



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

ANNEX 49: "Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities"

: Paola Caputo, Adriana Angelotti

ANNEX 49: "Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities"

Paola Caputo, Adriana Angelotti

Settembre 2010

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Usi finali

Tema: Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto, in particolare nella stagione estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione. Interazione condizionamento e illuminazione

Responsabile Tema: Gaetano Fasano- ENEA

Tema di ricerca 5.4.1.1/5.4.1.2 “Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto, in particolare nella stagione estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione. Interazione condizionamento e illuminazione”.

RAPPORTO FINALE DELLA RICERCA Settembre 2010

ANNEX 49: “Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities”

1. Introduzione

Le attività dell’*Annex 49* proseguono i risultati ottenuti nell’ambito della *IEA ECBCS Annex 37 (Low Exergy Systems for Heating and Cooling of Buildings)* sul tema dell’efficienza exergetica per i sistemi di *heating and cooling* per l’ambiente costruito.

L’assunto di partenza resta quello che il livello exergetico utile al soddisfacimento delle esigenze di *heating and cooling* è molto basso, dato che la temperatura desiderata si colloca in un intervallo molto ristretto e prossimo alla temperatura ambiente. Nonostante ciò, per soddisfare tali esigenze vengono impiegate fonti fossili e di alta qualità energetica.

Scopo dell’*Annex 49* è pertanto trovare delle strategie di uso dell’energia a bassa exergia, sia a livello di edificio sia a livello di *community*. La ricerca si estende a tutte le fasi, dalla generazione, alla distribuzione allo stoccaggio, all’uso finale di energia e cerca di valorizzare l’approccio exergetico ai fini dell’ottimizzazione dell’efficienza globale, relativa all’intera catena.

Le attività dell’*Annex 49* sono ripartite in quattro *subtask*:

- A. *Exergy analysis methodologies*
- B. *Exergy efficient community supply systems*
- C. *Exergy efficient building technologies*
- D. *Knowledge transfer and dissemination.*

L’*Annex* si è ufficialmente chiuso a fine 2009, tuttavia, alcune attività connesse sono proseguite in seno a conferenze, rapporti di ricerca e altre pubblicazioni scientifiche. Questo rapporto presenta i risultati delle attività relative al periodo compreso tra aprile 2009 e luglio 2010 dal gruppo di lavoro del Dip. BEST del Politecnico di Milano (A. Angelotti e P. Caputo, entrambe ricercatori).

2. Subtask A: Exergy analysis methodologies

Il contributo del gruppo di lavoro riguarda soprattutto la **Deliverable A.3.2 “Report/Compendium of the mathematical models for exergy-based design and performance analysis: Dynamic analysis”**, in relazione alla quale, i lavori già oggetto di una pubblicazione [1] hanno subito un approfondimento. A tal proposito può essere citato il contributo al Convegno Internazionale ELCAS [2] e, nell’ambito dell’Azione COST C24, il contributo per il Capitolo 2 del COSTeXergy Book in corso di pubblicazione [3].

Il proseguimento dello studio è consistito nell’effettuare un confronto tra metodi di analisi exergetica stazionari e dinamici applicati agli impianti di riscaldamento e raffrescamento in due step successivi:

- a. confrontando i risultati delle due metodologie nel caso di uno specifico impianto, cioè una pompa di calore ad aria esterna reversibile;
- b. valutando l’influenza della metodologia di analisi adottata sul confronto prestazionale di diversi impianti alternativi fra loro.

Tema di ricerca 5.4.1.1/5.4.1.2 “Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto, in particolare nella stagione estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione. Interazione condizionamento e illuminazione”.

