

**ENEA**

Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



*Ministero dello Sviluppo Economico*

**RICERCA SISTEMA ELETTRICO**

---

## **Creazione di un database di sistemi di microcogenerazione**

**M. Sasso, C. Roselli, G. Angrisani, M. Citterio**





Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Creazione di un database di sistemi di microgenerazione

*M. Sasso, C. Roselli, G. Angrisani, M. Citterio*

## CREAZIONE DI UN DATABASE DI SISTEMI DI MICROCOGENERAZIONE

M. Sasso, C. Roselli, G. Angrisani (Università del Sannio, Benevento)

M. Citterio (ENEA)

Marzo 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Usi finali

Tema: Sviluppo di linee guide e indici di riferimento per il legislatore

Responsabile Tema: Gaetano Fasano, ENEA

Questo documento presenta il manuale di utilizzo del SW, a supporto del progettista o del tecnico della PA, per la classificazione di sistemi per la generazione distribuita alla quale ha contribuito il Dipartimento di Ingegneria dell'Università del Sannio

Il contenuto di questa guida fa riferimento a Microsoft® Office Access 2003.

Si definisce sistema di cogenerazione un sistema che consente, a partire da un'unica fonte di energia primaria, la conversione di quest'ultima in due forme di energia utilizzabili: energia elettrica e/o meccanica ed energia termica.

E' noto dal secondo principio della termodinamica che non è possibile convertire integralmente in energia elettrica e/o meccanica l'energia termica disponibile da una sorgente a temperatura elevata: l'aliquota non convertita deve essere necessariamente ceduta ad una sorgente a temperatura inferiore. Attraverso la cogenerazione si cerca di utilizzare quest'aliquota di energia termica che andrebbe altrimenti ceduta all'ambiente esterno e quindi irrimediabilmente persa.

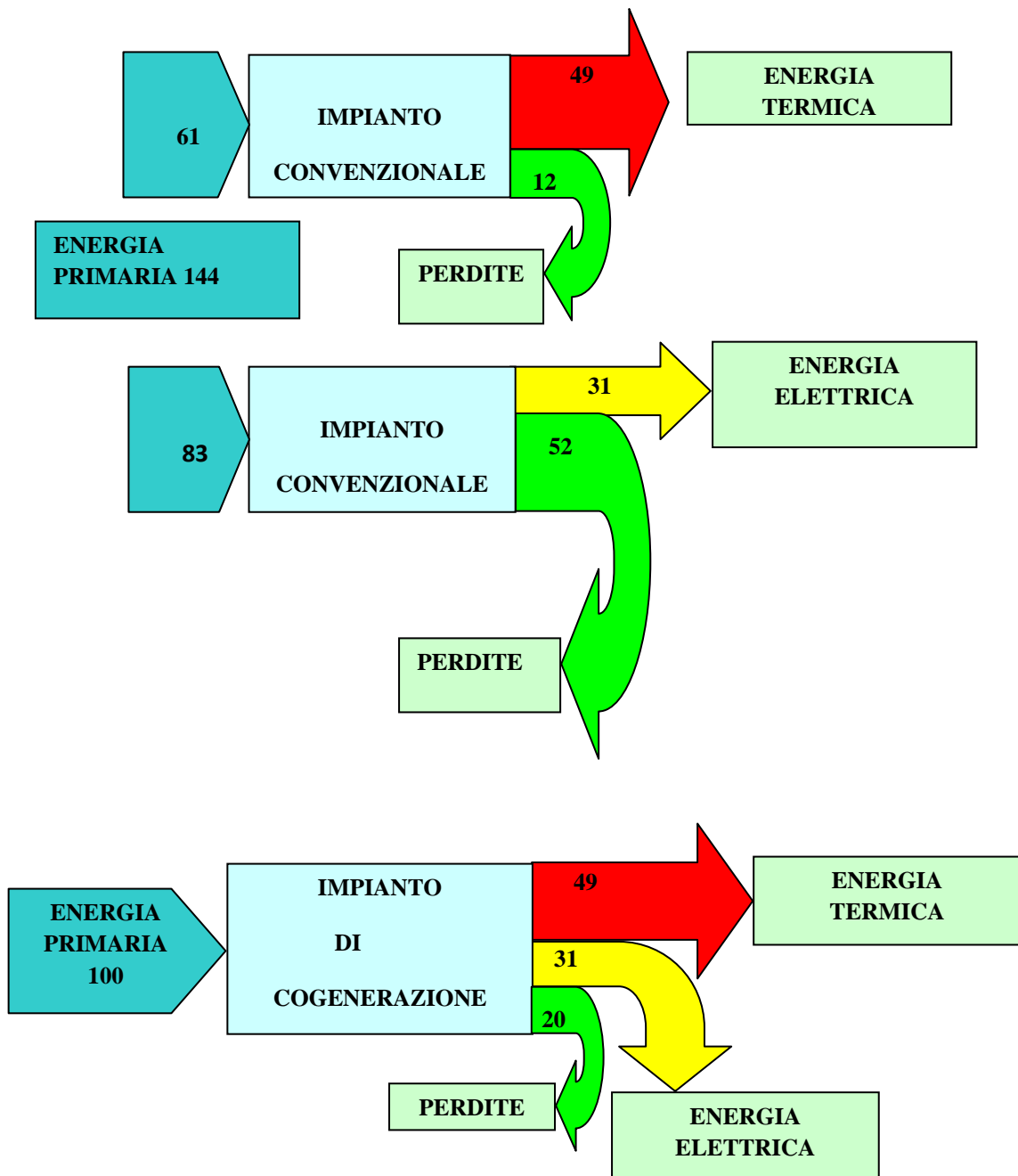
Un impianto convenzionale di produzione di energia elettrica ha un'efficienza di circa il 39%, mentre il restante 61% viene disperso sotto forma di calore che, normalmente, non viene utilizzato. Con un sistema cogenerativo il calore prodotto dalla combustione non viene disperso, ma recuperato per altri usi (Figura 1), permettendo di raggiungere efficienze globali molto elevate ed un notevole risparmio di energia primaria.

