



Ricerca di Sistema elettrico

Definizioni delle zone climatiche estive e della durata della stagione di climatizzazione estiva per gli edifici residenziali nel territorio italiano attraverso la metodologia dell'indice di severità climatica ENEA

L. Terrinoni, P. Signoretti, D. Iatauro

DEFINIZIONE DELLE ZONE CLIMATICHE ESTIVE E DELLA DURATA DELLA STAGIONE DI CLIMATIZZAZIONE ESTIVA PER GLI EDIFICI RESIDENZIALI NEL TERRITORIO ITALIANO ATTRAVERSO LA METODOLOGIA DI SEVERITÀ CLIMATICA ENEA

L. Terrinoni, P. Signoretti, D. Iatauro (ENEA)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso di energia elettrica

Progetto: Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Obiettivo: Determinazione della durata della stagione di climatizzazione estiva per gli edifici residenziali per le zone climatiche estive definite attraverso la metodologia dell'indice di severità climatica

Responsabile del Progetto: arch. Gaetano Fasano, ENEA



Indice

1 Sommario

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 RICHIAMI SULL'INDICE DI SEVERITÀ CLIMATICA	6
2.1 I PARAMETRI DEL MODELLO	6
2.2 IL VETTORE CLIMATICO RIDOTTO.....	8
3 IMPIEGO DELL'INDICE DI SEVERITÀ CLIMATICA PER UNA NUOVA ZONIZZAZIONE CLIMATICA ESTIVA DEL TERRITORIO.	9
3.1 LA SCELTA DEL NUMERO DI CLASSI INIZIALE	9
3.2 UNA NUOVA PROPOSTA PER LE ZONE CLIMATICHE ESTIVE.....	10
3.3 NUOVA DETERMINAZIONE DELLE CLASSI CLIMATICHE IN FUNZIONE DEL VETTORE CLIMATICO.....	16
3.4 LA DISTRIBUZIONE DEI COMUNI ITALIANI SECONDO LE NUOVE CLASSI CLIMATICHE	23
3.5 LA DISTRIBUZIONE DELLA POPOLAZIONE ITALIANA SECONDO LE NUOVE CLASSI CLIMATICHE	28
3.6 LA DISTRIBUZIONE REGIONALE DEL PESO ENERGETICO SECONDO LE NUOVE CLASSI CLIMATICHE	32
4 LA DURATA DEL PERIODO DI CLIMATIZZAZIONE ESTIVA	36
4.1 DEFINIZIONE DEL MODULO DEL VETTORE CLIMATICO CORRENTE $ \vec{v}_c(t) $	36
4.2 IL CALCOLO DEL MODULO DEL VETTORE CLIMATICO CORRENTE $ \vec{v}_c(t) $	37
4.3 IL FILTRAGGIO DEL MODULO DEL VETTORE CLIMATICO CORRENTE $ \vec{v}_c(t) $	39
4.3.1 Applicazione di filtri passabasso alla funzione $t \vec{v}_c(t) $	41
4.3.2 Ricostruzione delle funzioni $ \vec{v}_c(t) _w$ e $ \vec{v}_c(t) _m$	44
4.4 ENERGIA CUMULATA E POTENZA CUMULATA DI CLIMATIZZAZIONE	45
4.5 RELAZIONE TRA POTENZA E ENERGIA CUMULATA E MODULO DEL VETTORE CLIMATICO CALCOLATI AL TEMPO CORRENTE t	46
4.5.1 Potenza cumulata $P(t)$ al tempo corrente t	46
4.5.2 Relazione tra potenza cumulata $P(t)$ e modulo del vettore climatico $V_c(t)$	49
4.5.3 Gli intervalli temporali tipici del periodo di climatizzazione T e la loro utilizzazione per la determinazione dei tempi d'inizio e fine.	55
4.5.4 Una possibile proposta per determinare i tempi convenzionali t_s e t_e	61
4.5.5 I risultati della determinazione dei tempi convenzionali t_s e t_e	62
4.5.6 La determinazione della durata della stagione di climatizzazione estiva nelle zone climatiche.....	64
5 CONCLUSIONI.....	67
6 APPENDICE 1.....	68
6.1 STUDIO DELLA FUNZIONE $ \vec{v}_c(t) $	68
6.2 CONCLUSIONI.....	73
7 APPENDICE 2	75
7.1 CONSIDERAZIONI SUL TERMINE INERZIALE $K(\mu, t)$	75
8 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	79

Sommario

Il lavoro presentato in questo rapporto s’inserisce nell’ambito del supporto istituzionale dell’ENEA al Ministero dello Sviluppo economico per la preparazione dei decreti di attuazione della L. 90-2013 (recepimento della direttiva 2010/31/UE sull’efficienza energetica negli edifici) e, in particolare, sulle modalità di applicazione della metodologia di calcolo delle prestazioni energetiche e l’utilizzo delle fonti rinnovabili negli edifici nonché dell’applicazione di prescrizioni e requisiti minimi in materia di prestazioni energetiche degli edifici e unità immobiliari. In questo nuovo contesto è previsto il calcolo del fabbisogno energetico annuale globale per singolo servizio energetico, espresso in energia primaria. Accanto alle prescrizioni riguardanti il fabbisogno energetico per il riscaldamento invernale, dovranno quindi essere considerati, per esempio, il fabbisogno per il raffrescamento estivo e per l’illuminazione artificiale. Mentre per il fabbisogno invernale è da tempo vigente una divisione in zone climatiche del territorio nazionale e la determinazione della durata del periodo annuale legale di funzionamento dell’impianto termico (DPR 412/93), per il periodo estivo, a livello normativo o legislativo, niente di tutto questo ancora esiste. Su proposta dell’ENEA, però, è stato recepito nella norma di prossima pubblicazione UNI 10349 parte 3 un nuovo parametro, l’indice di Severità Climatica, sulla base del quale è possibile una zonizzazione climatica estiva del territorio nazionale. Nel lavoro degli stessi autori svolto per la precedente annualità della Ricerca di Sistema Elettrico, è già stata riportata una proposta di zonizzazione estiva basata su tale indice. Nel presente lavoro è rivista la metodologia di zonizzazione al fine di “ponderare” la zona climatica di attribuzione di ogni singola località con la superficie abitativa media della località stessa; la nuova zonizzazione è quindi dipendente dall’intensità energetica connessa con la parte di territorio interessato. È altresì proposto un metodo, del tutto originale e ancora basato sull’Indice di Severità Climatica, per la determinazione del tempo d’inizio e fine legale della stagione di raffrescamento, in modo da completare il parallelo con il periodo invernale, che si propone di inserire nei decreti attuativi in preparazione.

Parole chiave: edifici, efficienza energetica, indice di severità climatica, zone climatiche

Summary

The study presented in this technical report is part of the institutional support that ENEA provides to the Ministry of Economic Development in the framework of the implementation of European Directive 2010/31/EU on energy efficiency (transposed from L.90- 2013), and about the application of new method for the evaluation of the energy demand of buildings. In this new context the energy needs for different use, expressed in primary energy, are required: heating, hot water, ventilation, cooling and lighting. While for the heating was carried out a climatic zoning of the Italian territory and were identified different periods of operation of thermal plants (DPR 412/93), no zoning and no operation limits are currently required by law for cooling.