RAPPORTO FINALE DELLA RICERCA Settembre 2010

La Tabella 1 illustra alcuni risultati relativi al livello di analisi a), cioè gli esiti di una comparazione tra l'efficienza exergetica della pompa di calore valutata secondo un approccio stazionario basato su temperature di progetto ($\Psi_{stea,des}$) e l'efficienza exergetica ottenuta a partire da una simulazione dinamica sulle stagioni di riscaldamento e raffreddamento (Ψ_{dyn}). Si nota come le differenze tra i due approcci tendano ad essere più importanti in estate che in inverno, in entrambi i contesti climatici analizzati di Milano e Palermo. D'altra parte si osserva anche come, in entrambe le stagioni, le differenze siano maggiori a Palermo rispetto a Milano. Entrambi questi risultati possono essere ricondotti alla maggiore sensitività del fattore di Carnot ($1 - T_0/T_r$), che esprime la qualità del calore fornito o sottratto all'ambiente climatizzato, alla scelta e alle variazioni temporali della temperatura esterna di riferimento T_0 , nei casi in cui il rapporto tra la temperatura dell'ambiente interno T_r e quella esterna T_0 sia vicino all'unità, ovvero in estate (sia a Milano che a Palermo) e in inverno nei contesti più miti (Palermo).

	Milano		Palermo	
	Heating	Cooling	Heating	Cooling
$T_{0,des}$ (°C)	-5	32	5	32
$COP_{stea,des}$	2.25	2.15	2.81	2.15
COP_{dyn}	2.71	2.82	3.17	2.89
Relative difference	17 %	24 %	11 %	26 %
$1 - T_{0,des}/T_{r,des}$	0.081	0.020	0.047	0.020
$\langle 1 - T_0(t)/T_r(t) \rangle$	0.059	0.007	0.033	0.006
Relative difference	-37 %	-202 %	-40 %	-256 %
$\Psi_{stea,des}$	0.18	0.04	0.13	0.04
Ψ_{dyn}	0.16	0.02	0.10	0.01
Relative difference	-16 %	-152 %	-31 %	-217 %

Tabella 1: confronto tra le valutazioni in regime stazionario sulla base delle temperature di progetto e le valutazioni in regime dinamico estese alle stagioni di *heating* e *cooling* per il sistema pompa di calore ad aria (ASHP)

Risultati simili, in termini di ordine di grandezza delle differenze tra le due efficienze exergetiche, si ottengono confrontando analisi stazionarie basate su temperature di riferimento medie mensili o medie stagionali ($\Psi_{stea,mean}$) con analisi dinamiche. Pertanto si conclude che non è semplice individuare un metodo di analisi stazionaria che sia, in generale, maggiormente in accordo con il metodo dinamico.

Tuttavia, come accennato sopra, è possibile prevedere in quali condizioni è più probabile ottenere discrepanze importanti tra metodi stazionari e dinamici.

Tema di ricerca 5.4.1.1/5.4.1.2 “Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto, in particolare nella stagione estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione. Interazione condizionamento e illuminazione”.

RAPPORTO FINALE DELLA RICERCA Settembre 2010

Il livello di analisi (b) ha lo scopo di studiare se la scelta di un metodo piuttosto che di un altro influenzi in maniera significativa la prestazione exergetica di un sistema, in termini non più assoluti bensì relativi, cioè quando il sistema è messo a confronto con altri sistemi. La Tabella 2 mostra, nei due contesti climatici e in due mesi rappresentativi dei periodi di riscaldamento (gennaio) e raffrescamento (luglio), l’efficienza exergetica della pompa di calore ad aria (ASHP) messa a confronto in inverno con una caldaia a condensazione (CB) ed in estate con un sistema di scambio diretto con il terreno (DGC). Il confronto è effettuato considerando l’intera catena energetica del processo di *heating* e *cooling*: le efficienze exergetiche mostrate in Tabella 2, a differenza di quelle riportate nella Tabella 1, comprendono per la ASHP e il DGC la perdita exergetica dovuta alla conversione di energia primaria in elettricità.

		Milano		Palermo	
		January	July	January	July
$\Psi_{\text{stea,des}}$	ASHP	0.075	0.018	0.054	0.018
	CB	0.079	-	0.051	-
	DGC	-	0.082	-	0.082
$\Psi_{\text{stea,mean}}$	ASHP	0.063	-	0.027	-
	CB	0.061	-	0.029	-
	DGC	-	-	-	-
Ψ_{dyn}	ASHP	0.066	0.007	0.042	0.006
	CB	0.062	-	0.033	-
	DGC	-	0.048	-	0.032

Tabella 2 Comparazione tra le efficienze exergetiche primarie dei sistemi di *heating* e *cooling* menzionati sulla base delle differenti metodologie proposte

