



Università  
degli Studi  
di Palermo



ASSOCIAZIONE  
RETE ITALIANA LCA



XVI  
CONVEGNO  
ASSOCIAZIONE  
RETE ITALIANA LCA

La sostenibilità  
nel contesto del PNRR:  
il contributo della  
Life Cycle Assessment

22-24 giugno 2022  
UNIVERSITÀ DI PALERMO

ATTI DEL CONVEGNO





Università  
degli Studi  
di Palermo



ASSOCIAZIONE  
RETE ITALIANA LCA

# ATTI

XVI Convegno dell'Associazione Rete Italiana LCA

## La sostenibilità nel contesto del PNRR: il contributo della Life Cycle Assessment

22-24 giugno 2022

UNIVERSITÀ DI PALERMO

© 2022 Associazione Rete Italiana LCA

Publicato da: Associazione Rete Italiana LCA

Data di pubblicazione: 2022

Paese di pubblicazione: Italia

Lingua: Italiano

Formato dell'e-book: PDF

ISBN: 9791221004588

## **Comitato Scientifico del Convegno**

<b>Michela Aresta</b>	Consorzio Interuniversitario Nazionale per la Reattività Chimica e la Catalisi (CIRCC)
<b>Maurizio Cellura</b>	Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria
<b>Maria Anna Cusenza</b>	Ricerca sul Sistema Energetico – RSE, Dipartimento Sviluppo Sostenibile e Fonti Energetiche
<b>Laura Cutaia</b>	ENEA, Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali
<b>Francesco Guarino</b>	Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria
<b>Monica Lavagna</b>	Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito (ABC)
<b>Sonia Longo</b>	Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria
<b>Alessandro Manzardo</b>	Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Centro Studi Qualità Ambiente (CESQA)
<b>Paolo Masoni</b>	Ecoinnovazione srl
<b>Marina Mistretta</b>	Università Mediterranea di Reggio Calabria, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, delle Infrastrutture e dell'Energia Sostenibile (DIIES)
<b>Bruno Notarnicola</b>	Università degli Studi di Bari Aldo Moro, Dipartimento Jonico in “Sistemi Giuridici ed Economici del Mediterraneo: società, ambiente, culture”
<b>Andrea Raggi</b>	Università degli Studi “G. d’Annunzio” di Chieti-Pescara, Dipartimento di Economia
<b>Lucia Rigamonti</b>	Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA)
<b>Serena Righi</b>	Università di Bologna, Campus di Ravenna, Dipartimento di Fisica e Astronomia (DIFA) e Centro Interdipartimentale di Ricerca per le Scienze Ambientali (CIRSA)
<b>Roberta Salomone</b>	Università degli Studi di Messina, Dipartimento di Economia
<b>Antonio Scipioni</b>	Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Centro Studi Qualità Ambiente (CESQA)
<b>Marzia Traverso</b>	RWTH Aachen University



**Università  
degli Studi  
di Palermo**



## **Comitato organizzatore**

<b>Alberto Brunetti</b>	Università degli Studi di Palermo
<b>Maurizio Cellura</b>	Università degli Studi di Palermo
<b>Maria Anna Cusenza</b>	Ricerca sul Sistema Energetico – (RSE)
<b>Francesco Guarino</b>	Università degli Studi di Palermo
<b>Teresa Maria Gulotta</b>	Università degli Studi di Messina
<b>Sonia Longo</b>	Università degli Studi di Palermo
<b>Marina Mistretta</b>	Università Mediterranea di Reggio Calabria

## **Segreteria Tecnica**

<b>Alberto Brunetti</b>	Università degli Studi di Palermo
<b>Teresa Maria Gulotta</b>	Università degli Studi di Messina

[convegnoretelca2022@gmail.com](mailto:convegnoretelca2022@gmail.com)



## PROGRAMMA

22 giugno 2022  
mercoledì

13.45 – 14.45 **Registrazione dei partecipanti**

---

14.45 – 15.30 **Apertura dei lavori e saluti istituzionali**

*Chair: Maurizio Cellura – Associazione Rete Italiana LCA, Università di Palermo*

*Enrico Napoli – Prorettore Vicario Università di Palermo*

Intervengono:

**Massimo Midiri** Magnifico Rettore Università di Palermo

**Renzo Tomellini** Capo della Segreteria Tecnica del Ministro della Transizione Ecologica

**Antonio Uricchio** Presidente ANVUR, Agenzia Nazionale di Valutazione del Sistema Universitario e della Ricerca

**Alessandro Ruggieri** Presidente AISME, Accademia Italiana di Scienze Merceologiche

**Filippo De Rossi** Presidente Associazione Fisica Tecnica Italiana

**Daniela Baglieri** Assessore Regione Sicilia dell'energia e dei servizi di pubblica utilità

**Vincenzo Infantino** Direttore Generale ARPA Sicilia

**Bruno Notarnicola** Presidente Associazione Rete Italiana LCA

---

15.30 – 16.30 **SESSIONE I**

### **SOSTENIBILITÀ E PNRR: IL CONTRIBUTO DELLA LCA**

*Chair: Bruno Notarnicola – Presidente dell'Associazione Rete Italiana LCA*

*Andrea Pace – Università di Palermo*

**Ecodesign for sustainable products and digital product passport**

- Michele Galatola – Senior Policy Officer DG Grow

**Opportunità per il Global Methane Pledge attraverso la gestione ambientale dei sistemi alimentari: indicatori per la valutazione della sostenibilità**

- Camillo De Camillis – Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)

**La transizione ecologica e la LCA**

- Patty L'Abbate – Senato della Repubblica

**LCA e blockchain, un binomio efficace per cittadini, PA e imprese"**

- Pierluigi Gallo – Università degli Studi di Palermo – SEEDS s.r.l. Spinoff accademico
-

16.30 – 17.45

**SESSIONE II  
EDILIZIA**

*Chair: Marina Mistretta – Associazione Rete Italiana LCA,  
Università Mediterranea di Reggio Calabria  
Maurizio Carta – Università di Palermo*

End – of – Life of Fiber Reinforced Concrete – Theoretical and practical options and Life Cycle Assessment

- Pamela Del Rosario – RWTH Aachen University

An empirical approach for the LCA evaluation of heat pump units

- Kevin Autelitano – Politecnico di Milano

Developing Framework of Life Cycle Assessment in Green Superstructure Pavement

- Manouchehr Shokri – RWTH Aachen University

Le EPD come strumento di eco – progettazione per gli edifici in legno

- Giulia Zarroli – Università di Siena

Impianti energetici in edifici nZEB: uno studio di LCA

- Alberto Brunetti – Università di Palermo
- 

17.45 – 18.15

**SESSIONE POSTER I**

*Chair: Alessandro Manzardo – Associazione Rete Italiana LCA,  
Università di Padova  
Jacopo Bacenetti – Università di Milano*

Life Cycle Assessment applicato a un processo di sintesi di laboratorio di substrati per membrane metalliche per separazione di idrogeno

- Stefania Fiameni – CNR ICMATE

Efficientamento energetico di un distretto di edifici: uno studio di LCA semplificato

- Simona Rosaria La Mantia – Università di Palermo

Industry 4.0 and Life Cycle Assessment: evaluation of the technology applications as an asset for the Life Cycle Inventory

- Mirco Piron – Università di Padova

Sostenibilità ambientale ed economica nella conservazione dei beni culturali:

LCA e LCC di prodotti innovativi basati su nanotecnologie

- Martina Menegaldo – Università Ca'Foscari di Venezia

Analisi del ciclo di vita (LCA) di una tecnica di bioremediation applicata ad un suolo contaminato in laguna di Venezia