ENEA has recently proposed a zoning based on a new parameter: the Climate Severity Index, which will be implemented by the new technical standard UNI 10349 and, in the previous work (RdS 2013), the same authors, have already been given a proposal for a Italian summer zoning, based on the this index.

In this work, the zoning methodology is revised in order to "link" the allocation of climate zone for each locality with the average size of dwellings: the new zoning will be therefore correlated with the energy intensity of the site considered. Furthermore, is also described an original method, still based on the Climatic Severity Index, to define of the operation time of thermal plants for the cooling season, in the different climatic zones.

Keywords: buildings, energy efficiency, climatic severity index, climatic zones.

"Bis repetita placent". ARS POETICA, Orazio (65 a.c - 8 a.c)

1 Introduzione

La normativa italiana sulla certificazione energetica degli edifici prevede il calcolo di una serie di indici concernenti gli usi energetici per la climatizzazione invernale, la climatizzazione estiva, la produzione di acqua calda sanitaria e, nel settore non residenziale, l'illuminazione artificiale.

Ciascuno di questi indici viene valutato secondo una metodologia standard, e fornisce una indicazione sull'energia, per unità di superficie o di volume, necessaria a soddisfare il corrispondente uso energetico.

Per la climatizzazione degli edifici, il metodo di calcolo degli indici di prestazione, individua per la stagione invernale una durata unica per ciascuna zona climatica, mentre per la stagione di raffrescamento la durata non viene definita ma risulta variabile con le caratteristiche climatiche e quelle dimensionali e termofisiche dell'involucro edilizio. Può risultare quindi che due edifici differenti collocati nella stessa località geografica abbiano diversa durata della stagione di raffrescamento ma medesima durata della stagione di riscaldamento, o viceversa se collocati in due località con caratteristiche climatiche diverse.

In precedenti lavori, l'ENEA ha proposto la zonizzazione del territorio italiano in zone climatiche estive, grazie alla definizione di un nuovo indicatore sintetico dell'intensità energetica per la climatizzazione degli edifici (Indice di Severità Climatica), pressoché indipendente dalle caratteristiche dell'edificio e dipendente dalle caratteristiche climatiche del sito. Tale indice è stato recepito dal CTI (Comitato Termotecnico Italiano) ed è entrato a far parte della nuova Norma UNI 10349 parte 3 di prossima pubblicazione.

Attraverso il modulo del vettore climatico (funzione della *temperatura, della irradiazione solare e dell'umidità specifica del sito*), da cui tale indice dipende, è stata possibile definire sette diverse classi climatiche estive contraddistinte dalle lettere da A a G in ordine crescente di severità climatica, alle quali sono stati assegnati i comuni italiani.

Lo scopo del presente lavoro è quello di rimodulare il numero delle classi climatiche estive, così come definite in precedenza, passando da sette (da A a G) a cinque (da A a E) e di definire per ciascuna classe una possibile durata della stagione di raffrescamento. La rimodulazione sarà effettuata anche al fine di "ponderare" ogni singola località con la sua intensità energetica.

La riduzione delle classi viene proposta per rendere omogeneo il numero delle classi estive con quelle invernali, in quanto è stato intrapreso, dal Ministero per lo Sviluppo Economico, un percorso volto a ridurre queste ultime a cinque, con la fusione tra la zona invernale A e la zonainvernale B.

L'uguaglianza del numero delle classi invernali e di quelle estive consentirà, nel prossimo futuro, di determinare una matrice climatica, di dimensione cinque per cinque, di accoppiamento estate-inverno per ogni singola località del territorio nazionale, utile ai fini di ottenere un equilibrio estate-inverno dei requisiti minimi in materia di prestazioni energetiche degli edifici.

Anche la definizione di una durata della stagione di raffrescamento va nella direzione di quanto previsto dal caso invernale, e può quindi fornire al legislatore un possibile strumento di supporto per la regolamentazione della climatizzazione estiva.

2 Richiami sull'Indice di Severità Climatica

2.1 I parametri del modello

Nei reports precedenti¹ [1,2,3,4], si era visto che per un qualsiasi sistema edificio-impianto esiste una funzione E_T delle variabili climatiche dell'ambiente esterno che esprime, fisicamente, l'energia necessaria per la climatizzazione dell'edificio di volume V in un intervallo di tempo T :

$$\frac{E_T}{VT} = f \left[(\Theta - \Theta_{ref}), (X - X_{ref}), (Y - Y_{ref}) \right] = \mathcal{Z}$$

Le variabili Θ , X e Y rappresentano, rispettivamente, le temperature, le umidità specifiche e l'irradiazione globale sul piano orizzontale medie nel periodo T (caratteristiche climatiche del sito), mentre Θ_{ref} , X_{ref} e Y_{ref} sono valori di riferimento per le stesse variabili.

$$\Theta = \frac{1}{T} \int_T \theta_e dt$$

$$X = \frac{1}{T} \int_T x_e dt$$

$$Y = \frac{1}{T} \int_T I_0 dt$$

La funzione sopra definita sarà, in generale, non lineare nelle variabili indipendenti poiché tali variabili possono presentare effetti di accoppiamento che si riflettono sui valori assunti da E_T .

Sviluppando la funzione in serie di potenze di Taylor intorno a un valore qualsiasi appartenente al dominio delle variabili e arrestando lo sviluppo al primo ordine delle derivate si ha:

$$\frac{E_T}{VT} = \mathcal{Z} = \mathcal{A}\Theta + \mathcal{B}X + \mathcal{C}Y - [\mathcal{A}\Theta + \mathcal{B}X + \mathcal{C}Y]_{ref}$$

Nei lavori precedenti è stato illustrato il significato fisico dei coefficienti \mathcal{A} , \mathcal{B} , \mathcal{C} :

$$\mathcal{A} = \left(U_{eq} \frac{S}{V} + \rho n c_p \pm \delta \frac{M_{eq}}{V} \right)$$

$$\mathcal{B} = \rho n r_0$$

$$\mathcal{C} = \frac{\hat{S}_R}{V}$$

La struttura dell'espressione di \mathcal{Z} ha suggerito di esprimere la funzione sotto forma di prodotto scalare tra vettori.

¹ Ripercorriamo rapidamente il procedimento di costruzione del modello matematico, rimandando i dettagli ai lavori precedenti [1,2].

A tale scopo sono stati introdotti due vettori caratteristici, denominati "vettore edificio" e "vettore climatico" le cui definizioni, nella forma generalizzata, sono le seguenti:

Vettore edificio \vec{V}_B : è il vettore che ha per componenti le caratteristiche geometriche e termofisiche dell'edificio in esame (ρ e r_0 sono delle costanti), con modulo pari a:

$$|\vec{V}_B| = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}$$

Vettore climatico \vec{V}_C : è il vettore che ha per componenti le caratteristiche climatiche cumulate del sito, con modulo pari a:

$$|\vec{V}_C| = \sqrt{\Theta^2 + X^2 + Y^2}$$

L'angolo tra i due vettori è ω , dipendente essenzialmente dai coseni direttori del vettore edificio poiché l'orientamento nello spazio (Θ , X e Y) del vettore climatico è contenuto in un angolo solido di ampiezza limitata. L'introduzione di questi due vettori caratteristici ha consentito di esprimere l'energia di climatizzazione \tilde{E} sotto la seguente forma:

$$\tilde{E} = \vec{V}_B \cdot \vec{V}_C - \vec{V}_B' \cdot \vec{V}_{C,ref}$$

ovvero, in termini scalari

$$\tilde{E} = |\vec{V}_B| |\vec{V}_C| \cos \omega - |\vec{V}_B'| |\vec{V}_{C,ref}| \cos \omega'$$

assumendo, come ipotesi semplificativa, $\cos \omega \cong \cos \omega'$ e introducendo il fattore $k(\mu) = \frac{|\vec{V}_B'|}{|\vec{V}_B|}$ (variabile in un campo limitato intorno a 1) si può scrivere:

$$\tilde{E} = |\vec{V}_B| |\vec{V}_C| \cos \omega - k(\mu) |\vec{V}_{C,ref}| \cos \omega$$