Si nota quindi che, mentre la prestazione exergetica del DGC risulta migliore di quella della ASHP qualunque sia il metodo adottato per ricavarne l’efficienza exergetica (stazionario “di progetto” o dinamico), la prestazione exergetica del CB può risultare migliore o peggiore di quella della ASHP a seconda della metodologia di analisi. Ad esempio a Palermo l’efficienza exergetica del CB è maggiore secondo l’approccio stazionario “di progetto”, ma minore secondo l’approccio stazionario “medio” e secondo quello dinamico. A partire da questi esempi si può pertanto concludere che la scelta del metodo di analisi exergetica può influenzare il confronto fra sistemi alternativi, qualora questi abbiano prestazioni simili.

Tema di ricerca 5.4.1.1/5.4.1.2 “Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto, in particolare nella stagione estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione. Interazione condizionamento e illuminazione”.

RAPPORTO FINALE DELLA RICERCA Settembre 2010

Riferimenti e prodotti:

1. Angelotti, A., Caputo P. (2007) , The exergy approach for the evaluation of heating and cooling technologies; first results comparing steady-state and dynamic simulations, in: Proceedings of the 2nd PALENC and 28th AIVC Conference, vol. I, Crete Island, Greece, 59–64.
2. Angelotti, A., Caputo P. , Solaini G. (2009), Dynamic exergy analysis of an air source heat pump, in: Proceedings of ELCAS, Nisyros, Greece, in fase di revisione per un numero tematico della rivista International Journal of Exergy (vedere allegato).
3. A. Angelotti, P. Caputo, Steady versus dynamic exergy analysis of heating and cooling systems, in COSTeXergy Book Chapter 2 “Methodologies and Tools for Analysis”, in press.

3. Subtask B: Exergy efficient community supply systems

Le attività e i contributi del gruppo di lavoro, in parte confluiti in un articolo pubblicato su rivista internazionale [4] sono stati ulteriormente approfonditi. Come esito può essere citato il contributo al Capitolo 3 “Review on the use of exergy analysis for building systems” dell’ Annex 49 Midterm Report [5].

Inoltre, poiché le valutazioni exergetiche a scala di *community* risultano essere molto interessanti, ma ancor poco esplorate, i membri dell’ Annex 49 hanno proposto, in tale direzione, una nuova Azione COST sul tema, intitolata, appunto: *Analysis and Design of system-concepts for Low-EXergy in community supply structures*. Tale azione è stata suggerita per approfondire il tema della complessità pertinente la scala della *community* in relazione all’analisi exergetica. L’idea deriva direttamente dalla necessità, emersa alla fine dell’ Annex 49, di sviluppare ulteriormente e promuovere l’analisi exergetica dei sistemi di conversione energetica a scala di *community* al fine di migliorare l’efficienza energetica complessiva dell’ambiente costruito (vedere anche www.lowex.org). Tale proposta non è stata accettata in prima battuta, ma è di nuovo in corso di revisione per essere ripresentata a breve.

I contributi alla grande scala (quartiere/città) riguardano anche alcune valutazioni sui sistemi attuali di conversione dell’energia e su una loro potenziale evoluzione nella direzione del miglioramento delle efficienze energetica ed exergetica e di una maggiore integrazione delle fonti rinnovabili a discapito di quelle fossili. In tale ambito vengono espresse anche valutazioni sulle risorse e sulle tecnologie più promettenti a scala di *community*. Come contributo può essere segnalato, a tal proposito, il Guidebook finale dell’ Annex 49, al momento in fase di revisione, con particolare riferimento al Capitolo 4, OPTIMIZATION STRATEGIES, sezioni *4.2. General strategies for community systems* e *4.3. Case studies and examples*.

Sempre in relazione al subtask B, il gruppo di lavoro ha avuto modo di proseguire le analisi exergetiche in relazione al caso di studio della città di Parma. In particolare, a valle di una complessa fase di raccolte ed elaborazione di dati, è stato analizzato il sistema energetico attuale della città di Parma (domanda e fornitura di calore, elettricità – inclusi gli usi per condizionamento- e acqua calda sanitaria). Successivamente, dopo aver condotto un’analisi delle prospettive di sviluppo tecnologico attuale e del quadro amministrativo e normativo della città in tema di efficienza energetica, sono stati definiti alcuni scenari strategici per l’anno

Tema di ricerca 5.4.1.1/5.4.1.2 “Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto, in particolare nella stagione estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione. Interazione condizionamento e illuminazione”.