La Figura 1 evidenzia visivamente i vantaggi che derivano dall'utilizzo di un sistema di produzione combinata rispetto ad un sistema "tradizionale", in cui le energie, elettrica e termica, sono rese all'utenza separatamente.

I benefici conseguibili utilizzando sistemi cogenerativi sono rilevanti non solo dal punto di vista energetico, ma anche dal punto di vista dell'impatto ambientale.

La cogenerazione rappresenta, infatti, una delle più significative misure da poter attuare al fine di ottenere una tangibile riduzione delle emissioni di gas nocivi ed inquinanti (nell'attesa che nasca l'"era dell'idrogeno", e in mancanza di un largo utilizzo delle fonti rinnovabili); infatti, come appare in Figura 2, se si effettua un confronto tra le diverse tecnologie disponibili nel settore energetico, la produzione combinata è capace di garantire livelli emissivi di CO<sub>2</sub> molto più contenuti.

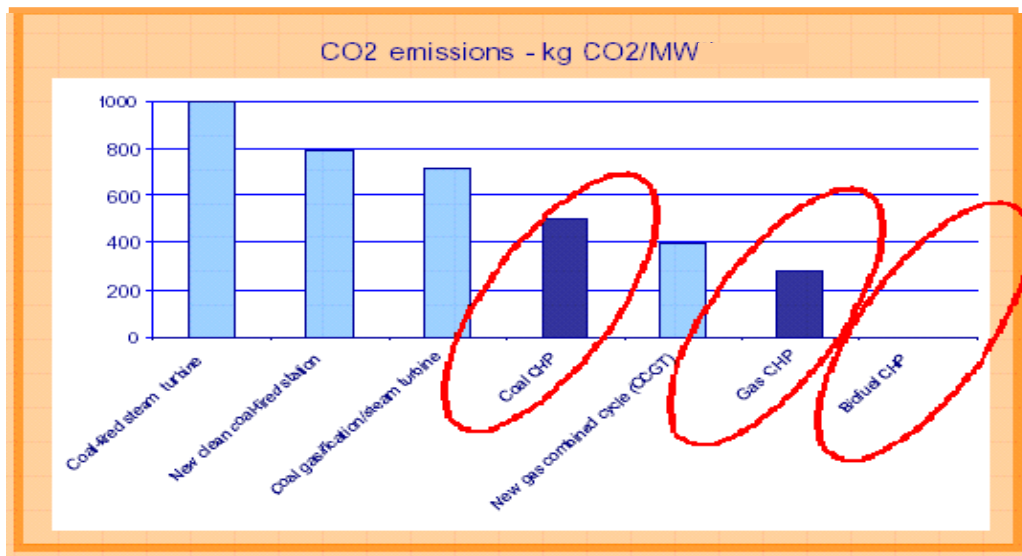
Onde poter soddisfare i target fissati dal protocollo di Kyoto, ratificato nel 1997 (riduzione per l'Europa delle emissioni di gas serra dell'8% rispetto ai valori registrati nel 1990 relativamente al periodo di adempimento 2008-2012), l'Unione Europea ha stabilito che, a partire dal 2010, almeno il 18% della produzione totale di energia elettrica dovrà essere ottenuta mediante sistemi cogenerativi, ciò rappresenta un grande passo in avanti se si pensa che nel 1994 tale parametro era fissato solo al 9% .



**Fig. 1:** confronto sistema cogenerativo- sistema tradizionale

In alcuni casi le potenze elettriche fornite da tali sistemi sono abbastanza contenute e tali da ricadere in quell'intervallo di potenze che soddisfano le richieste dell'utenza domestica o piccola commerciale.

A tali sistemi si è soliti dare il nome di sistemi di microgenerazione (MCHP, Micro Combined Heat and Power) intendendo che la potenza elettrica fornita non superi i 15 kW, destinati ad utenze di tipo residenziale e del piccolo terziario.

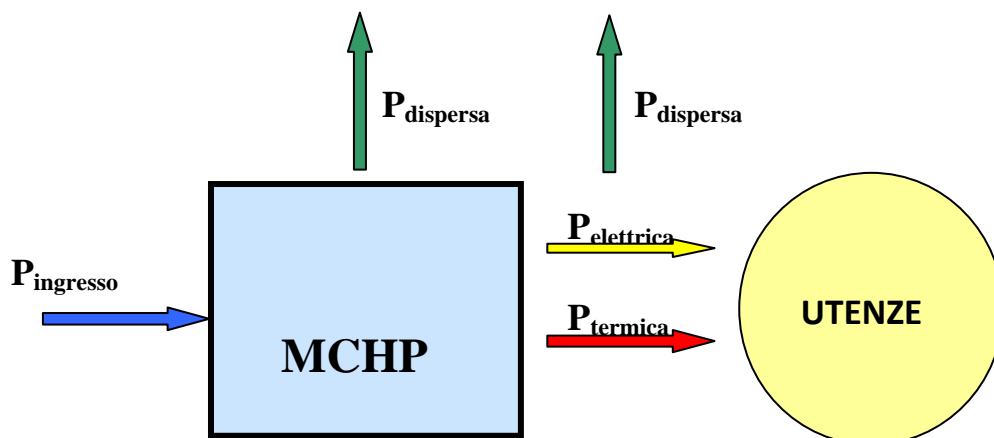


**Fig. 2:** comparazione emissioni nocive per diverse tecnologie

La caratterizzazione energetica di un impianto di cogenerazione in generale, e in particolare di un impianto di microcogenerazione, è effettuata attraverso l'analisi di alcuni parametri atti a misurare le prestazioni del sistema considerato sia in termini assoluti che relativi.