Se si normalizza l'energia \tilde{E} , energia di climatizzazione per unità di volume interno dell'edificio e per unità di tempo di osservazione, con le caratteristiche dell'edificio, espresse dal modulo del vettore edificio e dall'altra caratteristica dell'edificio espressa da $\cos \omega$, si ottiene:

$$C = \frac{\tilde{E}}{|\vec{V}_B| \cos \omega} = |\vec{V}_C| - k(\mu) |\vec{V}_{C,ref}|$$

Il fattore C così definito rappresenta l'energia di climatizzazione normalizzata con le caratteristiche globali dell'edificio, indipendente quindi da queste, ma dipendente dalle caratteristiche climatiche globali ed è il candidato proposto per rappresentare l'*Indice di Severità Climatica pratico* utile per la classificazione delle zone climatiche estive su un territorio.

Il fattore C , nel modello proposto, dipende linearmente dal modulo del vettore climatico $|\vec{V}_C|$, funzione delle sole variabili climatiche cumulate, a meno di un termine praticamente costante dipendente debolmente dall'edificio tramite il fattore $k(\mu)$.

Il modulo del vettore climatico, $|\vec{V}_C|$, può essere quindi utilizzato per una suddivisione del territorio nazionale in fasce climatiche estive (zonizzazione) che rispecchino il fabbisogno energetico per la climatizzazione estiva poiché, secondo quanto esposto, è univocamente legato all'*Indice di Severità climatica C* che ne costituisce l'*immagine energetica*.

2.2 Il vettore climatico ridotto²

Per vettore climatico ridotto intendiamo il vettore climatico di un sito le cui componenti sono date dal rapporto tra le grandezze climatiche cumulate per il sito nel periodo T e l'intervallo di tempo corrispondente a T stesso (valor medio nel periodo T), normalizzate ciascuna rispetto al valor medio delle stesse componenti negli n siti del campione climatico del territorio nazionale in modo da renderle indipendenti dalle rispettive unità di misura. Il modulo del vettore così definito stabilisce una scala relativa tra le n località.

$$|\vec{V}_C| = \sqrt{\dot{\Theta}_e^2 + \dot{X}_e^2 + \dot{Y}_e^2}$$

Dove

$$\begin{aligned} \dot{\Theta}_e &= \frac{\frac{1}{T} \int \vartheta_e dt}{\Theta_*} = \frac{\Theta_e}{\Theta_*} \quad \text{con} \quad \Theta_* = \frac{1}{n} \sum_n \frac{1}{T} \int \vartheta_e dt \\ \dot{X}_e &= \frac{\frac{1}{T} \int x_e dt}{X_*} = \frac{X_e}{X_*} \quad \text{con} \quad X_* = \frac{1}{n} \sum_n \frac{1}{T} \int x_e dt \\ \dot{Y}_e &= \frac{\frac{1}{T} \int I_o dt}{Y_*} = \frac{Y_e}{Y_*} \quad \text{con} \quad Y_* = \frac{1}{n} \sum_n \frac{1}{T} \int I_o dt \end{aligned}$$

² Idem nota 1

3 Impiego dell'Indice di Severità Climatica per una nuova zonizzazione climatica estiva del territorio.

Il legame tra il Vettore climatico e l'Indice di Severità C , così come sopra definito, è stato oggetto di analisi in alcuni precedenti lavori.

Il grafico della figura seguente ([2] Technical Report RdS 2011) rappresenta i risultati finali ottenuti mediante calcolo dinamico del fabbisogno energetico per la climatizzazione estiva di alcuni edifici di riferimento, di tipo residenziale e terziario (uffici), in 20 diverse località rappresentative del clima italiano e considerando diverse caratteristiche termofisiche dell'edificio: grado d'isolamento dell'involucro edilizio, orientamento, superficie vetrata, capacità termica.

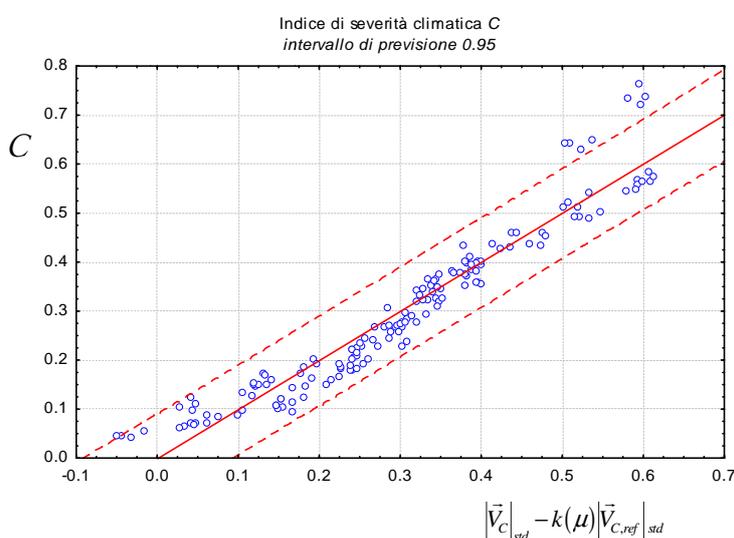
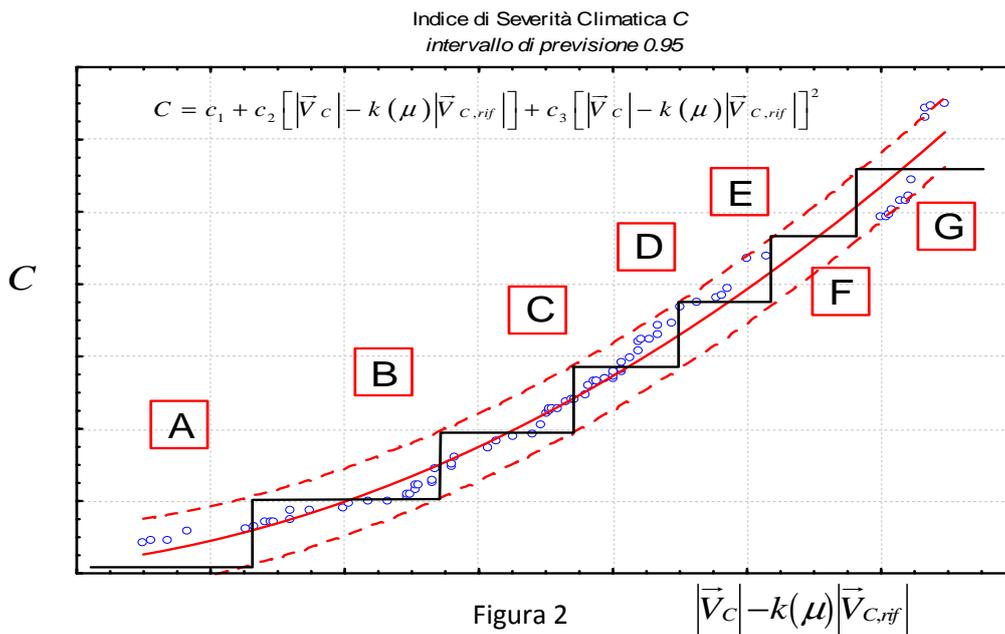


Figura 1

La buona correlazione tra C , energia di climatizzazione normalizzata con le caratteristiche globali dell'edificio, ed il modulo del vettore climatico, è ben confermata anche nel caso siano analizzati edifici di differente tipologia e destinazione d'uso. Ciò dimostra ulteriormente, secondo quanto ipotizzato, la sostanziale indipendenza del vettore climatico dalle caratteristiche dell'edificio e rende $|\vec{V}_C|$ utilizzabile per una classificazione del territorio italiano.