RAPPORTO FINALE DELLA RICERCA Settembre 2010

2020. Tali scenari fanno riferimento agli obiettivi della Direttiva Europea 20-20-20 il cui recepimento italiano implica per l’anno 2020 e in riferimento all’anno 2005:

- una riduzione del 13% delle emissioni di CO₂;
- un risparmio del 20% in termini di energia primaria;
- un contributo del 17% delle rinnovabili alla produzione energetica.

A tali obiettivi ne sono stati affiancati altri di cui 2 di carattere exergetico, ovvero:

- un incremento del 10% dell’efficienza energetica;
- un incremento del 5% dell’efficienza energetica;
- una riduzione del 20% del consumo di exergia primaria.

La tabella 3 mostra lo stato di riferimento del sistema energetico di Parma (anno 2007), definito come Scenario_0. E’ possibile notare la grande differenza tra l’efficienza energetica complessiva (63%) e quella exergetica, ben più modesta (25%). Inoltre l’obiettivo al 2020 del 17% di copertura da parte delle rinnovabili, declinato alla scala urbana in esame, appare ancora lontano.

Scenario_0	Primary energy [MWh]	REs	Overall energy efficiency	CO ₂ .eq,	Spent exergy [MWh]	Delivered exergy [MWh]	Overall exergy efficiency
Heating	1514179	0 %	88%	267395	1514179	127114	8,4%
Cooling	57940	14%	138%	15556	57940	1340	2,3%
Electricity	1871891	8%	40%	495122	1871891	749353	40%
Total	3444010	7,8%	63%	778036	3444010	861161	25,3%

Tabella 3: Indicatori energetici ed exergetici relativi allo scenario base al 2007 di Parma.

Gli scenari ipotizzati al 2020 si basano sulle ipotesi di riduzione del 20% della domanda di riscaldamento e di stabilità delle domande di climatizzazione estiva ed elettrica. Lo Scenario 1 recepisce il piano strategico dell’azienda energetica della città di Parma, prevedendo la sostituzione dell’attuale sistema di cogenerazione a gas con un sistema cogenerativo alimentato a rifiuti solidi urbani. Lo Scenario 2, partendo dallo Scenario 1, prevede di coprire una frazione della domanda di acqua calda sanitaria attraverso il solare termico, mentre lo Scenario 3 si basa sul mix di cogeneratori a gas a scala di quartiere, solare termico per acqua calda sanitaria, solare fotovoltaico e pompe di calore a terreno per riscaldamento e raffrescamento. La ripartizione tra i diversi sistemi della domanda di riscaldamento nello scenario di riferimento e nei 3 scenari al 2020 è riassunta nella Figura 1.

Tema di ricerca 5.4.1.1/5.4.1.2 “Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto, in particolare nella stagione estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione. Interazione condizionamento e illuminazione”.

