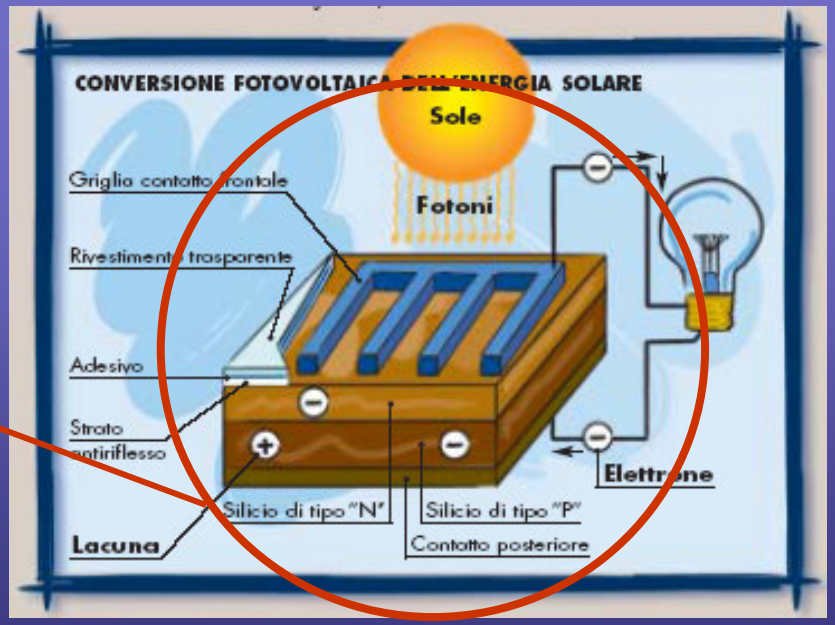
Principali componenti della cella

Silicio con drogaggio n

Silicio con drogaggio p

Argento: griglia ant.

contatto post.