3.1 La scelta del numero di classi iniziale

Il criterio inizialmente scelto per individuare un congruo numero di classi climatiche, detto del 2σ , risponde all'esigenza di ridurre statisticamente l'eventualità che il margine di incertezza nel calcolo del fabbisogno energetico (C), supposto pari $\pm 2\sigma$ possa comportare un cambio di fascia climatica. Tale aspetto è ben rappresentato nel grafico seguente in cui è mostrata la correlazione tra fabbisogno energetico normalizzato e vettore climatico, con intervallo di previsione al 95%, e la suddivisione in classi climatiche precedentemente effettuata.



Le classi, individuate in accordo al criterio dell'intervallo di previsione al 95% ($\pm 2\sigma$), sono sette, contraddistinte dalle lettere da A a G in ordine crescente di severità climatica estiva, cioè di fabbisogno di energia per la climatizzazione.

In buona sostanza, interpretando correttamente la suddivisione effettuata dal punto di vista statistico, è possibile affermare, che per un dato intervallo del vettore climatico $\left| \vec{V}_C \right|$ (classe climatica) è lecito aspettarsi un corrispondente intervallo del fabbisogno energetico estivo (con intervallo di previsione $\pm 2\sigma$)

3.2 Una nuova proposta per le zone climatiche estive

A livello normativo nazionale è stato intrapreso un percorso di riduzione delle zone climatiche invernali, accorpando la zona A, dove sono presenti solo due comuni e con un esiguo numero di abitazioni (lo 0,04% del totale italiano), con la zona B, portando quindi il numero totale delle zone da sei a cinque. In accordo con questa esigenza, gli autori hanno ritenuto opportuno proporre una riduzione del numero delle zone climatiche estive definite in [3] passando da sette (da A a G) a cinque (da A a E), stabilendo così, nell'ambito della climatizzazione degli edifici, una simmetria tra il caso invernale e il caso estivo.

La riduzione introdotta non è stata una semplice rimodulazione di quanto già proposto, bensì una ridefinizione della zonizzazione, realizzata in modo da considerare un *peso energetico potenziale* che può essere attribuito a ciascuna località nell'ambito della climatizzazione estiva.

Per quanto dimostrato attraverso l'indice di Severità Climatica, l'energia di climatizzazione, a meno delle caratteristiche globali dell'edificio, può essere considerata proporzionale al modulo del vettore climatico e al volume da climatizzare. Questa accezione può essere estesa ad un intero comune laddove lo stesso venga identificato con un insieme di volumi; la medesima cosa si può dire per l'intero territorio nazionale.

Come ulteriore ipotesi semplificativa si è scelto di riferirsi ai soli edifici residenziali e considerare la superficie (in pianta), e quindi il volume climatizzato, variabile a livello provinciale.

Per la determinazione del peso energetico con cui caratterizzare ciascuno dei comuni italiani analizzati, sono stati considerati tre diversi parametri:

- il numero di unità abitative;
- la superficie media della singola unità abitativa (valore provinciale);
- il modulo del vettore climatico $|\vec{v}_c|$.

I primi due parametri sono stati ricavati utilizzando i dati ISTAT 2011 su popolazione residente, alloggi ed edifici.

Secondo questi dati, il numero delle abitazioni italiane (censite) è poco superiore ai 29 milioni di unità; di queste circa il 47% si trova nelle regioni del nord, il 34% nelle regioni del sud ed il restante 19% (circa) in quelle centrali. In figura 3 viene proposto un quadro riepilogativo della ripartizione regionale delle unità abitative.

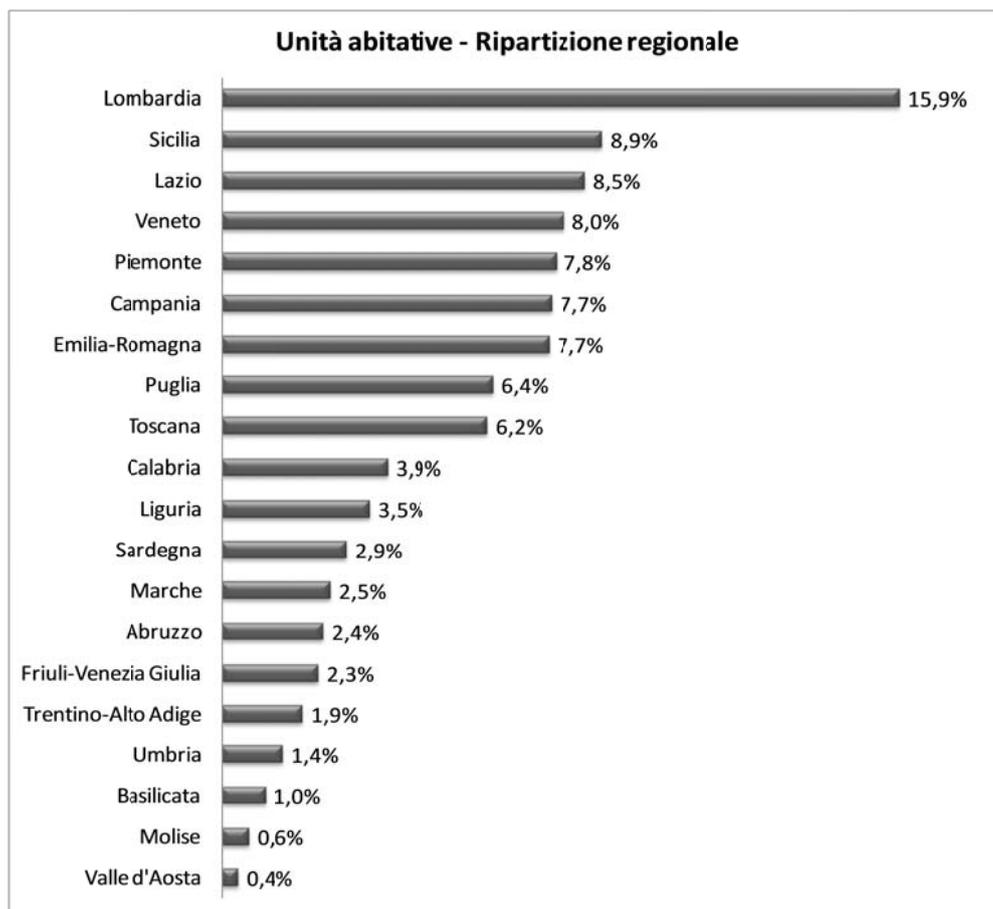


Figura 3. Ripartizione regionale % abitazioni italiane

Si può osservare che in termini di incidenza regionale il contributo maggiore è quello della Lombardia seguita dalla Sicilia, dal Lazio e dal Veneto. Per quanto riguarda invece l'incidenza dei singoli comuni, ai primi quattro posti troviamo, Roma, Milano, Torino e Napoli.