- Martina Menegaldo – Università Ca'Foscari di Venezia

Life Cycle Assessment del biorimediao fito – assistito applicato ad un'area contaminata del Sud d'Italia

- Serena Masini – Ecoimpro srl
- 

18.15

Welcome Party

---



## PROGRAMMA

23 giugno 2022  
giovedì

---

8.30 – 9.00	<b>Registrazione dei partecipanti</b>
-------------	---------------------------------------

---

9.00 – 9.15	Saluti introduttivi del Direttore Dipartimento di Ingegneria – Università di Palermo <i>Prof. Antonino Valenza</i>
-------------	---

---

9.15 – 10.45	<b>SESSIONE III</b> <b>LCT E CIRCOLARITÀ 1</b> <i>Chair: Roberta Salomone, Università di Messina</i> <i>Vincenzo Franzitta, Università di Palermo</i>
--------------	--

Promuovere LCA e sostenibilità ambientale: un'esperienza formativa in ambito turistico

- Anna Mazzi – Università di Padova

Life cycle thinking approach in Taxo 4 of EU Taxonomy

- Marzia Traverso – RWTH Aachen University

La Social Life Cycle Assessment per l'esercizio del dovere di diligenza nella catena di approvvigionamento delle batterie: prime riflessioni alla luce della proposta della Commissione Europea di regolamento sulle batterie sostenibili

- Bianca Maria Tragnone – Università "G. d'Annunzio" Chieti – Pescara

Measuring circular economy and sustainability in African companies

- Erik Roos Lindgreen – Università di Messina

Procedura di verifica e validazione delle RCP e PEF per l'ottenimento del marchio Made Green in Italy

- Simone Maranghi – Ecoinnovazione srl

Calculation of environmental performance classes of the "Made Green in Italy" scheme

- Laura Zanchi – Ecoinnovazione srl

---

10.45 – 11.15	<b>Coffee Break</b>
---------------	---------------------

---

11.15 – 12.30	<b>SESSIONE IV</b> <b>LCT E CIRCOLARITÀ 2</b> <i>Chair: Sonia Longo, Università di Palermo</i> <i>Paolo Masoni, Ecoinnovazione srl</i>
---------------	---

Impronta ambientale delle attività aziendali del Gruppo Finsea nell'anno 2020 attraverso approccio di Life Cycle Assessment (LCA)

- Bruno Notarnicola – Università di Bari Aldo Moro

Comparative assessments of the environmental sustainability of plastic packaging. A review

- Alessandro Marson – Università di Padova

Does the circular economy contribute to social improvements according to S – LCA models?

- Bernadette Sidonie Libom – Università di Padova

Analisi del ciclo di vita e CO<sub>2</sub> assorbita da un bambusetto gestito in Italia: applicazione ad un caso studio

- Gaia Esposito – Indaco2 srl, Università di Siena

Life Cycle Management delle pavimentazioni stradali

- Gabriella Buttitta – Università di Palermo

---

**12.30 – 13.00 SESSIONE POSTER II**

*Chair: Serena Righi, Università di Bologna*

*Maria Anna Cusenza, Ricerca sul Sistema Energetico – RSE*

Comparative environmental impact analysis of Pd element substitution in metallic membranes for hydrogen separation

- Simone Battiston – CNR ICMATE

Life cycle thinking to support building retrofitting

- Claudia Di Noi – GreenDelta

Cippato forestale come fonte energetica locale e sostenibile: proposta di una metodologia semplificata per la stima degli impatti in ottica LCA

- Flavio Scrucca – ENEA

A positive working environment

- Clara Valente – Norwegian Institute for Sustainability Research (NORSUS)

Managing the environmental impact of a conflict mineral and artisanal mine in Colombia

- Vanessa Ruffini – Università di Modena e Reggio Emilia

The life cycle thinking of emerging cold chains of the food system transformation: A review

- Alessandro Manzardo – Università di Padova
- 

**13.00 – 14.00 Pranzo**

---

**14.00 – 15.45 SESSIONE V**

**RIFIUTI**

*Chair: Marzia Traverso – RWTH Aachen University*

*Giuseppina Ciulla – Università di Palermo*

Life Cycle Assessment di un sistema di estrazione e trasformazione di lipidi in biodiesel

- Rosa Di Capua – Università di Bari Aldo Moro

A comparative LCA approach for different phosphorous recycling methods

- Suzana Ostojic – RWTH Aachen University

Il ruolo della metodologia LCA nei piani regionali di gestione dei rifiuti in Italia

- Lucia Rigamonti – Politecnico di Milano

Comparing different food waste management options: a review of LCA studies

- Silvia Falasco – Politecnico di Milano

Aspetti critici nello sviluppo di LCA dettagliate finalizzate a EPD di prodotto: il caso dell'acciaio zincato

- Serena Giorgi – Politecnico di Milano

Analisi LCA di un processo di estrusione per il riciclo di imballaggi in plastica

- Angela Daniela La Rosa – Norwegian University of Science and Technology

Verso la circolarità della plastica: analisi di scenari di fine vita di pellicole flessibili in LDPE

- Valerio Arosio – Politecnico di Milano
-



**15.45 – 16.15 SESSIONE POSTER III**

*Chair: Lucia Rigamonti – Associazione Rete Italiana LCA, Politecnico di Milano  
Fabio Viola – Università di Palermo*

Ecosystem services through the lens of Life Cycle Methodologies:  
state – of – art of their application in the agriculture field

- Christian Soldati – Università Mediterranea di Reggio Calabria

Inclusion of prevention activities in LCA and LCC of construction  
waste management: a review

- Yanqing Yi – Università di Padova

Carbon – dots: iterative Life Cycle Assessment of four production routes

- Greta Bacchelli – Università di Bologna

Green ports in Italy: the Carbon Footprint of the Eastern Ligurian Sea port system

- Rosalia Stella Evola – Università di Torino

Integration of Circular Economy metrics with Environmental Impact Assessment:  
methodological proposal

- Federico Gallo – Università di Padova

Regionalizing LCI data for olive oil production: food for thought

- Giovanni Mondello – Università di Messina
- 

**16.15 – 16.45 Coffee Break**

---

**16.45 – 17.30 PREMIO GIOVANI RICERCATORI**

*Chair: Andrea Raggi – Università "G. d'Annunzio" Chieti – Pescara*

Missing inventory data in LCAs of emerging technologies:  
investigating the effects in a case study on PEM – URFC stack

- Teresa Maria Gulotta – Università di Messina

Life Cycle Thinking per la riqualificazione olistica e sostenibile  
del patrimonio edilizio esistente

- Chiara Passoni – Università di Bergamo

Development of a model for a triple layer sustainability assessment of aquaculture

- Michele Zoli – Università di Milano
- 

**17.30 – 18.30 ASSEMBLEA ASSOCIAZIONE RETE ITALIANA LCA**

---

Orto botanico di Palermo (Solo per i partecipanti già registrati a questo evento)

20.15 Saluti Direttore SiMuA Università di Palermo Prof. Paolo Inglese

20.30 Cena sociale

---



**PROGRAMMA**  
24 giugno 2022  
venerdì

**9:15 – 11:00** **SESSIONE VI**  
**ENERGIA**

*Chair: Maurizio Cellura, Associazione Rete Italiana LCA,  
Università di Palermo*

*Marco Beccali, Università di Palermo*

Analisi LCA di un impianto fotovoltaico con moduli Interdigitated Back Contact (IBC)

- Elisabetta Brivio – Ricerca sul Sistema Energetico (RSE)

Comparing LCA GHG emissions of new passenger car sales of over a million battery electric vehicles and internal combustion engine vehicles in Italy