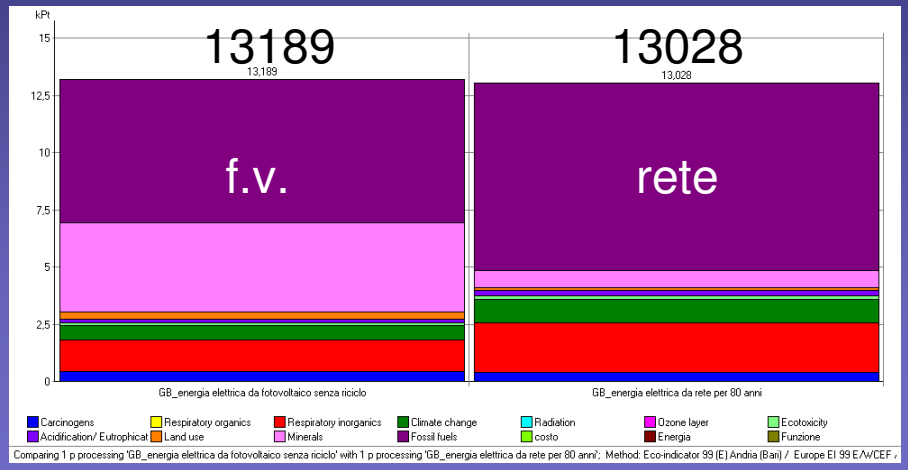


La questione ambientale dei pannelli f.v.: il fine vita

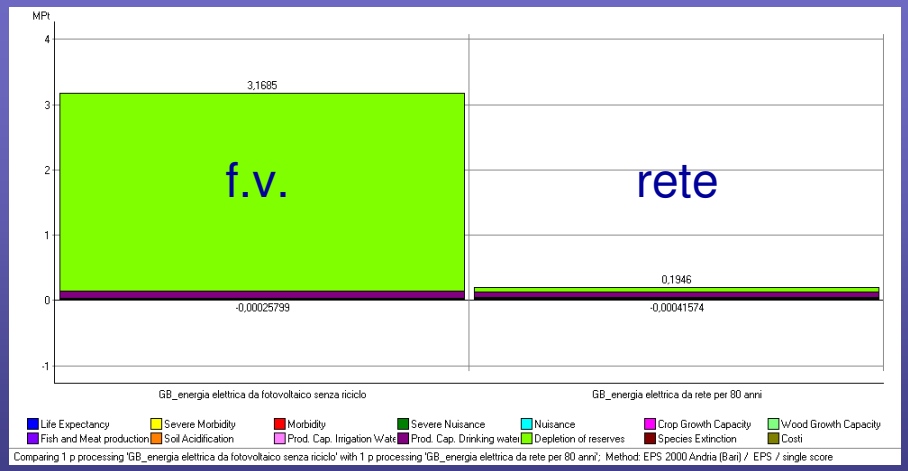
Il processo di base M-Si solar panel, contenuto nella banca dati IVAM, prende in considerazione un pannello da 72 celle fotovoltaiche, capace di 110Wp.

Il fine-vita previsto per l'intero pannello è l'incenerimento.

In questo caso il confronto con l'energia elettrica da rete vede il fotovoltaico come una fonte di maggior danno.



Confronto con Eco-Indicator '99

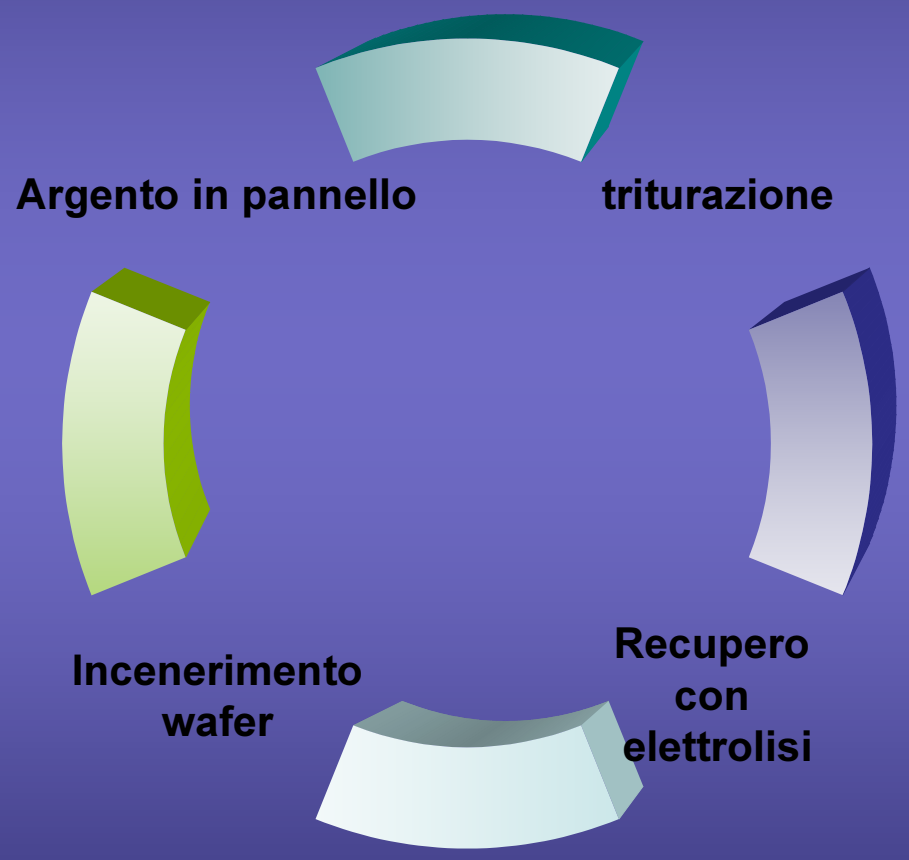


Confronto con EPS 2000

Il recupero dei metalli preziosi

- E' stato creato un processo di recupero di argento da supporti tecnologici, consistente in:

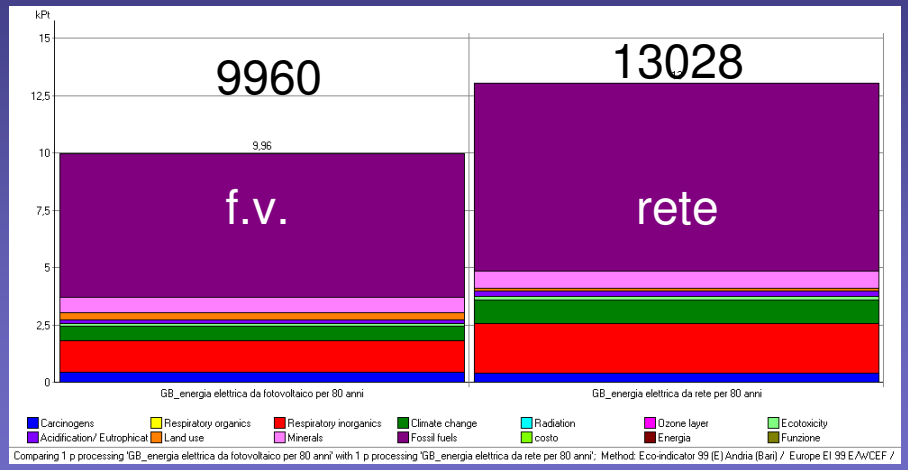
1. **triturazione**
2. **Recupero dell'argento mediante elettrolisi**
3. **Incenerimento del residuo**



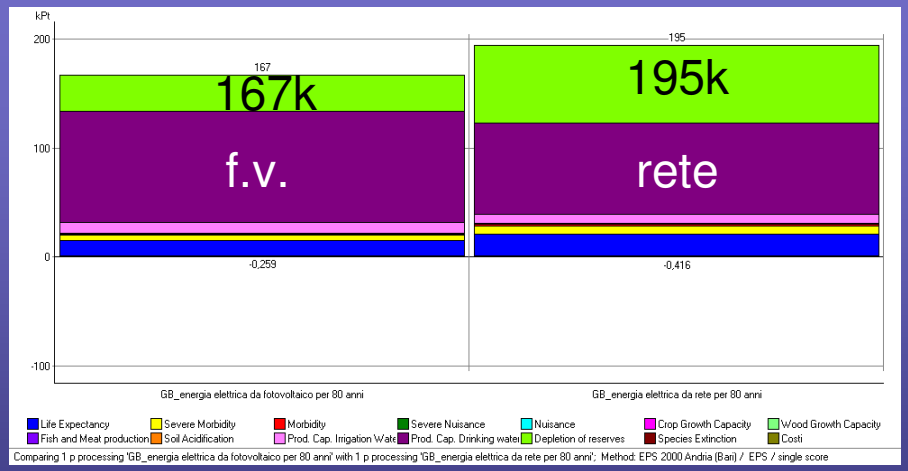
Confronto fra energia da rete e fotovoltaico

Inserito nel processo uno scenario di fine vita più accettabile per i pannelli fotovoltaici, è stato condotto un LCA di confronto fra

- **energia elettrica prelevata da rete ENEL, analizzata secondo il mix energetico italiano del 2005**
- **energia da impianto fotovoltaico grid-connected**