Relativamente alle superfici medie in pianta delle abitazioni italiane, i dati censiti mostrano dei valori compresi tra 71 e 117 m² (valori medi provinciali); a livello di dati regionali questo range di variazione risulta più contenuto così come a livello di macroarea (nord, centro, sud e isole). Per le analisi effettuate, le superfici medie comunali sono state assunte pari a quelle delle rispettive province di riferimento.

Regioni	Superficie media (m ²)
Piemonte	88,1
Valle d'Aosta	71,3
Lombardia	91,7
Trentino-Alto Adige	85,3
Veneto	105,8
Friuli-Venezia Giulia	97,0
Liguria	77,9
Emilia-Romagna	97,0
Toscana	94,6
Umbria	100,6
Marche	98,5
Lazio	87,5
Abruzzo	91,9
Molise	91,4
Campania	89,3
Puglia	91,7
Basilicata	81,0
Calabria	88,0
Sicilia	89,9
Sardegna	96,7

Tabella 1. Superficie media regionale delle abitazioni italiane

A ciascuno dei comuni italiani esaminati è stato associata una superficie potenziale da climatizzare calcolata sulla base del numero di abitazioni censite e sul valore delle superfici medie.

Per il calcolo del volume corrispondente si è introdotta l'ipotesi semplificativa di considerare l'altezza media di interpiano h costante e uguale per tutte le abitazioni dei comuni considerati.

Una volta determinato il volume potenziale di ciascun comune, è stato valutato il peso relativo rispetto al volume potenziale medio dei comuni italiani con il coefficiente

$$np = \frac{ua_i S_i h}{\frac{1}{N} \sum_1^N ua_i S_i h} = \frac{S_{T,i} h}{\frac{1}{N} \sum_1^N S_{T,i} h} = \frac{S_{T,i}}{\frac{1}{N} \sum_1^N S_{T,i}}$$

dove N è il numero totale dei comuni, ua_i è il numero di unità abitative del singolo comune, S_i la superficie media provinciale delle unità abitative, assunta come rappresentativa di quella comunale, e $S_{T,i}$ la superficie totale da climatizzare dell' i -esimo comune.

Determinato il coefficiente di peso np , per ciascuna località, è stato ricalcolato il modulo del vettore climatico, sia per tener conto di modifiche apportate alla Norma UNI 10349 (febbraio 2012), sia per correggere alcune imprecisioni riscontrate nelle valutazioni precedenti [3].

Così come riportato anche nella Norma UNI 10349 - Parte 3 di prossima pubblicazione, gli autori hanno ritenuto opportuno considerare, come caratteristica di riferimento climatica estiva, invece del valore modulo di $|\vec{V}_c|$ il suo multiplo $10^3 |\vec{V}_c|$.

In figura 4 è proposto l'andamento della numerosità del modulo del vettore climatico, ovvero il numero di comuni caratterizzato da uno specifico intervallo di valori di $|\vec{V}_c|$.

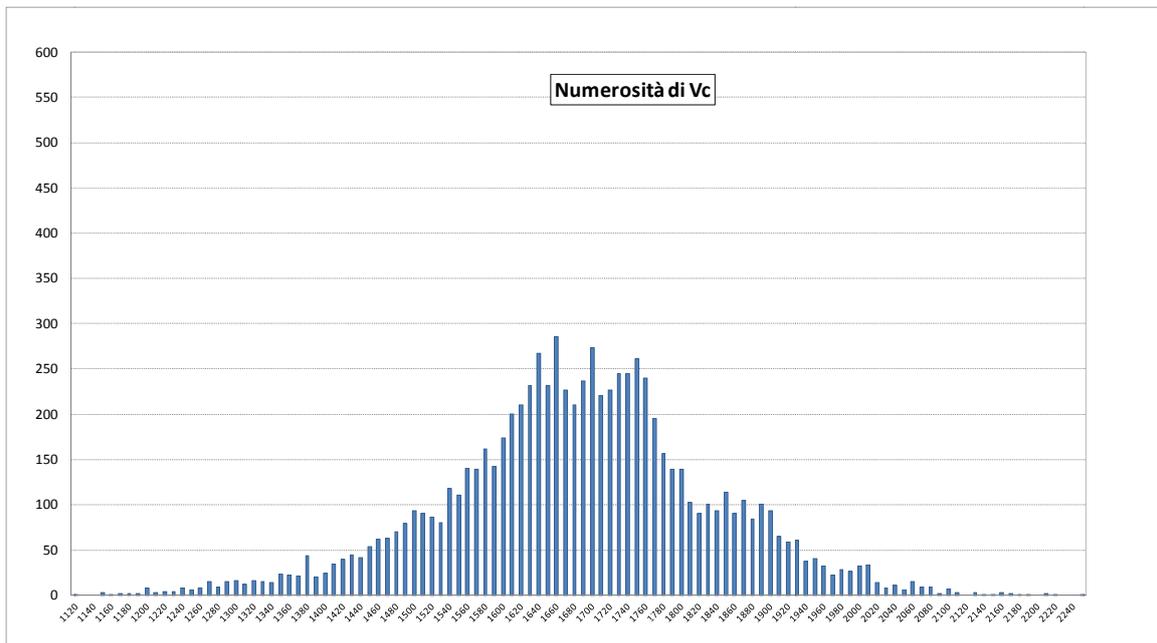


Figura 4. Numerosità del vettore climatico

Nella figura che segue è stata rappresentata la medesima distribuzione pesata rispetto al volume climatizzato, attraverso il coefficiente di peso np