- Nicolò Golinucci – Politecnico di Milano

LCA della logistica urbana

- Andrea Temporelli – Ricerca sul Sistema Energetico (RSE)

End – of – life scenarios of a Parabolic Concentrated Solar Power system

- Federico Rossi – Università di Siena

Quanto costa l'elettricità? Life cycle thinking applicato al calcolo delle esternalità ambientali del mix elettrico italiano

- Benedetta Marmioli – Ricerca sul Sistema Energetico (RSE)

Misurare la circolarità di sistemi elettrici

- Maria Anna Cusenza – Ricerca sul Sistema Energetico (RSE)

Greenhouse gas emission savings of biogasoline produced from municipal sewage sludge with respect to its conventional equivalent

- Serena Righi – Università di Bologna

---

**11.00 – 11.30** **Coffee Break**

---

**11.30 – 12.00**    **SESSIONE POSTER IV**

*Chair: Francesco Guarino – Università di Palermo*

*Marco Ferraro – CNR ITAE*

I Cuochi dell'Alleanza Slow Food come modello di ristorazione sostenibile:

Carbon Footprint dell'attività di Les Résistants a Parigi

- Elena Neri – Indaco2 srl, Università di Siena

Valutazione energetico – ambientale della produzione di elettricità da biogas

- Marina Mistretta – Università Mediterranea di Reggio Calabria

Quantificazione delle emissioni dei metalli pesanti nei dataset agricoli di ILCIDAF attraverso il modello SALCA – heavy metals applicato al suolo italiano

- Francesco Astuto – Università di Bari Aldo Moro

Sfide operative nella costruzione di una banca dati italiana di Life Cycle Inventory nel settore vitivinicolo

- Manuela D'Eusanio – Università "G. d'Annunzio" Chieti – Pescara

Valutazione dei rischi sociali della supply chain di una struttura ricettiva rumena

- Ioannis Arzoumanidis – Università "G. d'Annunzio" Chieti – Pescara

An assessment of the environmental impacts of a canteen service using the LCA methodology

- Vincenzo Campobasso – Università di Bari Aldo Moro
- 

**12.00 – 13.00**    **SESSIONE VII**

**AGROALIMENTARE**

*Chair: Giacomo Falcone – Università Mediterranea di Reggio Calabria*

*Domenico Panno – Università di Palermo*

Life cycle assessment nell'acquacoltura: caso studio di un impianto off – shore nel centro Italia

- Jacopo Bacenetti – Università di Milano

Life Cycle Inventory della filiera agrumicola italiana: modellizzazione dell'inventario della fase agricola attraverso l'elaborazione di dati statistici

- Gregorio Vono – Università Mediterranea di Reggio Calabria

How can life cycle assessments be combined with other circularity tools to measure closed – loop pathways? An application to the agri – food sector

- Emanuele Spada – Università Mediterranea di Reggio Calabria

Experimental implementation of the Made Green in Italy Scheme. The hard sheep milk cheese case study.

- Delia Cossu – CNR IBE
- 

**13.00 – 13.30**    **CHIUSURA CONVEGNO**

- Bruno Notarnicola
  - Maurizio Cellura
- 

**13.30 – 14.30**    **Pranzo**

---

# Sommario

PREFAZIONE .....	16
<b>SESSIONE II</b>	
<b>EDILIZIA</b>	
End-of-Life of Fiber Reinforced Concrete - Theoretical and practical options and Life Cycle Assessment.....	19
An empirical approach for the LCA evaluation of heat pump units .....	28
Developing Framework of Life Cycle Assessment in Green superstructure Pavement .....	40
Le EPD come strumento di eco-progettazione per gli edifici in legno .....	47
Impianti energetici in edifici nZEBs: uno studio di LCA .....	55
<b>SESSIONE POSTER I</b>	
Life Cycle Assessment applicato a un processo di sintesi di laboratorio di substrati per membrane metalliche per separazione di idrogeno.....	65
Efficientamento energetico di un distretto di edifici: uno studio di LCA semplificato .....	72
Industry 4.0 and Life Cycle Assessment: evaluation of the technology applications as an asset for the Life Cycle Inventory.....	79
Sostenibilità ambientale ed economica nella conservazione dei beni culturali: LCA e LCC di prodotti innovativi basati su nanotecnologie.....	87
Analisi del ciclo di vita (LCA) di una tecnica di bioremediation applicata ad un suolo contaminato in laguna di Venezia.....	96
Life Cycle Assessment del biorimediao fito-assistito applicato ad un'area contaminata del Sud d'Italia.....	105
<b>SESSIONE III</b>	
<b>LCT E CIRCOLARITÀ 1</b>	
Promuovere LCA e sostenibilità ambientale: un'esperienza formativa in ambito turistico .....	114
Life cycle thinking approach in Taxo 4 of EU Taxonomy .....	122
La Social Life Cycle Assessment per l'esercizio del dovere di diligenza nella catena di approvvigionamento delle batterie: prime riflessioni alla luce della proposta della Commissione Europea di regolamento sulle batterie sostenibili .....	128
Measuring circular economy and sustainability in African companies .....	136
Procedura di verifica e validazione delle RCP e degli studi PEF per l'ottenimento del marchio Made Green in Italy.....	145

Calculation of environmental performance classes of the “Made Green in Italy” scheme.....	153
---	-----

#### **SESSIONE IV LCT E CIRCOLARITÀ 2**

Impronta ambientale delle attività aziendali del Gruppo Finsea nell'anno 2020 attraverso approccio di Life Cycle Assessment (LCA).....	162
---	-----

Comparative assessments of the environmental sustainability of plastic packaging. A review .....	172
--	-----

Does the circular economy contribute to social improvements according to S-LCA models? .....	181
--	-----

Analisi del ciclo di vita e CO <sub>2</sub> assorbita da un bambusetto gestito in Italia: applicazione ad un caso studio .....	190
---	-----

Life Cycle Management delle pavimentazioni stradali.....	199
--	-----

#### **SESSIONE POSTER II**

Comparative environmental impact analysis of Pd element substitution in metallic membranes for hydrogen separation .....	208
---	-----

Life cycle thinking to support building retrofitting .....	216
--	-----

Cippato forestale come fonte energetica locale e sostenibile: proposta di una metodologia semplificata per la stima degli impatti in ottica LCA .....	225
--	-----

A positive working environment .....	233
--------------------------------------	-----

Managing the environmental impact of a conflict mineral and artisanal mine in Colombia .....	240
--	-----

The life cycle thinking of emerging cold chains of the food system transformation: A review .....	249
---	-----

#### **SESSIONE V RIFIUTI**

Life Cycle Assessment di un sistema di estrazione e trasformazione di lipidi in biodiesel.....	259
--	-----

A comparative LCA approach for different phosphorous recycling methods .....	267
--	-----

Il ruolo della metodologia LCA nei piani regionali di gestione dei rifiuti in Italia .....	275
--	-----

Comparing different food waste management options: a review of LCA studies.....	283
---	-----

Aspetti critici nello sviluppo di LCA dettagliate finalizzate alla certificazione EPD: il caso di prodotti in acciaio zincato.....	291
---	-----

Analisi LCA di un processo di estrusione per il riciclo di imballaggi in plastica.....	299
--	-----

Verso la circolarità della plastica: analisi di scenari di fine vita di pellicole flessibili in LDPE.....	309
---	-----

#### **SESSIONE POSTER III**

Ecosystem services through the lens of Life Cycle Methodologies: state-of-art of their application in the agriculture field.....	318
---	-----