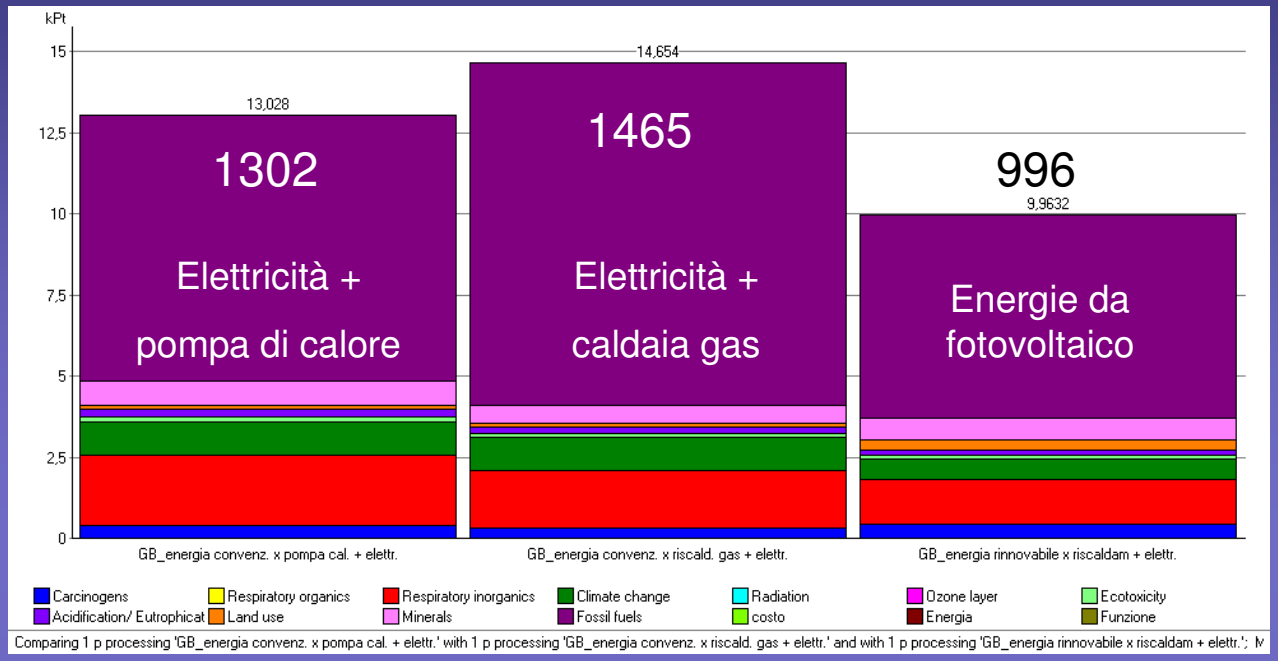


Confronto con Eco-Indicator '99



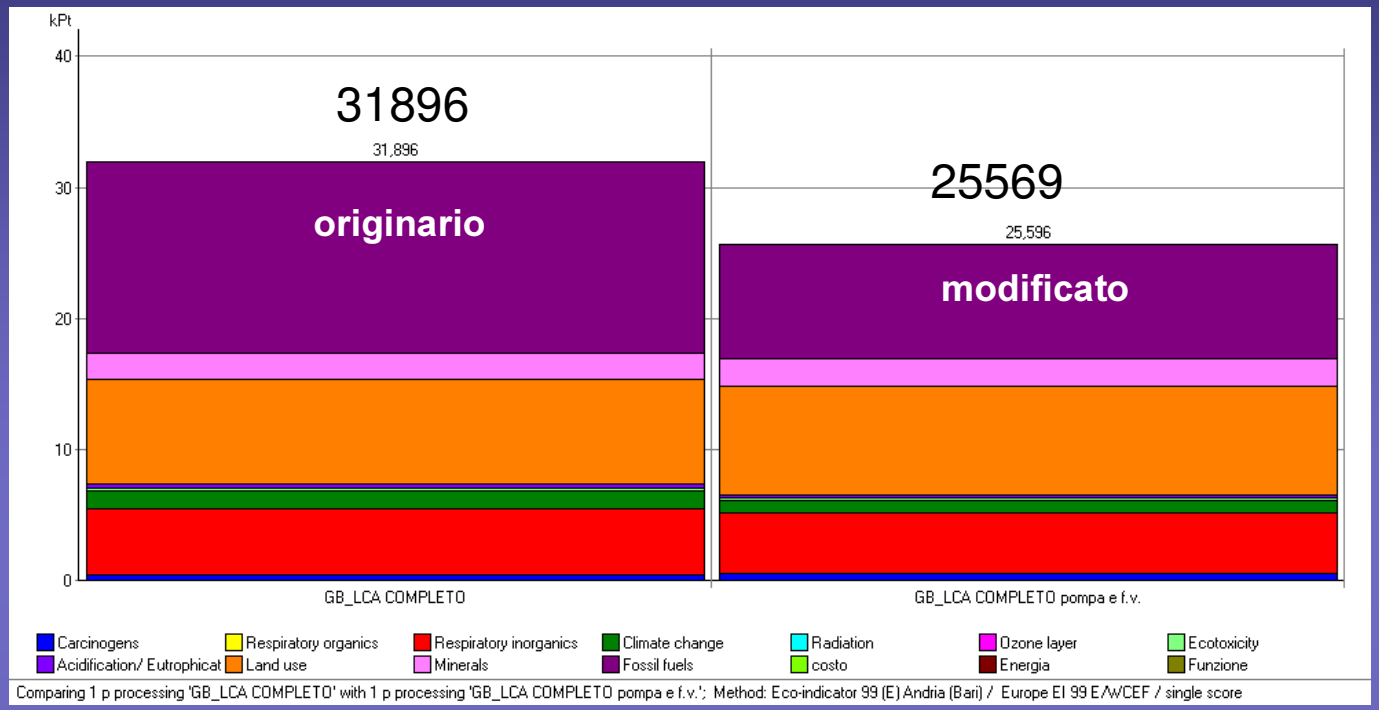
Confronto con EPS 2000

Energie da fonti convenzionali o rinnovabili?



Categorie di danno	El. + pompa di cal.	El. + gas met.	El. da fotovoltaico
Human Health	3578,9	3113,3	2454,2
Ecosystem Quality	516,77	418,12	592,45
Resources	8932,7	11123	6916,6

Confronto fra progetto originario e modificato



Categorie di danno	originario	Con pompa di cal + Impianto f.v.
Human Health	6864,2	6104
Ecosystem Quality	8456,1	8652,3
Resources	16575	10840

Costi esterni

Dall'analisi dei risultai ottenuti con i due metodi:

metodo EcoIndicator si ha un costo esterno minore del **30%** con la progettazione ecocompatibile,

mentre con il metodo **EPS** si ha costo esterno minore del **78%** con la progettazione ecocompatibile

Processo		Danno			Costo esterno (€)
Progetto originario	E.I.99	HH	DALY	0.319	9936.85 €
		EQ	PDF*m2*y	1,3E5	597,31 €
		RES	MJ surplus	3,18E5	19433 €
		Totale			**29967,5€**
	EPS 2000	HH	ELU	5,33E+05	165614.17 €
		EPC	ELU	1,36E+07	
		ASR	ELU	1,16E+04	3.23888E5 €
		BD	ELU	8,99E+04	9955,15 €
		Totale			**498949.32 €**

Processo		Danno			Costo esterno (€)