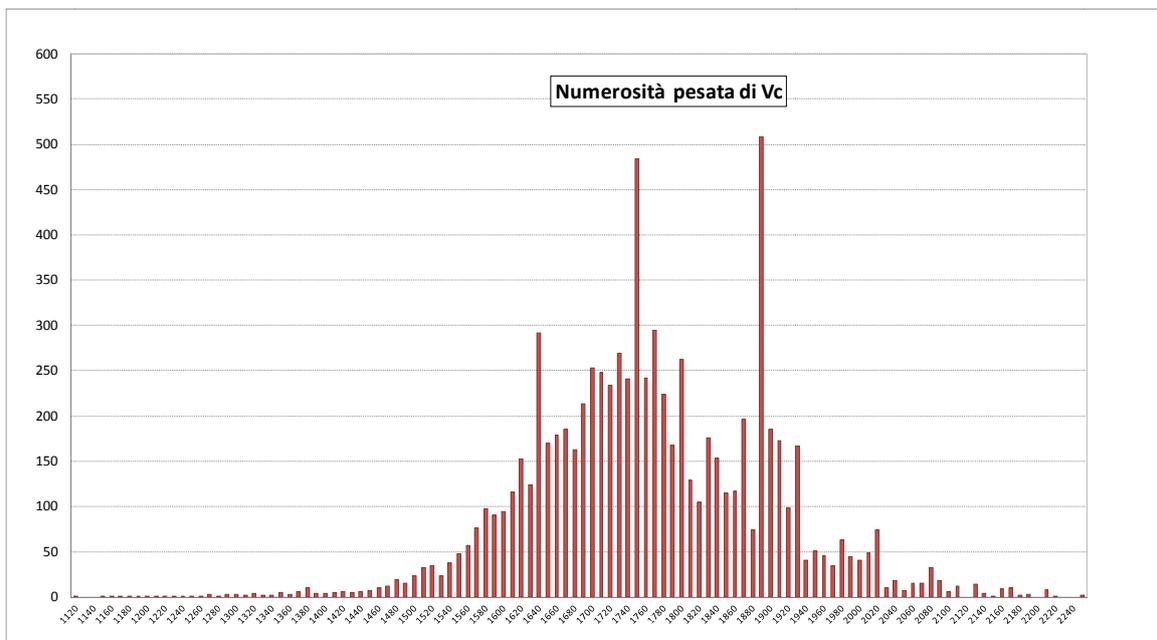


Figura 5. Numerosità pesata del vettore climatico

Nel primo grafico a ciascun comune viene attribuito il medesimo peso pari a 1; nel secondo grafico invece ciascun comune pesa in proporzione al volume (superficie in pianta) da climatizzare³.

Nella figura 5 che segue sono rappresentate le distribuzioni cumulate della numerosità di $|\vec{V}_c|$ sopra rappresentate.

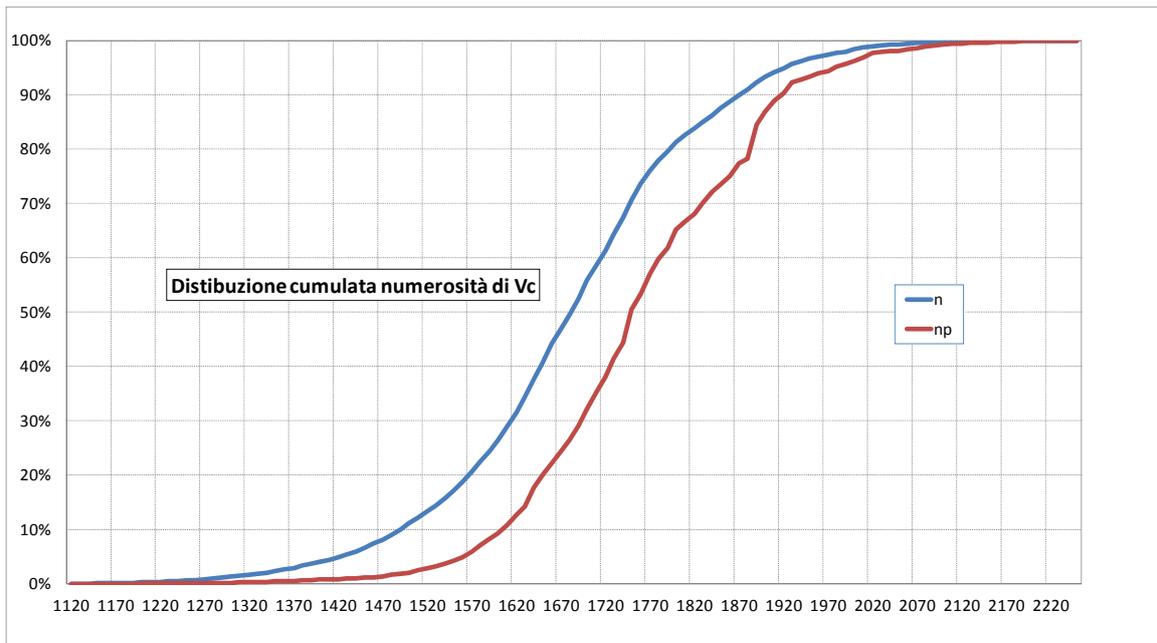


Figura 5. Distribuzione cumulata delle numerosità di Vc

Le curve riportate evidenziano uno spostamento della distribuzione pesata verso i valori di $|\vec{V}_c|$ più alti; si può osservare che nella fascia con valori di $|\vec{V}_c|$ più bassi, nel 20% dei comuni considerati si ha solo il 5% del totale dei volumi da climatizzare.

Dal peso relativo al volume np attraverso il modulo del vettore climatico $|\vec{V}_c|$ è possibile passare, come detto, ad un *peso energetico potenziale*, proporzionale al fabbisogno di energia termica di climatizzazione

$$np |\vec{V}_c| = \frac{S_{T,i} h}{\frac{1}{N} \sum_1^N S_{T,i} h} |\vec{V}_c| = \frac{S_{T,i}}{\frac{1}{N} \sum_1^N S_{T,i}} |\vec{V}_c|$$

Questo coefficiente caratterizza ciascun comune da un punto di vista energetico, determinando così, per la climatizzazione estiva, una graduatoria dei consumi energetici potenziali, valutati sui dati climatici e sulle volumetrie da climatizzare.

³ La ripartizione in classi di piccola ampiezza dei valori di $|\vec{V}_c|$ ha come obiettivo di esplorare le caratteristiche delle distribuzioni, di rendere più leggibili i grafici presentati e visivamente evidente lo shift della distribuzione pesata.

Una caratterizzazione di questo tipo consente di definire le classi climatiche in base al peso energetico che si attribuisce alla singola classe.

A livello regionale, il peso maggiore è quello della Lombardia seguita dal Lazio, dal Veneto e dalla Sicilia, mentre a livello comunale troviamo ai primi quattro posti Roma, Milano, Napoli e Torino (figura 6).