Il primo passo da fare è quello di considerare un opportuno volume di controllo con riferimento al quale effettuare il calcolo delle grandezze necessarie a caratterizzare l'impianto.

Nel caso di un MCHP come volume di controllo si considera quello che racchiude il gruppo motore/alternatore e lo scambiatore di calore nell'ipotesi di considerare il sistema in condizioni stazionarie e di monodimensionalità. Nella figura seguente è rappresentato uno schema relativo alle principali grandezze che caratterizzano un MCHP (Figura 3).



**Fig. 3:** bilancio energetico sul volume di controllo motore+alternatore+scambiatore di calore

Andando ad eseguire un bilancio energetico del microgeneratore si ottiene la seguente espressione che rappresenta la prima legge della Termodinamica relativamente al sistema in questione:

$$P_{\text{ingresso}} = P_{\text{elettrica}} + P_{\text{termica}} + P_{\text{dispersa}}$$

dove:

$$P_{\text{ingresso}} = \dot{V}_{\text{gas}} * P.C.I._{\text{gas}} * 3600$$

dove:

- $\dot{V}_{\text{gas}}$  è la portata di combustibile misurata nelle diverse condizioni di carico ed espressa in  $\text{Nm}^3/\text{s}$ ;
- $P.C.I._{\text{gas}}$  è il potere calorifico inferiore del gas pari a 9,59 espresso in  $\text{kWh}/\text{Nm}^3$ ;
- 3600 è il fattore di conversione da kJ a kWh.

$$P_{\text{termica}} = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} * C_{p,\text{H}_2\text{O}} * (T_{\text{H}_2\text{O,calda}} - T_{\text{H}_2\text{O,fredda}}) =$$

$$= \dot{V}_{\text{H}_2\text{O}} * r_{\text{H}_2\text{O}} * C_{p,\text{H}_2\text{O}} * (T_{\text{H}_2\text{O,calda}} - T_{\text{H}_2\text{O,fredda}})$$

dove:

- $\dot{V}_{\text{H}_2\text{O}}$  è la portata volumetrica dell'acqua che funge da fluido termovettore espressa in  $\text{m}^3/\text{s}$ ;
- $r_{\text{H}_2\text{O}}$  e  $C_{p,\text{H}_2\text{O}}$  sono la densità e il calore specifico dell'acqua assunti pari a  $998,2 \text{ kg}/\text{m}^3$  e  $4,187 \text{ kJ}/\text{kgK}$  rispettivamente;
- $T_{\text{H}_2\text{O,calda}} - T_{\text{H}_2\text{O,fredda}}$  è il salto termico dell'acqua di raffreddamento.

La  $P_{\text{elettrica}}$  è quella che eroga l'alternatore ed è pari quindi al carico elettrico che è reso disponibile all'utenza. L'unità di misura di questa grandezza è il kW.

Infine l'ultimo termine presente nell'equazione di bilancio dell'energia è la  $P_{\text{dispersa}}$  che tiene conto delle seguenti perdite:

- espulsione dei gas di scarico dall'impianto che comporta una perdita energetica che dipende dalla temperatura e dalla portata degli stessi;
- perdite attraverso l'involucro per convezione e irraggiamento;
- perdite per incombusti;
- perdite per l'azionamento di organi ausiliari.

Attraverso l'espressione della prima legge della Termodinamica è già possibile evidenziare i termini più importanti ai fini della microgenerazione e che risultano essere la  $P_{\text{termica}}$  e la  $P_{\text{elettrica}}$  che rappresentano le potenze messe a disposizione dell'utenza per il soddisfacimento della sua domanda di carico.

Le grandezze appena considerate sono di tipo assoluto e non permettono di poter fare un confronto con altri sistemi di microgenerazione o con sistemi tradizionali che siano di tipo diverso o che funzionino in condizioni differenti. Per questo motivo, s'introducono delle grandezze di tipo relativo che permettono di ottenere dei parametri prestazionali basati sulla I Legge della Termodinamica, molto più utili per la caratterizzazione dell' impianto.

Come primo parametro si considera il rendimento elettrico dato da:

$$\eta_{el} = \frac{P_{elettrica}}{P_{primaria,gas}} \quad [-]$$

dov'è utile osservare che  $\eta_{el} = \eta_m * \eta_g$  in cui  $\eta_m$  e  $\eta_g$  rappresentano il rendimento meccanico del motore e quello del generatore, rispettivamente, per cui analizzare il rendimento elettrico dell'impianto significa analizzare in pratica questi due valori.

Altro parametro di fondamentale importanza è certamente il rendimento termico definito come:

$$\eta_{th} = \frac{P_{termica}}{P_{primaria,gas}} \quad [-].$$

Infine attraverso una combinazione del rendimento elettrico e di quello termico o, che è lo stesso, attraverso la valutazione dell'energia utile messa a disposizione dell'utenza, rapportata a quella immessa, è possibile definire il coefficiente di utilizzazione del combustibile (C.U.C.) attraverso cui è possibile conoscere le prestazioni in termini globali del sistema e dato da:

$$C.U.C. = \frac{P_{elettrica} + P_{termica}}{P_{primaria,gas}} = \eta_{el} + \eta_{th} \quad [-].$$

Il presente database contiene 78 modelli di microgeneratore. Si tratta, per la maggior parte, di unità effettivamente in commercio e che offrono un'ampia panoramica delle tecnologie e dei modelli presenti sul mercato nel 2008. Sono inoltre presenti alcuni prototipi, sviluppati e testati da istituzioni accademiche o centri di ricerca, di notevole interesse e relativamente ai quali cospicua è la letteratura scientifica disponibile.

Ciascun modello è corredato da un notevole numero di informazioni, tra le quali alcune sono state già precedentemente esplicitate, come potenza elettrica e termica erogata, rendimento elettrico e termico, CUC.