RAPPORTO FINALE DELLA RICERCA Settembre 2010

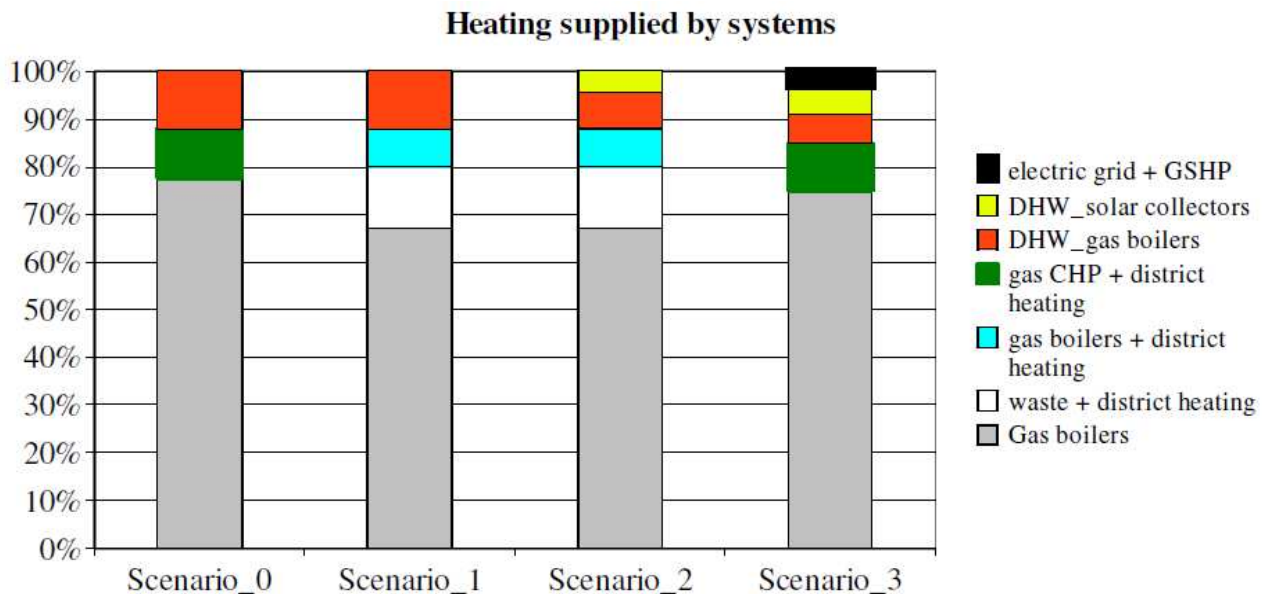


Figura 1: Frazione di domanda di riscaldamento coperta dai diversi sistemi nello scenario base e nei tre scenari al 2020.

Il confronto tra i 3 scenari dal punto di vista degli obiettivi previsti dalla Direttiva 20-20-20 e degli obiettivi aggiuntivi proposti è rappresentato graficamente in Figura 2, osservando la quale si evince che:

- lo Scenario 1 soddisfa gli obiettivi di risparmio energetico e di riduzione delle emissioni di CO₂, ma non quello relativo alla % minima di contributo da parte delle fonti rinnovabili (15,5% invece che 17%);
- lo Scenario 2 soddisfa tutti e tre gli obiettivi della 20-20-20 ma non gli obiettivi aggiuntivi relativi all'incremento di efficienza energetica (7% anziché 10%) e di efficienza exergetica (3% anziché 5%)
- lo Scenario 3 soddisfa gli obiettivi della 20-20-20 ed è l'unico a raggiungere l'incremento del 10% di efficienza energetica, ma non soddisfa i due obiettivi relativi all'exergia.

Tema di ricerca 5.4.1.1/5.4.1.2 “Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto, in particolare nella stagione estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione. Interazione condizionamento e illuminazione”.