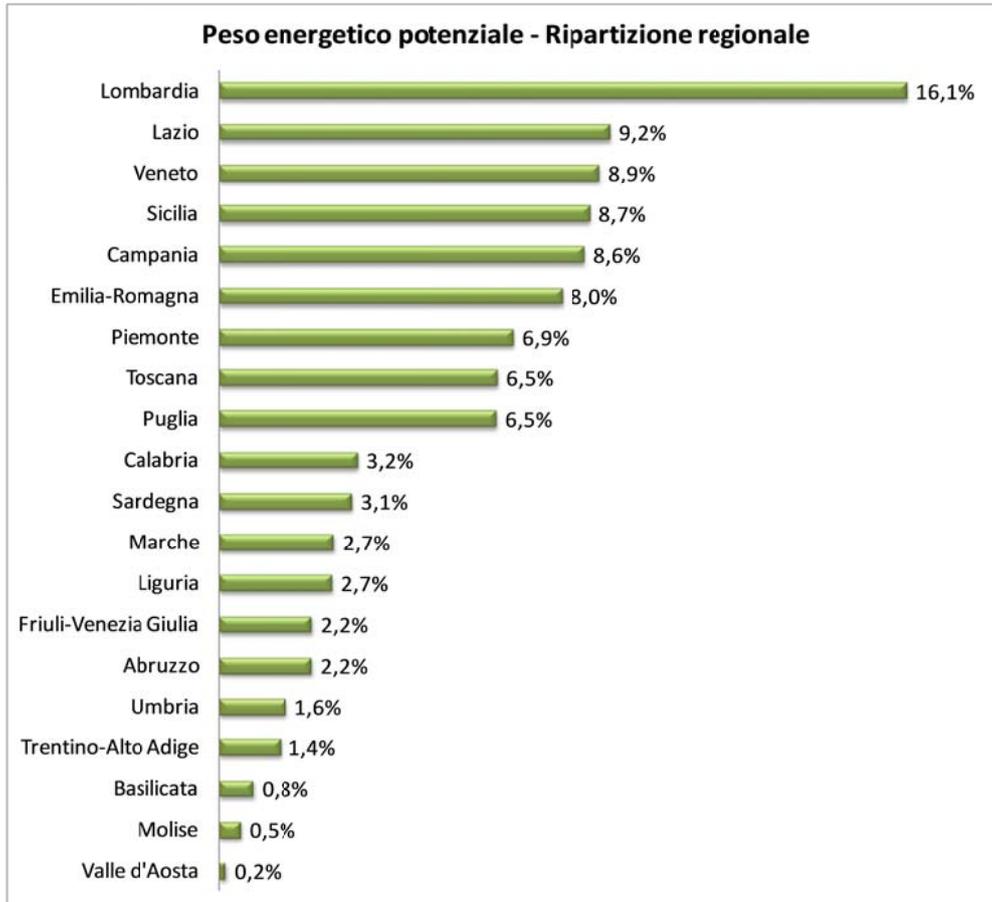


Figura 6.

In figura 7 è rappresentata la distribuzione cumulata della numerosità di $|\bar{V}_c|$ dove a ciascun comune viene attribuito un peso pari a quello energetico potenziale; sono state riportate a tratteggio anche le cumulate con peso pari ad 1 (n) e pari al volume da climatizzare (np).

La distribuzione riferita ai pesi energetici, rispetto a quella riferita ai volumi da climatizzare evidenzia un ulteriore spostamento verso valori più elevati di $|\bar{V}_c|$

Le curve riportate evidenziano uno spostamento della distribuzione pesata verso i valori di $|\bar{V}_c|$ più alti; si può osservare che nella fascia con valori di $|\bar{V}_c|$ più bassi, nel 20% dei comuni considerati si ha solo il 5% del totale dei volumi da climatizzare.

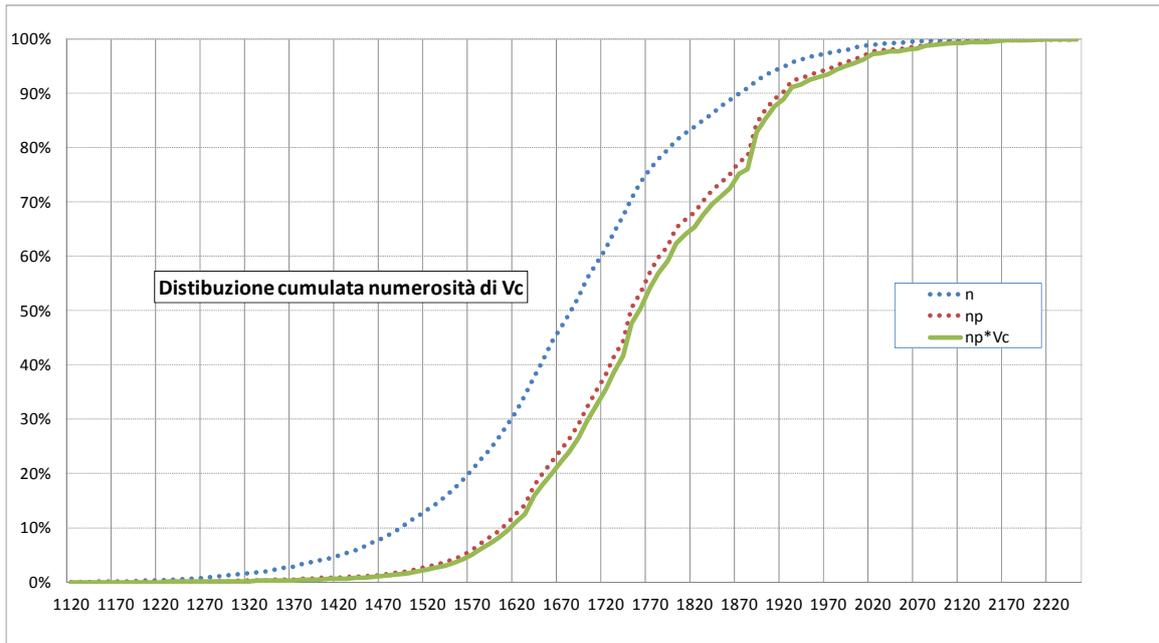


Figura 7. Distribuzione cumulata delle numerosità di $|\bar{V}_c|$: peso energetico

3.3 Nuova determinazione delle classi climatiche in funzione del Vettore climatico

Per definire opportunamente le classi climatiche si è partiti dall'analisi della distribuzione di frequenza di $|\bar{V}_c|$, che, come mostrato nei grafici seguenti, è risultata sostanzialmente di tipo gaussiano con media μ pari 1683 e deviazione standard σ pari 149

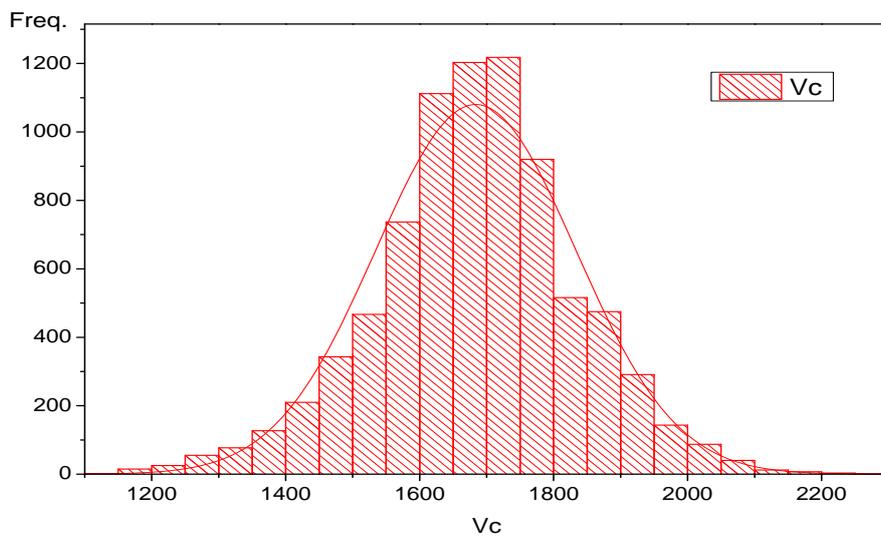


Figura 8.