Ciascun modello è stato poi caratterizzato con numerose altre informazioni, laddove è stato possibile reperirle, come ad esempio dimensioni geometriche (profondità, altezza e larghezza, tutte espresse in mm), peso [kg], tipo, produttore e modello del motore, combustibile, tipo di raffreddamento, cilindrata e numero di cilindri (tale informazione ha senso solo per i modelli basati su motore alternativo a combustione interna e motore Stirling), rumorosità [dBA], tipo di generatore, tipo di funzionamento e costo [€].



Una sezione denominata “Note” è stata utilizzata per riportare altre informazioni d’interesse, non immediatamente riconducibili alle categorie precedentemente indicate.

Sono poi presenti due ulteriori sezioni di notevole interesse: la prima riporta informazioni come sito internet e indirizzo di posta elettronica della casa costruttrice, o altri di particolare interesse, manuali, brochure ecc., tutte direttamente consultabili dall’interfaccia di visualizzazione del singolo modello. La seconda sezione è invece dedicata esclusivamente alla letteratura scientifica relativa a ciascun modello di microgeneratore contenuto nel database, riportando dunque informazioni quali il titolo della pubblicazione, gli autori, l’anno e così via. Laddove possibile è stato riportato anche il testo completo della pubblicazione; in alternativa ne è comunque disponibile un abstract tramite il quale si può agevolmente reperire il testo integrale della pubblicazione d’interesse.

Il database consente di procedere in vario modo alla visualizzazione dei modelli di MCHP contenuti all’interno del database, in modo da soddisfare le più svariate richieste degli utenti.

In primo luogo è possibile utilizzare il “Pannello comandi” nella sezione “Maschere”. Cliccando su di esso, si apre la schermata principale che permette di visualizzare l’elenco completo dei modelli contenuti nel database, cliccando sul pulsante corrispondente, oppure di visualizzare solo quei modelli che rispondono a determinati criteri di ricerca (Figura 4).



**Fig. 4:** il pannello dei comandi

In particolare sono stati impostati cinque criteri di ricerca predefiniti:

- Tipologia di motore primo
- Combustibile
- Intervalli di potenza elettrica
- Tipologia di raffreddamento del motore
- Range di costo

Se, ad esempio, si clicca sul pulsante relativo alla scelta della tipologia di motore primo, si apre una schermata secondaria in cui sono elencate le tipologie di motore primo tra le quali è possibile selezionare (Figura 5).



**Fig. 5:** maschera di scelta della tipologia di motore primo

In questo caso compariranno le seguenti alternative:

- Motore alternativo a combustione interna
- Motore Stirling
- Fuel cell
- Ciclo Rankine

Cliccando sul pulsante corrispondente alla tipologia di motore primo che interessa, comparirà una maschera che contiene tutti i modelli che soddisfano tale requisito, con tutte le relative informazioni contenute nel database.

Nella schermata secondaria è poi presente un pulsante “Indietro” che consente di ritornare alla schermata principale.


Analogamente è possibile procedere con gli altri quattro criteri di ricerca.


In alternativa è possibile realizzare una ricerca personalizzata, sulla base dei vari parametri che caratterizzano le macchine contenute nel database, utilizzando i filtri.

A tal scopo si apra in primo luogo la maschera “elenco completo” nella sezione Maschere.

Esistono tre metodi per filtrare i record in una maschera: filtro in base a selezione, filtro in base a maschera e filtro per <definizione>.

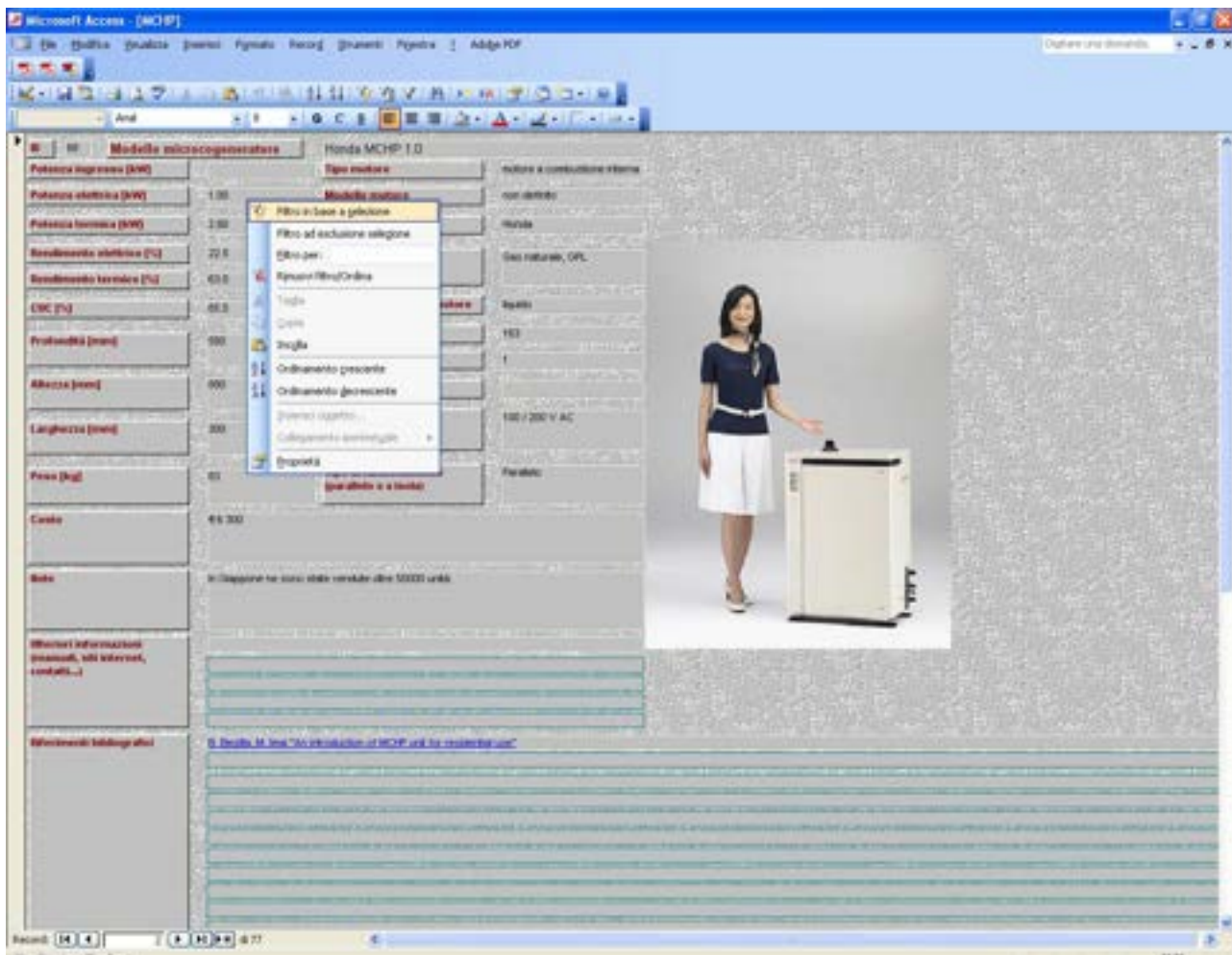
Utilizzando il filtro in base a selezione, si filtrano i modelli di microgeneratore selezionando, all'interno della maschera, opportuni valori rispondenti ai criteri di filtraggio.