RAPPORTO FINALE DELLA RICERCA Settembre 2010

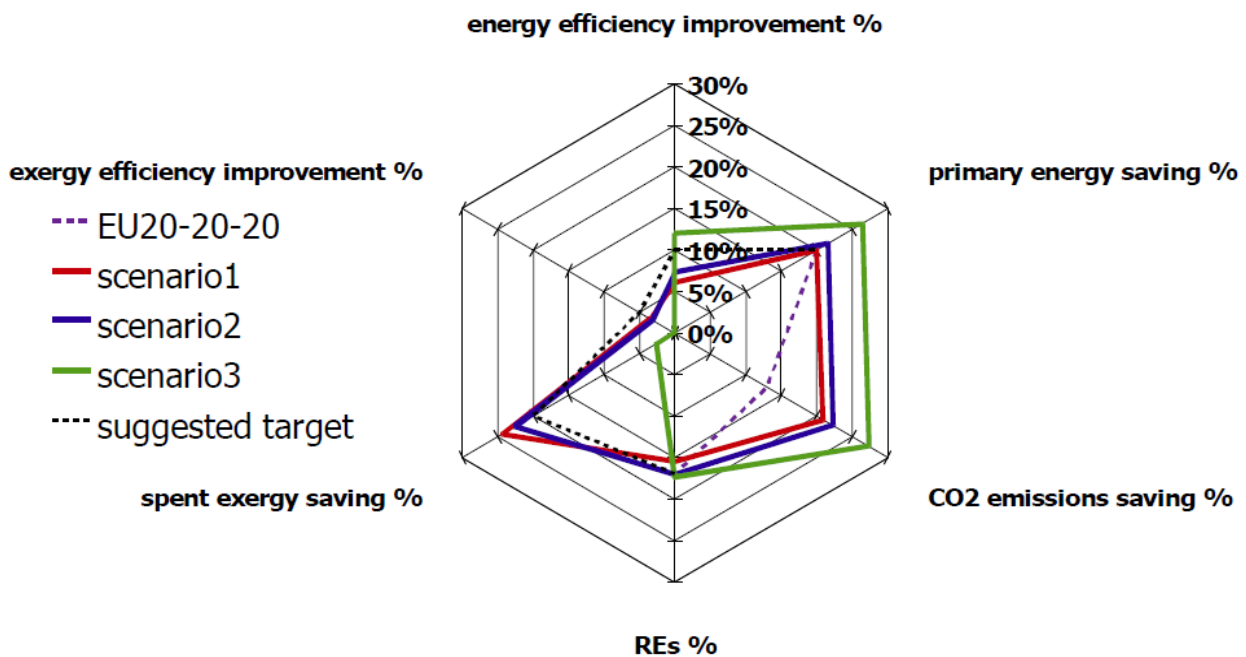


Figura 2: Valutazione degli indicatori relativi ai 3 scenari citati in rapporto all’applicazione degli obiettivi EU 20-20-20 e all’integrazione degli altri 3 obiettivi descritti.

In sintesi quindi il caso studio mostra che:

- tra gli obiettivi della 20-20-20 targets, quello relativo alla frazione di rinnovabili è probabilmente il più critico per l’Italia;
- tra gli obiettivi aggiuntivi ipotizzati per questo studio, l’aumento sia dell’efficienza energetica che di quella exergetica non sono facilmente raggiungibili; il ricorso all’energia solare, in mancanza di altre vocazioni rinnovabili specifiche del territorio, rappresenta senz’altro uno strumento fondamentale per raggiungere l’obiettivo relativo alle rinnovabili, ma d’altro canto porta più lontano dal raggiungimento degli obiettivi di carattere exergetico;
- nel caso di Parma, la strategia più efficace consiste in un attento bilanciamento tra termovalorizzazione dei rifiuti, energia solare e utilizzo di impianti di geoscambio.

La ricerca è confluita in una memoria presentata al Convegno Internazionale CLIMA 2010 [6], cui seguirà la presentazione “*Energy transition in Parma City*” nell’ambito della conferenza *The Future for Sustainable Built Environments with High Performance Energy Systems* che si terrà a Monaco (Germania) dal 19 al 21 ottobre 2010. Il caso di Parma verrà anche riportato nel Guidebook finale dell’Annex 49, al momento in fase di revisione, nell’ambito del Capitolo 7, *Innovative Community Case Studies*.

Tema di ricerca 5.4.1.1/5.4.1.2 “Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto, in particolare nella stagione estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione. Interazione condizionamento e illuminazione”.

RAPPORTO FINALE DELLA RICERCA Settembre 2010

Riferimenti e prodotti:

4. Torío H., Angelotti A., Schmidt D., *Exergy analysis of renewable energy-based climatisation systems for buildings: A critical view*. Energy and Buildings 41 (2009) pp. 248-271.
5. Angelotti A., Schmidt D., Meggers F., Villi G., Torio H., Church K., Molinari M., Caputo P., Simon T., Liu X., Jiang Y., Annex 49 Midterm Report, Fraunhofer-IRB Publications (2009), vedere file allegato.
6. Angelotti A., Caputo P., Costa G., *Potential improvements of energy systems; evaluation of the energy and exergy performances of an Italian neighborhood*, in Proc. CLIMA2010, Antalya, Turkey (2010), vedere file allegato.

4. Subtask D

Il gruppo di ricerca è anche coinvolto nelle attività di *dissemination* facenti capo alla *subtask D*.