Inclusion of prevention activities in LCA and LCC of construction waste management: a review.....	327
Carbon-dots: iterative Life Cycle Assessment of four production routes .....	335
Green ports in Italy: the Carbon Footprint of the Eastern Ligurian Seaport system .....	343
Integration of Circular Economy metrics with Environmental Impact Assessment: methodological proposal.....	350
Regionalizing LCI data for olive oil production: food for thought.....	358

### **PREMIO GIOVANI RICERCATORI**

Missing inventory data in LCAs of emerging technologies: investigating the effects in a case study on PEM-URFC stack.....	368
Life Cycle Thinking per la riqualificazione olistica e sostenibile del patrimonio edilizio esistente .....	377
Development of a model for a triple layer sustainability assessment of aquaculture.....	386

### **SESSIONE VI ENERGIA**

Life Cycle Assessment di un impianto fotovoltaico con moduli Interdigitated Back Contact (IBC) .....	394
Comparing LCA GHG emissions of new passenger car sales of over a million battery electric vehicles and internal combustion engine vehicles in Italy .....	402
LCA della logistica urbana.....	410
End-of-life scenarios of a Parabolic Concentrated Solar Power system.....	419
Quanto costa l'elettricità? .....	427
Life cycle thinking applicato al calcolo delle esternalità ambientali del mix elettrico italiano .....	427
Misurare la circolarità di sistemi elettrici .....	436
Greenhouse gas emission savings of biogasoline produced from municipal sewage sludge with respect to its fossil equivalent .....	446

### **SESSIONE POSTER IV**

I Cuochi dell'Alleanza Slow Food come modello di ristorazione sostenibile: Carbon Footprint dell'attività di Les Résistants a Parigi .....	453
Valutazione energetico-ambientale della produzione di elettricità da biogas .....	460
La Life Cycle Assessment applicata alla valutazione della sostenibilità dei sistemi power-to-gas: analisi di un caso studio .....	469
Quantificazione delle emissioni dei metalli pesanti nei dataset agricoli di ILCIDAF attraverso il modello SALCA – heavy metals applicato al suolo italiano .....	478

---

Sfide operative nella costruzione di una banca dati italiana di Life Cycle Inventory nel settore vitivinicolo .....	486
Valutazione dei rischi sociali della supply chain di una struttura ricettiva rumena.....	494
An assessment of the environmental impacts of a canteen service using the LCA methodology .....	501
SESSIONE VII AGROALIMENTARE	
Life cycle assessment nell'acquacoltura: caso studio di un impianto off-shore nel centro Italia .....	509
Life Cycle Inventory della filiera agrumicola italiana: modellizzazione dell'inventario della fase agricola attraverso l'elaborazione di dati statistici.....	517
How can life cycle methodologies be combined with other circularity tools to measure closed-loop pathways? An application to the agri-food sector.....	527
Experimental implementation of the Made Green in Italy Scheme. The hard sheep milk cheese case study.....	537

## PREFAZIONE

Il XVI Convegno dell'Associazione Rete Italiana LCA si è svolto a Palermo nei giorni 22, 23 e 24 giugno 2022, sul tema “La sostenibilità nel contesto del PNRR: il contributo della Life Cycle Assessment”. Il Convegno ha ricevuto il patrocinio del Ministero della Transizione Ecologica (MiTE), di due Assessorati della Regione Siciliana, della Città di Palermo, dell'ARPA Sicilia, dell'ARPA Calabria, dell'Accademia Italiana di Scienze Merceologiche (AISME), dell'Associazione Condizionamento dell'Aria Riscaldamento e Refrigerazione (AICARR), della SETAC Italia, della Federazione Ordini dei Dottori Agronomi e dei Dottori Forestali Sicilia, della Consulta Ordini Ingegneri Sicilia e il sostegno di CNR-ITAE di Messina.

La crisi economica successiva alla pandemia ha spinto l'Unione Europea al lancio dello storico programma Next Generation EU. Il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) offre risorse fondamentali per la ripresa economica in Italia e riforme per accelerare la doppia transizione, ecologica e digitale, promossa dal Green Deal, in un'ottica di equità di genere, territoriale e generazionale. In tale contesto, il Life Cycle Thinking (LCT) e la Life Cycle Assessment saranno fondamentali nei prossimi anni per garantire una reale rivoluzione verde e circolare, in linea con gli obiettivi internazionali di contenimento dell'uso di risorse naturali in una prospettiva di ciclo di vita, della mitigazione del cambiamento climatico e della salvaguardia della biodiversità, secondo il principio del Do not significant harm che mira a sostenere o svolgere attività che non arrecano un danno significativo all'ambiente.

Il XVI Convegno dell'Associazione Rete Italiana LCA si è focalizzato sul ruolo della LCA e degli strumenti LCT-based nelle politiche di sostenibilità e di circolarità europee e nazionali e nel PNRR, in settori fondamentali per l'economia italiana, quali l'energia, l'edilizia, l'agroalimentare. Particolare attenzione è stata posta sull'applicazione della LCA al fine vita dei prodotti e ai sistemi di gestione dei rifiuti nell'ottica dell'economia circolare.

I contributi scientifici, presentati durante le sessioni tematiche orali e le sessioni poster, testimoniano il grande interesse della comunità scientifica nazionale verso tali tematiche, ponendo anche grande attenzione all'impiego degli strumenti di LCT per il raggiungimento dei SDG, all'integrazione con altri strumenti per la sostenibilità e alla centralità della metodologia LCA come metrica di misurazione delle prestazioni energetiche e ambientali a supporto del decisore pubblico e privato nel raggiungimento di obiettivi di sostenibilità e circolarità.

Il volume raccoglie i contributi scientifici, presentati a seguito di un processo di double peer review gestito dal Comitato Scientifico. I suddetti contributi sono stati inviati sui seguenti temi:

- Avanzamenti metodologici nel campo della Life Cycle Assessment e degli strumenti LCT-based per la sostenibilità di processi sistemi organizzazioni.
- Life Cycle Assessment strumenti LCT-based a supporto del principio *Do not significantly harm*.
- Life Cycle Assessment strumenti LCT-based applicati alle politiche ambientali e all'economia circolare.

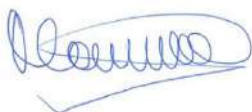


- Life Cycle Assessment strumenti LCT-based per la neutralità climatica di sistemi e processi.
- Life Cycle Assessment strumenti LCT-based per la rivoluzione verde la transizione ecologica e la mitigazione dei cambiamenti climatici.
- Life Cycle Assessment strumenti LCT-based applicati alle missioni del PNRR.
- Impiego di Life Cycle Assessment e strumenti LCT-based per accrescere la sostenibilità dei settori produttivi, per favorire la tutela del territorio e della risorsa idrica e la protezione della biodiversità.

Un'ultima sezione riporta i contributi presentati dai primi tre classificati della tredicesima edizione del Premio Giovani Ricercatori LCA, rivolto ai giovani ricercatori, che operano nel campo dell'analisi del ciclo di vita al fine di promuovere la ricerca e divulgare le loro attività.

### **Il Chair del Convegno**

*Maurizio Cellura*



### **Il Presidente dell'Associazione Rete Italiana LCA**

*Bruno Notarnicola*



SESSIONE II  
EDILIZIA

# An empirical approach for the LCA evaluation of heat pump units

Kevin Autelitano<sup>1</sup>, Jacopo Famiglietti<sup>1</sup>, Mario Motta<sup>1</sup>

*Abstract:* The authors in this work aim to provide reliable quantitative scaling factors (power-mass ratios) that can be utilized to evaluate the environmental profile of energy systems for providing space heating, domestic hot water, and space cooling in buildings (residential and not). 17'741 vapor compression heat pumps and 17'021 charges of refrigerant gas per heat pump unit were included and evaluated in this study. The approach adopted consists of several steps, as follows: i) grouping the appliances on shared characteristics, ii) linking the capacities with mass values, iii) obtaining the best fitting curves, evaluated by  $R^2$  method. Uncertainty analysis via error propagation was also performed to check the consistency of the results. This verification was implemented by the Monte Carlo method and the null hypothesis test.