Se, ad esempio, si vuole visualizzare una maschera contenente tutti i modelli di microgeneratore che hanno una potenza elettrica di 1 kW, si procede nel seguente modo: in primo luogo, sfogliando tra le maschere relative ai vari modelli con i pulsanti posti in basso a sinistra, è necessario trovare un modello che eroga la potenza elettrica desiderata (1 kW in questo caso) e ci si posiziona con il puntatore sulla relativa casella. A questo punto si clicca con il pulsante destro del mouse e, dal menù che in tal modo si apre, si seleziona "Filtro in base a selezione" (Figura 6). In alternativa, dopo essersi posizionati sulla casella di interesse, si clicca sul pulsante "Filtro in base a selezione" , presente nella barra degli strumenti.


Per tornare alla maschera di partenza, contenente tutti i modelli di microgeneratore, si clicca con il pulsante sinistro del mouse sul pulsante "Applica/rimuovi filtro"  nella barra degli strumenti. Analogamente è possibile procedere per realizzare un filtro in base a selezione con tutti gli altri parametri che compaiono nella maschera di visualizzazione.

Se nella schermata riportata nell'immagine precedente si applica il filtro in base a selezione, così come precedentemente descritto, nella casella combustibile (in cui, si noti, è contenuta la dicitura "Gas naturale, GPL"), si genera una maschera contenente tutti i modelli di microgeneratore alimentabili sia a gas naturale che a GPL. Se, invece, si vuole, ad esempio, visualizzare i modelli alimentabili a GPL indipendentemente dal gas naturale, o viceversa, è necessario procedere diversamente.

Con il pulsante sinistro del mouse si evidenzia la scritta "GPL", e solo a questo punto si clicca con il pulsante destro e si seleziona "Filtro in base a selezione" (Figura 7).