Tali attività includono la partecipazione a incontri e conferenze quali:

- la conferenza Annex 49 – CosteXergy tenutasi a Heerlen (Olanda) il 21 aprile 2009 e proseguita con l’Expert Meeting dei due giorni successivi, sempre a Heerlen
- l’Expert Meeting tenutosi a Helsinki (Finlandia) tra il 2 e il 4 settembre 2009
- le conferenze internazionali ELCAS e CLIMA 2010 già citate.

È inoltre prevista una partecipazione alla prossima conferenza *The Future for Sustainable Built Environments with High Performance Energy Systems* che si terrà a Monaco (Germania) dal 19 al 21 ottobre 2010 e in seno alla quale verrà presentato il contributo “*Energy transition in Parma City*”. Tale contributo costituisce un approfondimento del lavoro presentato a CLIMA 2010, precedentemente citato.

A scopo di riferimento complessivo, può essere citato l’elenco di tutti i contributi pubblicati nell’ambito dell’annex 49:

anno 2007

Angelotti, P. Caputo, *Energy and Exergy Analysis of Heating and Cooling Systems in the Italian Context*, Proceedings of CLIMAMED 2007, Genova 5-7 Sept. 2007, pag. 843-854.

Tema di ricerca 5.4.1.1/5.4.1.2 “Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto, in particolare nella stagione estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione. Interazione condizionamento e illuminazione”.

RAPPORTO FINALE DELLA RICERCA Settembre 2010

Angelotti A., Caputo P., *The exergy approach for the evaluation of heating and cooling technologies; first results comparing steady state and dynamic simulations*, Proceedings of Palenc 2007, Heraklion, 26-30 Sept. 2007, Crete, pag. 59-64.

Church K., Caputo P., *EXERGY AS A TOOL FOR EVALUATING ENERGY SUPPLIES ON COMMUNITY LEVEL*, Annex 49, newsletter n°2 (settembre 2007).

anno 2008

Butera F., Caputo P., *Towards sustainable cities, the built environment energy plan of Huai Rou New Town*, Eurosolar 2008 – Sun and Sense, Berlino.

Butera F., Caputo P., *Planning eco-cities, the case of Huai Rou New Town*, Solar Cities 2008, Adelaide.

Caputo P., *CASE STUDIES ON LOW-EX COMMUNITIES*; Community Case I: Parma City, Italy, Annex 49, newsletter n°4 (settembre 2008).

Anno 2009

Torío H., Angelotti A., Schmidt D., *Exergy analysis of renewable energy-based climatisation systems for buildings: A critical view*. Energy and Buildings 41 (2009) pp. 248-271.

Angelotti A., Schmidt D., Meggers F., Villi G., Torio H., Church K., Molinari M., Caputo P., Simon T., Liu X., Jiang Y., Annex 49 Midterm Report, Fraunhofer-IRB Publications (2009), con particolare riferimento ai capitoli 1, 2, 3, 5 e 6, vedere file allegato.

Angelotti, A., Caputo P., Solaini G., *Dynamic exergy analysis of an air source heat pump*, in: Proceedings of ELCAS, Nisyros, Greece, 2009, **in fase di revisione per un numero tematico della rivista International Journal of Exergy.**

Contributi alla Guidebook finale dell'Annex 49 (2009), in fase di revisione finale, con particolare riferimento a:

- Capitolo 2, *METHOD AND MODELS FOR EXERGY ANALYSIS*, per il quale Angelotti A. ha avuto il ruolo di reviewer
- Capitolo 4, *OPTIMIZATION STRATEGIES*, per il quale Caputo P. ha fornito dei contributi relativi alle sezioni 4.2. *General strategies for community systems* e 4.3. *Case studies and examples*
- Capitolo 7, *Innovative Community Case Studie*, per il quale Caputo P. ha fornito dei contributi relativi alla sezione 7.5. (caso studio di Parma (IT)).

anno 2010

Angelotti A., Caputo P., Costa G., *Potential improvements of energy systems; evaluation of the energy and exergy performances of an Italian neighborhood*, in Proc. CLIMA2010, Antalya, Turkey (2010).

Angelotti A., Caputo P., *Steady versus dynamic exergy analysis of heating and cooling systems*, in COSTeXergy Book Chapter 2 “Methodologies and Tools for Analisis”, in fase di revisione.