## 1. Introduction

The building sector accounts for 40% of total primary energy consumption in the European Union and about 40-50% of Greenhouse Gas (GHG) emissions (Llantoy *et al.*, 2020). An effective plan for its decarbonization is strictly necessary, as discussed in the recent scientific literature. For this reason, by the beginning of 2021, the European Commission issued that all new buildings must be built as nearly zero-energy buildings (nZEBs) to contribute to the target of the carbon neutrality by 2050 (Dermentzis *et al.*, 2021). For the building sector, the environmental impact evaluations are mainly linked to the primary energy demand (non-renewable) and the associated GHG emissions related to the operational phase. Still, it could be more accurate considering potential impacts besides GHG emissions with a life cycle approach. The Life-Cycle Assessment (LCA) method, one of the leading methodologies for environmental metrics, potentially powerful for strategic and decision-making management, could be relevant for the purpose (Famiglietti *et al.*, 2021).

In the context described above, heat pumps can be considered one of the most promising solutions to achieve nZEB goals due to their effectiveness at reducing energy consumption, facilitating the integration of renewable sources in buildings (Dermentzis *et al.*, 2021). The environmental impact over the entire life cycle is significantly lower than the one calculated for a condensing boiler applied at the same conditions (Famiglietti *et al.*, 2021).

Access to the primary data of complex industrial products is a significant challenge in life cycle environmental assessment. It could lead to either incomplete life cycle assessment or invalid results caused by misleading assumptions. Heat pump units are an example of these in-

---

<sup>1</sup> Department of Energy, Politecnico di Milano, 20156 Milano, Italy  
E-mail: [kevin.autelitano@polimi.it](mailto:kevin.autelitano@polimi.it)

dustrial products in which evaluating their environmental impact requires several data of their components.

Therefore, providing the mathematical models that are able to scale energy systems based on a few technical characteristics is crucial for life cycle assessment.

For Life-Cycle Assessment related to heat generators, the absence of primary data requires the use of scaling factors to describe in detail all the components involved (Caduff *et al.*, 2014). The parametrization could be performed in function of the total mass of the machine. Although all the manufacturers provide the overall mass data on the datasheet, since the model of the heat generator is chosen during the final design phases, this information might not be available to LCA practitioners for their scopes. In order to speed up the evaluation, it becomes essential to have a mathematical model able to forecast an affordable value of mass related to the power required.

The work aimed to assume empirical relationships between capacity and mass, or refrigerant charge, by searching a correlation between the information present on the datasheets provided by manufacturers.

Actually, there are some empirical relationships that, depending on the type of heat pump studied, can be used to forecast the mass of the machine in the function of the known power (Kemna *et al.*, 2019). This work aims to improve the power-mass reports produced by other authors, e.g., Kemna *et al.* (2019), Caduff *et al.* (2014), and Famiglietti *et al.* (2022), by increasing their range and technologies to the Italian market.

## 2. Material and method

For space heating, space cooling, and domestic hot water services, heat pumps transfer energy (by condensation or evaporation) from external and selected sources, such as water, air, or a ground source. The heat transfer takes place using a refrigerant, which absorbs heat when it evaporates and releases heat when it condenses. The efficiency of the heat pumps is defined by the Coefficient Of Performance (COP), which is the ratio of the heat generated by the appliances (heat output) to the amount of electricity consumed to generate it (work input). For chillers, it is called Energy Efficiency Ratio (EER).

In the following sections, the method adopted to find out the correlations, as well as the way to test their efficiency under real conditions, is presented.

### 2.1. Power-Law relationships

All the commercial Heat Pumps (HPs) present in the market were collected according to: model, capacity, presence of inverter and internal tanks for Domestic Hot Water (DHW), COP, mass, type and charge of refrigerant gas. The required information was carried out by analyzing the technical datasheets provided by the manufacturers listed in the Conto Termico database (GSE, 2020).

It is important to note that the term “heat pump” is also used to define chillers. In this specific case, the research is focused on heating systems only.

The key properties were reported under the following standard conditions:

- brine with 0°C and water with 35°C (B0/W35);
- air with 2°C and water with 35°C (A2/W35);
- water with 10°C and water with 35°C (W10/W35);
- External air 7°C and internal ambient temperature at 20°C (A7/A20)

After the collection process, the appliances were grouped to the cold source used. Where HPs contain the tank integrated for DHW production, its weight was removed to improve the correlation results. As a result of grouping, the study analyzed the following HP technologies:

- water/water (WW) (45 HPs - range between 7 kW and 35 kW);
- brine/water (BW) (49 HPs - range between 3 kW and 32 kW);
- air/air (AA) (15'509 HPs - range between 1 kW and 35 kW);
- air/water (AW) (2'138 HPs - range between 3 kW and 948 kW);
- R32 (6'190 HPs - range between 2 kW and 19 kW);
- R410a (10'410 HPs - range between 2 kW and 948 kW);
- R134a (22 HPs - between 1 kW and 787 kW).

Law relationships were described using the appliance's power to obtain the mass. The same approach was repeated to obtain the refrigerant mass charge by analogy. Trend curves representing the behavior between the properties were potential ( $m = a_i * Power^{b_i}$ ), exponential ( $m = a_i * e^{(b_i * Power)}$ ), or linear functions ( $m = a_i * Power + b_i$ ) – evaluated through the Ordinary Least Squares (OLS) regression method (Owen, 1991).

The reliability of the relationships provided was analyzed through the assessment of  $R^2$ . The potential correlations were described using the above functions, selecting the best  $R^2$  (Coefficient of determination). To improve the interpolations, the following procedure was implemented:

- interpolations with an  $R^2$  lower than 0.5 were improved, excluding extreme outliers. The value 0.5 was defined as a threshold representing the minimum quality to be accepted for good interpolation;
- the extreme outliers were determined using the box plot method as described by Tukey (1977), following the equation n.1:

$$Q_1 - 3 * IQR \leq mass \leq Q_3 - 3 * IQR \quad (1)$$

Where:

- $Q_1$  and  $Q_3$  are the 25<sup>th</sup> and 75<sup>th</sup> percentile;
- $IQR$  is the InterQuartile Range (IQR).

## 2.2. Validation of the Power-Law relationships

The relationships described above were evaluated through specific comparative Life Cycle Assessment studies obtained as comparison among the primary data from manufacturer technical sheets and data estimated throughout the law relationships. For every relationship, 3 nominal power values were selected along with the domain to have a response at the beginning, the average, and the end. The LCA analysis was performed considering two scenarios: (i) the use of primary data from the manufacturer datasheet and (ii) the mass forecasted by the correlation. The HPs were selected among the ones that returned the highest difference between forecasted and declared mass values.

The LCA analysis was performed using Brightway2.0 software (Mutel, 2017). The heat pumps were modeled with from the cradle-to-grave approach (component production, assembling, distribution, use stage, and end of life stage). The components of forecasted appliances were derived using a specific scaling factor as described by Famiglietti et al. (2022) based on the mass assessed. All the HPs (forecasted and not) were tested using scenarios derived from the CENED database (ARIA, 2020) concerning the useful heated or cooled surface, energy needs,

and Seasonal COP or EER. CENED provides open-data concerning Energy Performance Certifications of the Lombardy Region. The lifespan of the appliances was fixed equal to 20 years, as defined by Kemna et al. (2019).