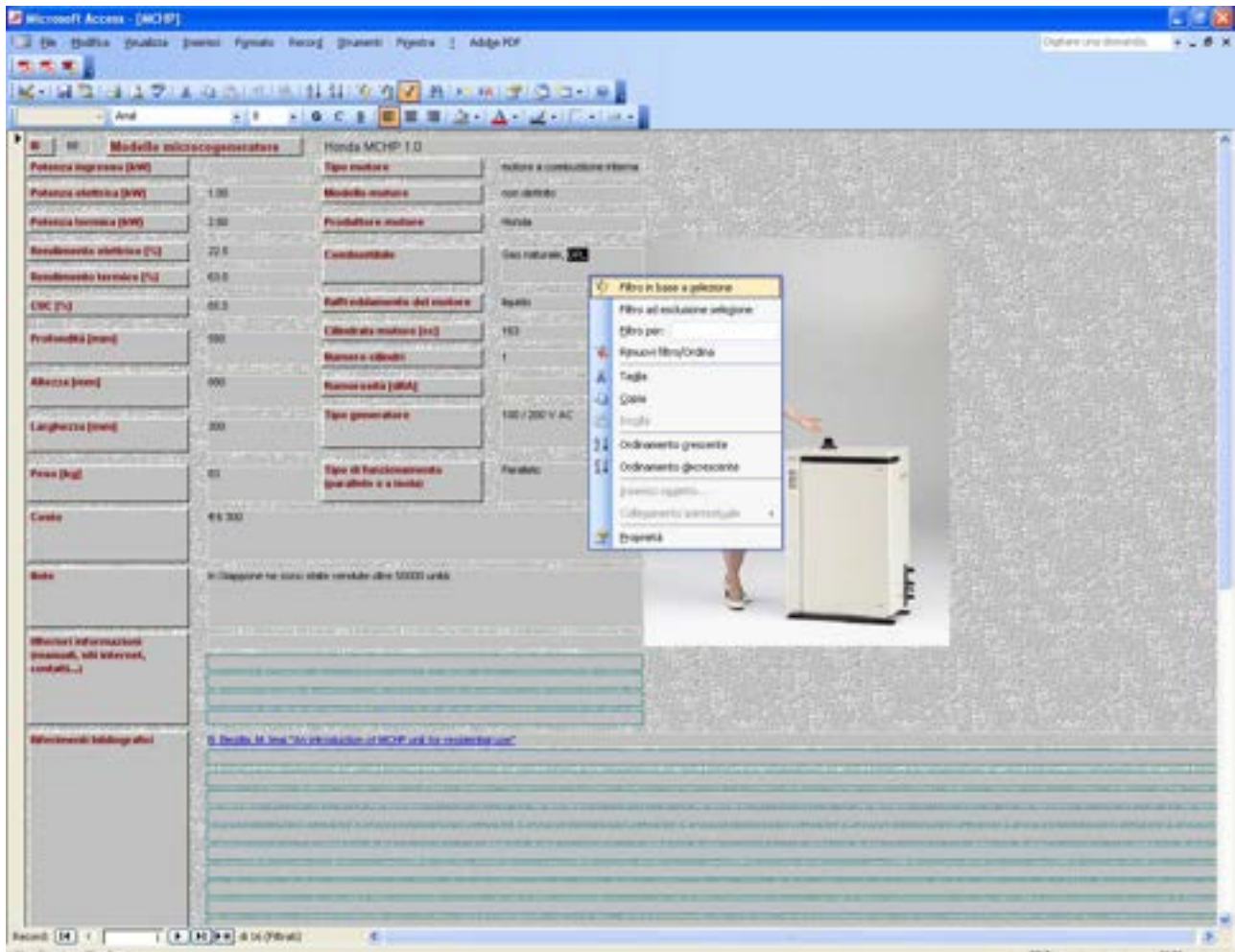


**Fig. 6:** esecuzione di un filtro in base a selezione

In secondo luogo è possibile utilizzare il filtro in base a maschera. A tal scopo si clicca sul pulsante “Filtro in base a maschera” , nella barra degli strumenti. A questo punto, a fianco alla casella di testo relativa a ciascun parametro presente nella maschera, comparirà un menù a tendina; tramite uno o più di questi è possibile specificare i criteri che i modelli devono soddisfare per essere inclusi nel set di modelli filtrati (Figura 8).

È anche possibile specificare più criteri per uno stesso parametro, avvalendosi della sottomaschera “Oppure”.

Dopo aver specificato i criteri su cui si basa il filtro, per visualizzarne i risultati è necessario di seguito cliccare sul pulsante “Applica/rimuovi filtro”, già precedentemente indicato.

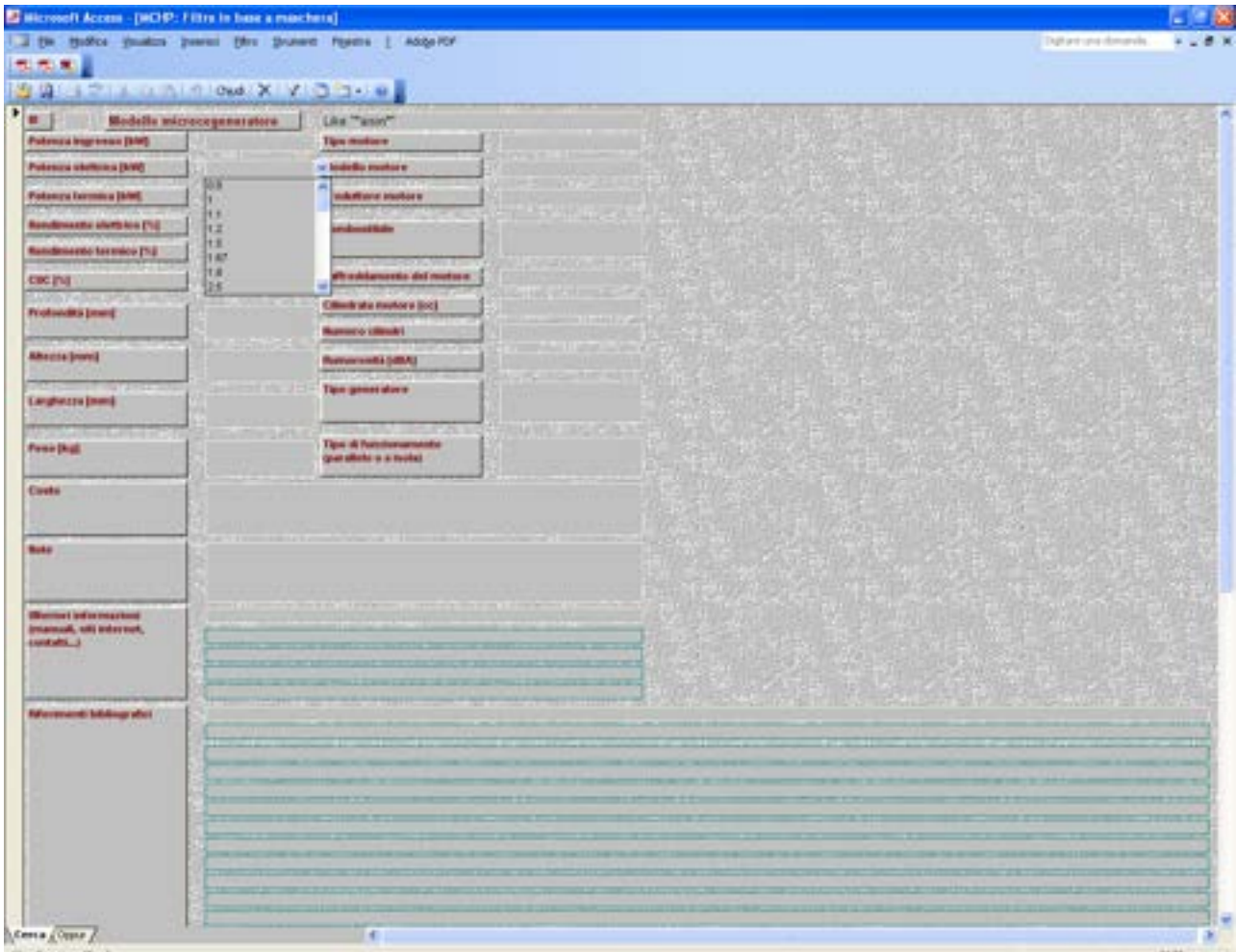


**Fig. 7:** procedura alternativa per il filtro in base a selezione

In terzo luogo è possibile utilizzare il filtro per definizione. A tal scopo si clicca con il pulsante destro del mouse nella casella di testo corrispondente al parametro della maschera che si desidera utilizzare come criterio per il filtro e quindi si digita il valore nella casella “Filtro per” del menù di scelta rapida. Se, ad esempio, si vuole visualizzare tutti i modelli di microgeneratore che hanno una potenza elettrica maggiore o uguale di 2 kW, si clicca con il pulsante destro del mouse nella casella di testo relativa al parametro “Potenza elettrica” e nel campo “Filtro per” si digita l’espressione “>=2” (Figura 9).