Progetto modificato	E.I.99	HH	DALY	0,28	8722 €
		EQ	PDF*m2*y	1,3E5	597,30 €
		RES	MJ surplus	1,9E5	11611 €
		Totale			**20930 €**
	EPS 2000	HH	ELU	5,4E4	145366 €
		EPC	ELU	3,7E5	
		ASR	ELU	8,7E4	1,31E5 €
		BD	ELU	6,4E3 €	10338 €
		Totale			**286704 €**

conclusioni

Il processo di ecodesign supportato da LCA consente di ridurre in maniera significativa il danno dovuto al ciclo di vita del progetto.

- **Le scelte progettuali originarie (uso di materiali locali) hanno fornito un danno inferiore del 13,6 % sui materiali da costruzione.**

- **Le modifiche proposte nel corso del lavoro:**
  - Isolamento
  - Pompa di calore
  - Energie solo da fonti rinnovabili

  riducono il danno di un ulteriore 20% rispetto al progetto originario.

- **La produzione di una banca dati italiana orientata al settore edilizio constentirebbe di ridurre l'incertezza legata a:**
  - Danni relativi al processo di produzione edilizia (cantiere)
  - Danni relativi ai materiali specifici

- **Durante la fase di progettazione i tecnici dovrebbero utilizzare il LCA come supporto decisionale per le scelte tecnologiche, costruttive e di processo produttivo.**

Grazie per la

paziente attenzione