Ecoinvent 3.8 cut-off was used as a background database (Wernet *et al.*, 2016), while the EF 3.0 method was selected as a characterization method (Fazio *et al.*, 2018). The test was carried out on 4 impact categories: i) Climate Change (CC), ii) Ozone Depletion (OD), iii) Human Toxicity Carcinogenic (HTC), and Resource Use Metals and Minerals (RUMM), selected because they would have been the impact categories the most affected by this kind of analysis. The functional unit chosen for the analysis was 1 kWh<sub>th</sub> provided by the appliances.

### 2.3. Monte-Carlo analysis for the evaluation of the uncertainty

Error propagation via Monte Carlo (MC) analysis was performed to obtain estimates of the uncertainty associated with the results (Pizzol, 2019).

The MC analysis was performed, i) assessing the activity data's quality by evaluating geometric standard deviations using the pedigree matrix (Henriksen *et al.*, 2021). Once the uncertainties have been associated with each activity data, the MC analysis was set up, performing the calculation for the two scenarios. The number of executions was fixed equal to 1'000 with dependent sampling, so every MC analysis was represented by a list of 1'000 samples.

The results obtained by the two scenarios were checked in order to verify if they were statistically comparable. For every impact category, it was the probability that the forecasted data give results higher than primary data (see equation n.2):

$$Differences = \begin{bmatrix} x_{1,forecasted\ data} - x_{1,primary\ data} \\ \vdots \\ x_{n,forecasted\ data} - x_{n,primary\ data} \end{bmatrix} \quad (2)$$

The probability test, typically used in commercial software, was used to check if the two distributions were statistically comparable (results approx. equal to 50%).

In order to increase the consistency of the results, another statistic test was performed, the null hypothesis test. This test was implemented as follows:

- the distributions were tested for normality using the Shapiro-Wilk test (Shapiro, S.; Wilk, M., 1965);
- the paired test ( $p < 0.05$ ) and Bonferroni correction to avoid false positives for normally distributed results;
- the nonparametric pairwise Wilcoxon Rank Sum test ( $\alpha = 0.05$  and Bonferroni correction) for not normally distributed results (Pizzol, 2019).

## 3. Results

In this section, the results obtained are shown, presenting the correlations according to the R<sup>2</sup> and the results obtained by LCA analysis (both for deterministic and stochastic approaches).

### 3.1. $R^2$ results

Tables 1 show the correlations among powers and masses/refrigerant charges. In total, 7 relationships were reported showing the  $R^2$  values and the range in which they are tested.

It is important to emphasize that predicted mass values from HPs that use water or brine as a cold source do not consider the presence of a potential hot water storage tank integrated inside the machine.

Table 1. correlations mass-power with  $R^2$  value

Heat pump type	Interpolation relationship	$R^2$	Range
Water	$m = 82.755 * \exp(0.0234 * P)$	0.58	7 kW – 35 kW
Brine	$m = 67.932 * P^{0.347}$	0.57	3 kW – 32 kW
Air/air	$m = 10.231 * P - 25.896$	0.57	1 kW – 35 kW
Air/water	$m = 14.28 * P^{0.904}$	0.90	3 kW – 948 kW
R32	$m = 0.2792 * P^{0.9138}$	0.74	2 kW – 19 kW
R410a	$m = 0.1645 * P + 1.7642$	0.91	2 kW – 948 kW
R134a	$m = 0.0209 * P^{1.4258}$	0.98	1 kW – 787 kW

Figure 1 represents all the appliances involved in the study. All the heat pumps were described in terms of mass and power in a scattered chart, and the relationships were represented to show graphically how the trend worked compared with them.

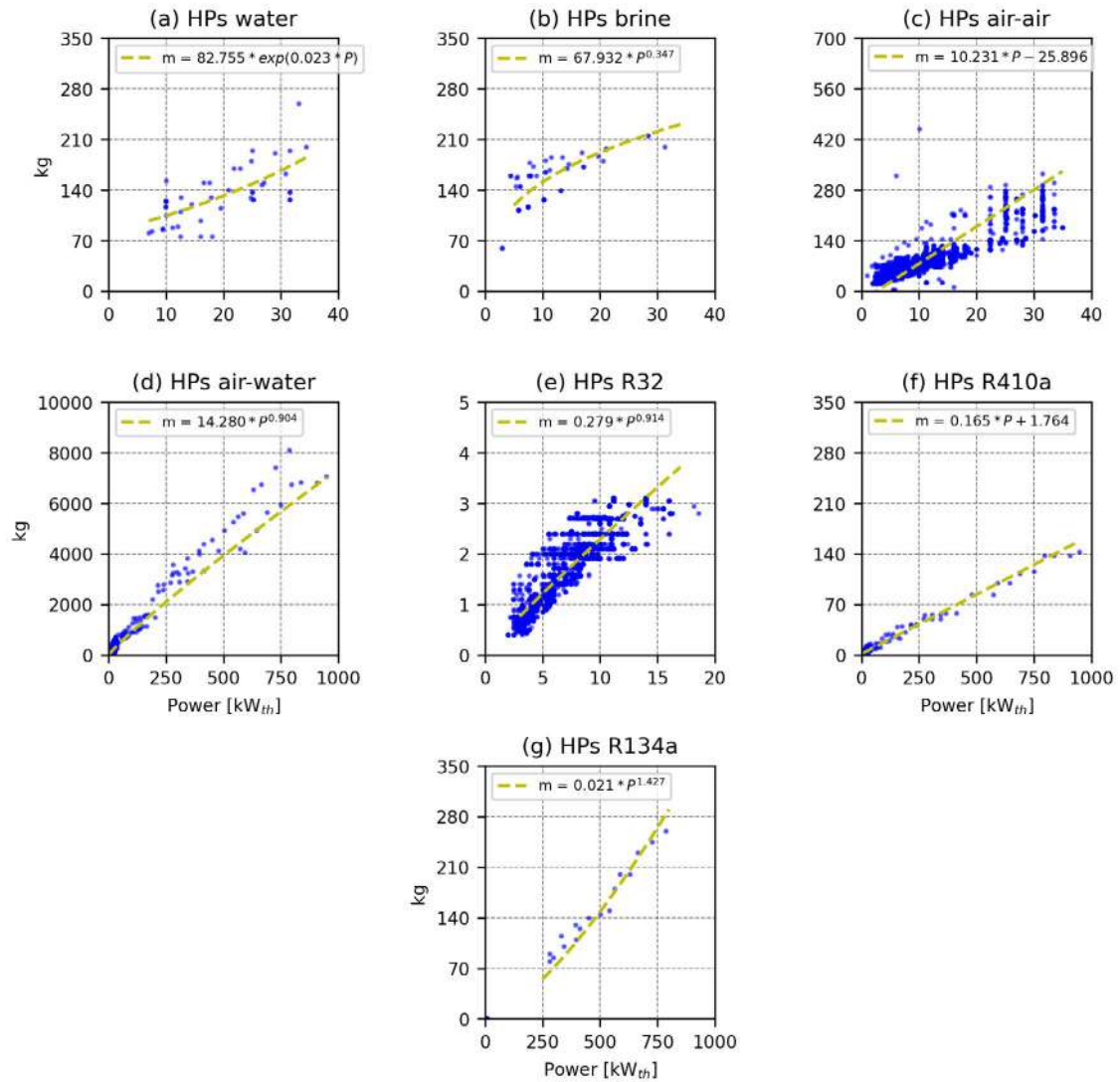


Figure 1: correlations obtained in mass-power chart

### 3.2. LCA results

Table 2 shows the deterministic results obtained for each power-law relationship developed. The tables indicate the technology, the capacity evaluated for each technology, the outcomes obtained for the two assessments compared (using primary data and using the relationship). The variation was figured out by the ratio between the difference between the two results obtained and the predicted data.