Se si vuole limitare la scelta ai modelli con potenza elettrica non superiore a 5 kW, si digiterà l’espressione “>=2 and <=5”. Dunque, oltre ai classici operatori matematici relazionali, è possibile avvalersi degli operatori booleani AND e OR nella formulazione delle espressioni relative al filtro per definizione.





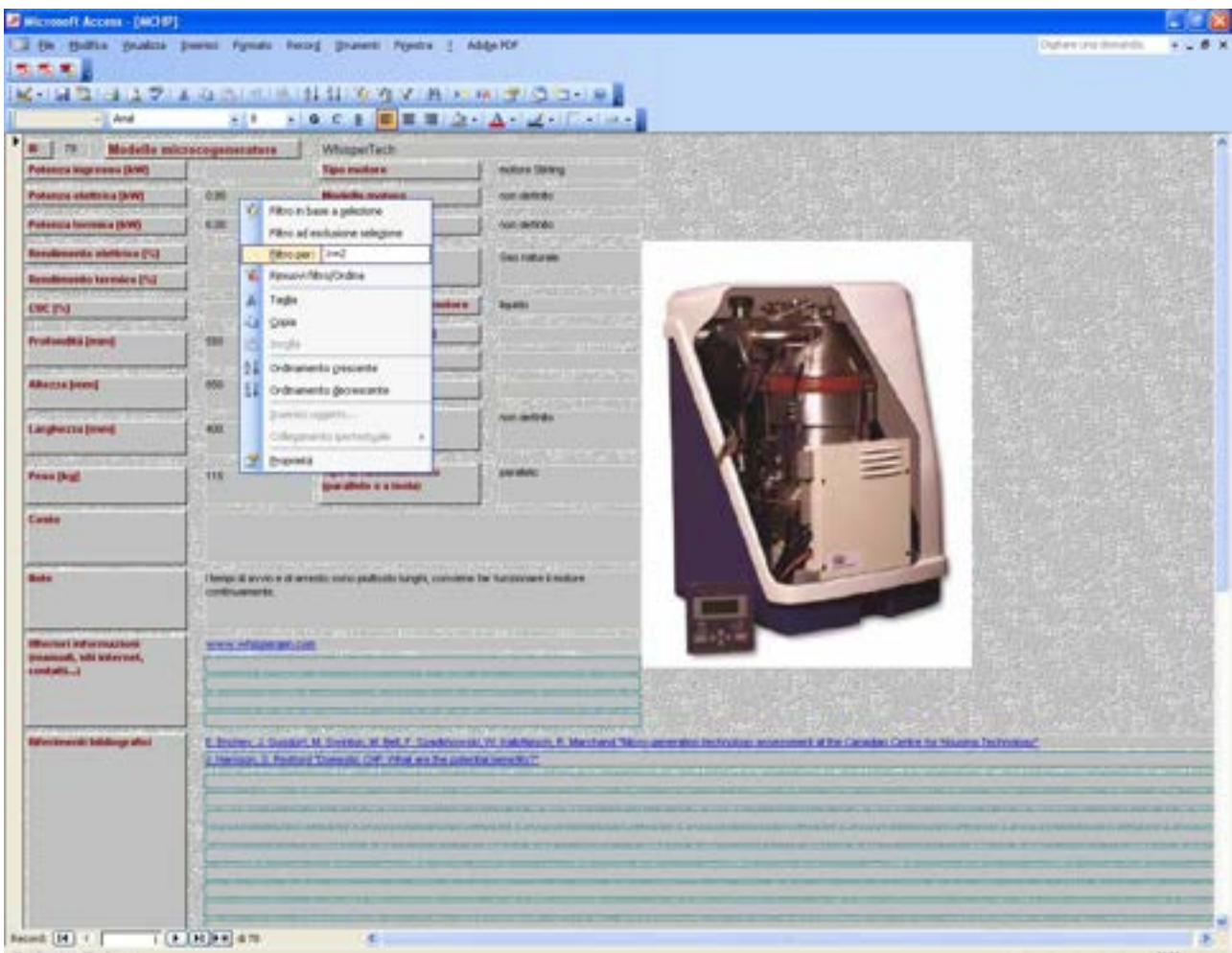
**Fig. 8:** filtro in base a maschera

Dopo aver digitato l'espressione nella casella di testo del filtro per definizione, per applicare il filtro e chiudere il menù di scelta rapida, premere INVIO; per applicare il filtro e mantenere visualizzato il menù di scelta rapida premere TAB.

Si osservi che si applica il filtro per definizione relativamente alla caratteristica "Combustibile" e nella relativa casella di testo si digita l'espressione "Gas naturale", il filtro restituirà solo quei modelli di microgeneratore che sono alimentati esclusivamente a gas naturale e non anche quelli alimentati, ad esempio, a gas naturale e GPL. Se invece si vuole visualizzare tutti i modelli di microgeneratore che prevedono l'alimentazione a gas naturale ed, eventualmente, con qualunque altro tipo di combustibile, è necessario utilizzare l'espressione "like". Nella casella di testo del filtro per definizione si digiterà dunque l'espressione *like(\*gas naturale\*)*.

Analogamente, per visualizzare tutti i modelli di microgeneratore prodotti, ad esempio, dall'Aisin, si applica il filtro per definizione relativamente al parametro "Modello microgeneratore", digitando l'espressione *like(\*aisin\*)*.