Table 2. Results from deterministic approach

Technology	Capacity [kW]	Potential impact [Unit / FU]	Predicted data	Primary data	Var [%]
Water	9.90	CC [kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	3.15E-02	3.24E-02	2.85
		OD [kgCFC <sub>11eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	1.30E-08	1.31E-08	0.55
		HTC [CTUh/kWh <sub>th</sub> ]	3.76E-11	4.47E-11	18.97
		RUMM [kgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	3.15E-06	3.73E-06	18.32
	12.60	CC [kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	1.37E-02	1.40E-02	2.02
		OD [kgCFC <sub>11eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	5.85E-09	5.87E-09	0.38
		HTC [CTUh/kWh <sub>th</sub> ]	1.36E-11	1.58E-11	16.24
		RUMM [kgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	1.13E-06	1.31E-06	15.76
	31.50	CC [kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	3.55E-02	3.50E-02	1.23
		OD [kgCFC <sub>11eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	1.63E-08	1.63E-08	0.21
		HTC [CTUh/kWh <sub>th</sub> ]	1.73E-11	1.39E-11	24.60
		RUMM [kgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	1.40E-06	1.12E-06	24.59
Brine	7.50	CC [kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	5.93E-02	5.89E-02	0.67
		OD [kgCFC <sub>11eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	2.77E-08	2.77E-08	0.10
		HTC [CTUh/kWh <sub>th</sub> ]	2.87E-11	2.48E-11	13.59
		RUMM [kgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	2.36E-06	2.04E-06	13.55
	13.20	CC [kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	3.91E-02	1.87E-02	1.04
		OD [kgCFC <sub>11eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	1.81E-08	1.81E-08	0.18
		HTC [CTUh/kWh <sub>th</sub> ]	2.03E-11	1.71E-11	18.65
		RUMM [kgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	1.66E-06	1.40E-06	18.65
	31.29	CC [kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	1.56E-01	1.55E-01	0.49
		OD [kgCFC <sub>11eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	7.35E-08	7.34E-08	0.08
		HTC [CTUh/kWh <sub>th</sub> ]	5.78E-11	5.18E-11	11.51
		RUMM [kgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	4.63E-06	4.15E-06	11.63

(continued on the next page)

Table 2: (continued from previous page)

Technology	Capacity [kW]	Potential impact [Unit / FU]	Predicted data	Primary data	Var [%]
Air-air	5.00	CC [kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	1.49E-02	1.51E-02	1.05
		OD [kgCFC <sub>11eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	6.84E-09	6.85E-09	0.16
		HTC [CTUh/kWh <sub>th</sub> ]	5.80E-12	7.33E-12	20.87
		RUMM [kgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	5.37E-07	6.60E-07	18.63
	15.50	CC [kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	4.89E-02	4.75E-02	2.86
		OD [kgCFC <sub>11eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	2.25E-08	2.23E-08	0.89
		HTC [CTUh/kWh <sub>th</sub> ]	2.64E-11	1.59E-11	39.77
		RUMM [kgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	2.17E-06	1.32E-06	39.17
	33.50	CC [kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	5.12E-02	5.07E-02	0.98
		OD [kgCFC <sub>11eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	2.35E-08	2.35E-08	0.04
		HTC [CTUh/kWh <sub>th</sub> ]	2.99E-11	2.55E-11	14.72
		RUMM [kgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	2.41E-06	2.05E-06	14.94
Air-water	7.00	CC [kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	5.11E-02	5.59E-02	8.74
		OD [kgCFC <sub>11eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	2.40E-08	2.44E-08	1.60
		HTC [CTUh/kWh <sub>th</sub> ]	2.08E-11	5.94E-11	65.01
		RUMM [kgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	1.72E-06	4.85E-06	64.43
	107.50	CC [kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	5.07E-02	5.59E-02	9.00
		OD [kgCFC <sub>11eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	2.40E-08	2.44E-08	2.00
		HTC [CTUh/kWh <sub>th</sub> ]	1.79E-11	5.94E-11	70.00
		RUMM [kgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	1.49E-06	4.85E-06	69.00
	478.40	CC [kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	2.97E-01	2.99E-01	0.57
		OD [kgCFC <sub>11eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	1.37E-07	1.38E-07	0.10
		HTC [CTUh/kWh <sub>th</sub> ]	1.56E-10	1.70E-10	8.79
		RUMM [kgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	1.23E-05	1.34E-05	8.99

(continued on the next page)

Table 2: (continued from previous page)

Technology	Capacity [kW]	Potential impact [Unit / FU]	Predicted data	Primary data	Var [%]
R32	2.46	CC [kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	5.54E-03	8.36E-03	51.01
		OD [kgCFC <sub>11eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	5.81E-09	9.96E-09	71.36
		HTC [CTUh/kWh <sub>th</sub> ]	8.86E-12	8.95E-12	1.03
		RUMM [kgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	7.99E-07	8.00E-07	0.16
	9.00	CC [kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	2.49E-02	3.10E-02	24.23
		OD [kgCFC <sub>11eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	2.92E-08	3.81E-08	30.34
		HTC [CTUh/kWh <sub>th</sub> ]	2.99E-11	3.01E-11	0.65
		RUMM [kgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	2.50E-06	2.51E-06	0.11
	18.17	CC [kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	1.11E-02	8.81E-03	26.54
		OD [kgCFC <sub>11eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	1.37E-08	1.03E-08	33.38
		HTC [CTUh/kWh <sub>th</sub> ]	1.02E-11	1.01E-11	0.75
		RUMM [kgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	8.31E-07	8.30E-07	0.13
R410a	16.00	CC [kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	4.80E-02	7.82E-02	62.80
		OD [kgCFC <sub>11eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	1.55E-08	2.61E-08	68.62
		HTC [CTUh/kWh <sub>th</sub> ]	3.74E-11	3.77E-11	0.63
		RUMM [kgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	3.03E-06	3.04E-06	0.11
	31.50	CC [kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	2.03E-01	3.30E-01	62.30
		OD [kgCFC <sub>11eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	6.90E-08	1.14E-07	64.73
		HTC [CTUh/kWh <sub>th</sub> ]	5.76E-11	5.86E-11	1.71
		RUMM [kgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	4.62E-06	4.63E-06	0.30
	796.00	CC [kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	1.85E-01	1.92E-01	3.91
		OD [kgCFC <sub>11eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	6.44E-08	6.69E-08	3.97
		HTC [CTUh/kWh <sub>th</sub> ]	4.87E-12	4.93E-12	1.15
		RUMM [kgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	2.53E-07	2.53E-07	0.31

(continued on the next page)

Table 2: (continued from previous page)

Technology	Capacity [kW]	Potential impact [Unit / FU]	Predicted data	Primary data	Var [%]
R134a	332.30	CC [kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	3.98E-02	5.23E-02	31.34
		OD [kgCFC <sub>11eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	5.16E-08	7.19E-08	39.20
		HTC [CTUh/kWh <sub>th</sub> ]	5.47E-11	5.53E-11	0.98
		RUMM [kgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	4.31E-06	4.32E-06	0.15
	585.60	CC [kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	2.20E-01	2.35E-01	6.97
		OD [kgCFC <sub>11eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	3.00E-07	3.25E-07	8.27
		HTC [CTUh/kWh <sub>th</sub> ]	2.35E-10	2.35E-10	0.28
		RUMM [kgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	1.83E-05	1.83E-05	0.04
	786.70	CC [kgCO <sub>2eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	9.91E-02	9.28E-02	6.79
		OD [kgCFC <sub>11eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	1.37E-07	1.27E-07	8.06
		HTC [CTUh/kWh <sub>th</sub> ]	1.02E-10	1.01E-10	0.27
		RUMM [kgSb <sub>eq</sub> /kWh <sub>th</sub> ]	7.93E-06	7.93E-06	0.04

### 3.3. Results from Monte-Carlo analysis

Figure 2 represents the comparison between the distributions obtained after the Monte-Carlo analysis. For the picture, the two cases representing the scenarios were reported. The subplot (a) is related to the test performed for an HP water-water at a capacity equal to 9.9 kW on the OD indicator. The subplot (b) shows the test performed on a water-water HP with power equal to 9.9 kW, evaluating the CC impact category results.

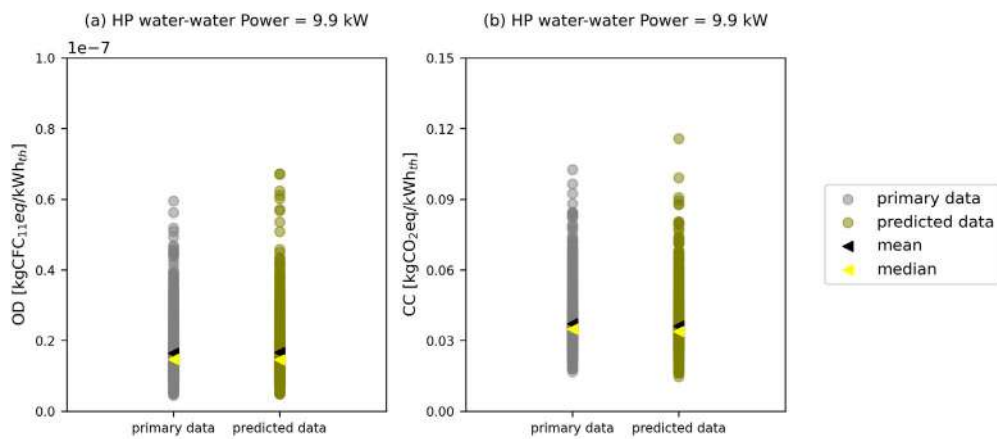


Figure 2: comparison between MC analysis

#### 4. Discussion

The results obtained using the deterministic approach reported, for all the tests, that the relationships need to be improved. For mass-power curves, the variation in the environmental profile between the two assessments predominantly remained significantly under 10% in CC and OD emission factors. This trend is not confirmed for HTC and RUMM, where the variation reported assessments between 8% and 70%. It was noted that the mentioned variation decreased while the power of the HP tested had been increased. In the case of the mass charge-power relationships, the impact category the most variable was OD, where the variation reached values up to 71%. Even in this case, corrections and improvements of the presented interpolations are necessary. The adoption of a stochastic approach confirmed the same results. For mass-power relationships, the null hypothesis did not verify the condition of equality between the two distribution in HTC and RUMM emission factors except in one test (air-water relationship with power equal to 578.40 kW<sub>th</sub>). The null hypothesis applied for mass charge-power relationships did not verify the condition of equality between the two distribution in CC and OD emission factors, except in all the tests performed with HPs at power higher than 585.6 kW<sub>th</sub>. The analysis performed did not include the contribution of the electrical energy in the operation use phase but it was noticed that its presence would have reduced significantly the variation between the assessments reported. In this specific case, the null hypothesis applied was verified for all the tests.

#### 5. Conclusions

This report aims to find a correlation between mass, or gas charge, and power in heat pumps through an empirical process based on the correlation of primary data provided by manufacturers. The robustness of the models was assessed by LCA analysis through a combination of a deterministic approach, aimed at determining the variation of emission factors when primary mass data were replaced by correlation data, and a stochastic approach by studying the distributions obtained by Monte-Carlo analysis.

The correlations, which are the result of a process that is still in its preliminary state, but which has considerable potential for improvement, can be applied within models for LCA analysis where the absence of primary mass data, or refrigerant gas charge, could be a problem.

The results obtained from the interpolated curves can be guaranteed to be within the stated ranges and for the emission factors verified, although their extension is under consideration.

#### 6. References

- ARIA (2020) *OPENDATA - Dati CENED+2.0*. Available at: [http://www.cened.it/opendata\\_cenedplus2](http://www.cened.it/opendata_cenedplus2) (Accessed: 17 December 2021).
- Caduff, M. *et al.* (2014) 'Scaling Relationships in Life Cycle Assessment: The Case of Heat Production from Biomass and Heat Pumps', *Journal of Industrial Ecology*, 18(3), pp. 393–406. doi: 10.1111/jiec.12122.
- Dermentzis, G., Ochs, F. and Franzoi, N. (2021) 'Four years monitoring of heat pump, solar thermal and PV system in two net-zero energy multi-family buildings', *Journal of Building Engineering*, 43(March), p. 103199. doi: 10.1016/j.jobe.2021.103199.

- Famiglietti, J., Toppi, T., *et al.* (2021) 'A comparative environmental life cycle assessment between a condensing boiler and a gas driven absorption heat pump', *Science of the Total Environment*, 762, p. 144392. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144392.
- Famiglietti, J., Gerevini, L., *et al.* (2021) 'Environmental Life Cycle Assessment scenarios for a district heating network. An Italian case study', *Energy Reports*, 7, pp. 368–379. doi: 10.1016/j.egy.2021.08.094.
- Famiglietti, J. *et al.* (2022) 'Developing a new data-driven LCA tool at the urban scale: The case of the energy performance of the building sector', *Energy Conversion and Management*, 256, p. 115389. doi: 10.1016/j.enconman.2022.115389.
- Fazio, S. *et al.* (2018) *Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods*, JRC. doi: 10.2760/671368.
- GSE (2020) *Catalogo impianti - conto termico 2020*. Available at: <https://www.gse.it/servizi-per-te/efficienza-energetica/conto-termico/documenti> (Accessed: 1 September 2020).
- Kemna R, Elburg M van, Boorn R van den, A. S. (2019) *Space and combination heaters: Ecodesign and Energy Labelling*. Available at: [www.ecoboiler-review.eu](http://www.ecoboiler-review.eu) Specific.
- Llantoy, N., Chàfer, M. and Cabeza, L. F. (2020) 'A comparative life cycle assessment (LCA) of different insulation materials for buildings in the continental Mediterranean climate', *Energy and Buildings*, 225. doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110323.
- Mutel, C. (2017) 'Brightway: An open source framework for Life Cycle Assessment', *The Journal of Open Source Software*, 2(12), p. 236. doi: 10.21105/joss.00236.
- Owen (1991) 'Gauss and the invention of Least Squares', *Annals of Statistics*.
- Pizzol, M. (2019) 'Deterministic and stochastic carbon footprint of intermodal ferry and truck freight transport across Scandinavian routes', *Journal of Cleaner Production*, 224, pp. 626–636. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.270.
- Shapiro, Sam S.; Wilk, M. B. (1965) 'An analysis of variance test for normality (complete samples)', in *Biometrika*, pp. 591–611.
- Tukey, J. W. (1977) 'Exploratory Data Analysis by John W. Tukey', *Biometrics*, p. 768. Available at: <http://www.jstor.org/stable/2529486>.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., and Weidema, B. (2016) 'The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology', *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21((9)), pp. 1218–1230. Available at: <https://ecoinvent.org/offerings/faqs/#1629117984453-fd08d97d-4512>.