È possibile anche realizzare un filtro che restituisca i modelli che non contengono alcun valore all'interno di un campo relativo ad un specificato parametro. A tal scopo ci si avvale dell'espressione "Is null". Ad esempio, se si vuole visualizzare tutti i modelli di microgeneratore per i quali non sia specificata la cilindrata, si applica un filtro per definizione relativamente al parametro "Cilindrata motore" e si digita *is null* nella casella di testo del filtro per definizione.



**Fig. 9:** filtro per definizione

Un terzo metodo per effettuare delle ricerche all'interno del database è quello che prevede l'utilizzo delle query. A tal scopo, nella sezione "query" si apra la "query generica".

Nel menù "Visualizza" si selezioni "Visualizzazione struttura".

Così facendo comparirà una tabella in cui sono riportati, in colonne adiacenti, tutti i parametri che caratterizzano i modelli di microgeneratore contenuti all'interno del database.

In corrispondenza di ciascuna colonna è possibile specificare uno o più criteri cui devono rispondere i modelli di microgeneratore che si vuole ricercare. Ad esempio se si vuole visualizzare i modelli alimentati esclusivamente a gas naturale o esclusivamente a GPL, nella colonna relativa al parametro "Combustibile" si digita l'espressione "gas naturale" nella casella "criteri" e l'espressione "gpl" nella casella oppure (Figura 10, come si vede non c'è differenza tra lettere minuscole e maiuscole).

Ovviamente è anche possibile specificare criteri in colonne diverse della query.

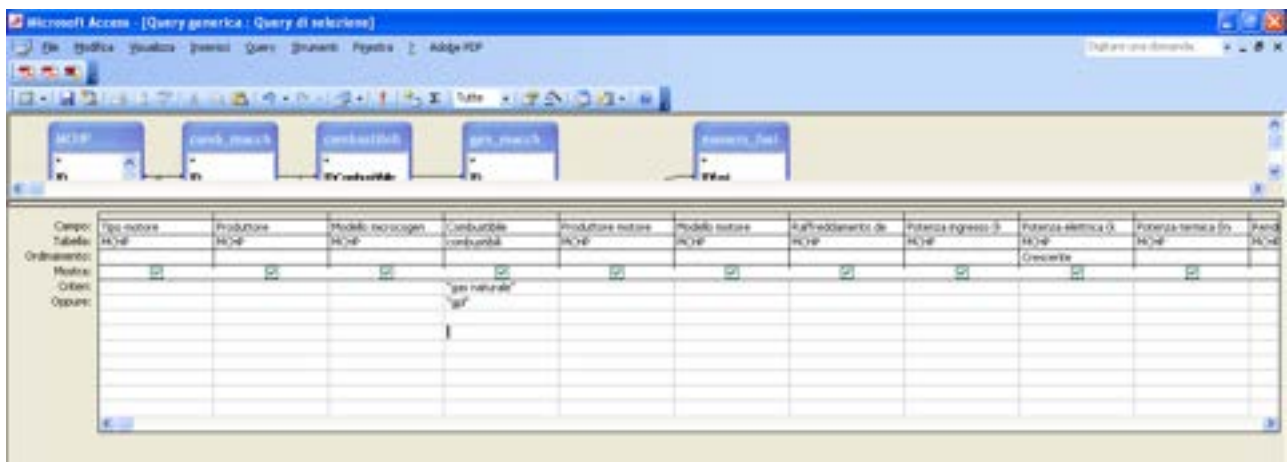



Fig. 10: schermata di definizione di una query generica

A questo punto si clicca sul pulsante "Esegui" ; così facendo comparirà una schermata in cui vengono visualizzati, in forma tabellare e non più in forma di maschera, tutti i modelli di microgeneratore che rispondono ai criteri di ricerca impostati nella query.

Per la definizione di una nuova query, bisogna tornare alla modalità visualizzazione struttura di quest'ultima.

Ovviamente, per la definizione dei criteri di ricerca, è possibile utilizzare tutte le regole e le espressioni già introdotte per l'utilizzo dei filtri (operatori relazionali e booleani, "like", "is null" ...).

La query permette inoltre di definire l'ordine con cui i modelli vengono elencati all'interno della tabella che risulta dall'esecuzione della query stessa. Ad esempio se si vuole visualizzare tutti i



modelli alimentati solo a gas naturale per valori crescenti della potenza elettrica, si digita l'espressione "gas naturale" nella casella criteri della colonna "Combustibile", mentre nella casella Ordinamento della colonna "Potenza elettrica" si seleziona "crescente". È anche possibile elencare i modelli che costituiscono il risultato della query secondo un ordine decrescente, ad esempio di potenza elettrica, selezionando "decrescente" nella casella ordinamento. Se si seleziona un tipo di ordinamento in corrispondenza di colonne diverse della query, prevarrà l'ordinamento relativo alla colonna posta più alla sinistra.

È possibile inoltre abilitare o disabilitare, nella tabella che risulta dall'esecuzione della query, la visualizzazione delle informazioni relative a ciascun parametro dei modelli di microcogeneratore, spuntando la casella "Mostra" nella colonna corrispondente al parametro stesso.

Si riporta infine un elenco dei valori, testuali o numerici, che possono assumere alcuni dei parametri caratteristici dei modelli di microcogeneratore contenuti all'interno del database.

Tipo motore:

- Motore alternativo a combustione interna
- Motore Stirling
- Ciclo Rankine
- Fuel cell

Combustibile:

- Gas naturale
- GPL
- Propano
- Gasolio
- Benzina
- Biogas
- Biodiesel

- Olio vegetale
- Cherosene
- Pellets
- Etanolo
- Metanolo

Intervalli di potenza elettrica:

- 0 – 5 kW
- 5 – 10 kW
- 10 – 15 kW

Tipo di generatore:

- Sincrono
- asincrono

Numero di fasi

- 1
- 3

Tipo di funzionamento:

- Parallelo
- Isola