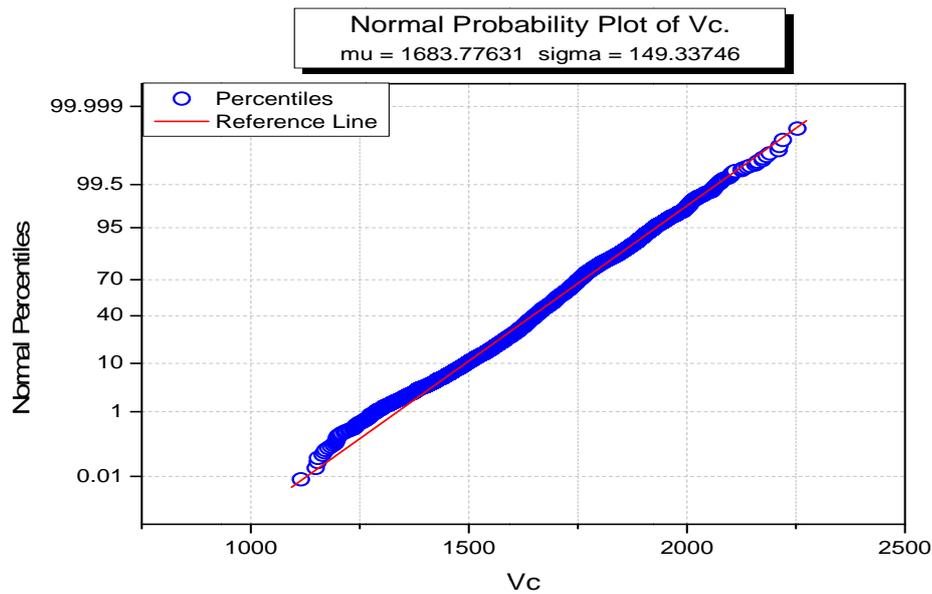


Figura 9.

Partendo dai valori di $\left| \overline{V}_c \right|$, relativi agli oltre ottomila comuni italiani, è stata operata una discretizzazione dei dati disponibili, al fine di poter avere un quadro più sintetico della distribuzione del campione.

Gli istogrammi sono usati in maniera estensiva sia come stimatori non parametrici della densità di probabilità (o frequenza) sia come rappresentazione visiva dei dati per ottenere quantità caratteristiche (media, deviazione standard...) della sottostante densità di frequenza teorica. Tuttavia la stima di queste quantità dipende dal numero di classi scelte per la rappresentazione dei dati.

La costruzione di una curva di distribuzione in frequenza dei dati in esame, in un opportuno numero di classi, ne consente, infatti, una migliore rappresentazione, evitando una elevata dispersione di dati con frequenza pari ad uno e altamente ravvicinati.

L'idea che guida tale costruzione, è di determinare un numero di classi minimo che consenta di "catturare" nell'istogramma le caratteristiche di base della distribuzione dei dati iniziale, ignorando i dettagli più fini che si possono attribuire a fluttuazioni casuali, a una più o meno nota imprecisione numerica o alla fiducia che si ha nei dati stessi.

Diverse sono le metodologie di *Statistical binning* per determinare il numero e l'ampiezza opportuna delle classi in cui ripartire un set di dati, in funzione della numerosità del campione e della varianza, tra cui:

- $r = 1 + 3.3 \log (N)$ Sturges (1926)
- $r = 1 + 2.2 \log (N)$ Larson (1975)
- $r = \frac{(max-min)}{3.49 \sigma N^{\frac{1}{3}}}$ Scott (1979)

Dopo aver preso in esame le principali relazioni disponibili, si è scelta una curva di ripartizione in **26 classi** (aperte sul limite superiore e chiuse su quello inferiore), con **ampiezza pari a 50 unità di $10^3 \left| \overline{V}_c \right|$** : in base a

tali assunzioni è stata ricavata la curva di frequenza cumulata di $10^3 |\vec{V}_c|$, riportata nel grafico della figura seguente avente come ascissa il valore centrale della classe:

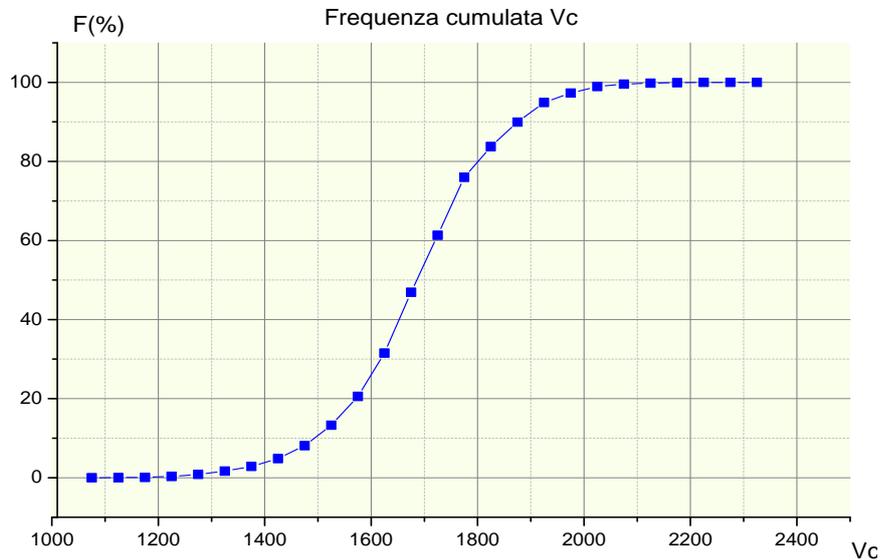


Figura 10.

La curva di distribuzione così ottenuta è stata quindi messa a confronto con quella relativa al prodotto $np |\vec{V}_c|$ (prodotto del modulo del Vettore climatico per il coefficiente np dipendente dal numero di unità abitative e superfici delle abitazioni) che, come detto in precedenza, può essere considerato l' "immagine energetica" del Vettore climatico, in quanto proporzionale agli spazi abitativi presenti in un determinato comune e quindi, potenzialmente, climatizzabili (figura 11).

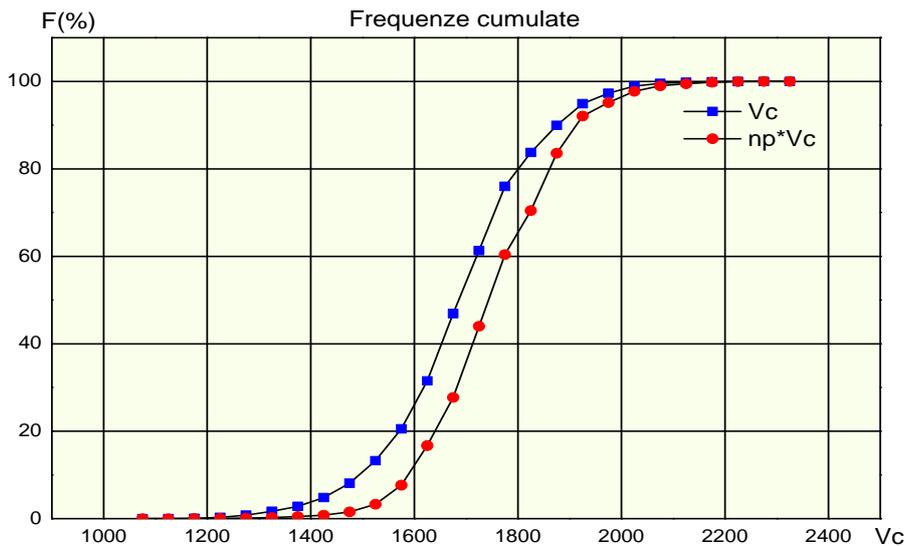


Figura 11.

La curva di frequenza di $np|\vec{V}_c|$, come evidente, ha un andamento a "sigmoide" sostanzialmente simile a quello di $|\vec{V}_c|$, in cui è possibile distinguere tre diversi tratti: due tratti praticamente asintotici nella parte iniziale e finale, ed un tratto, sostanzialmente lineare, nella zona centrale. Nella figura seguente la distribuzione è stata quindi approssimata (minimi quadrati) con una curva logistica. Da notare che in ascissa è sempre riportato il valore centrale della classe.

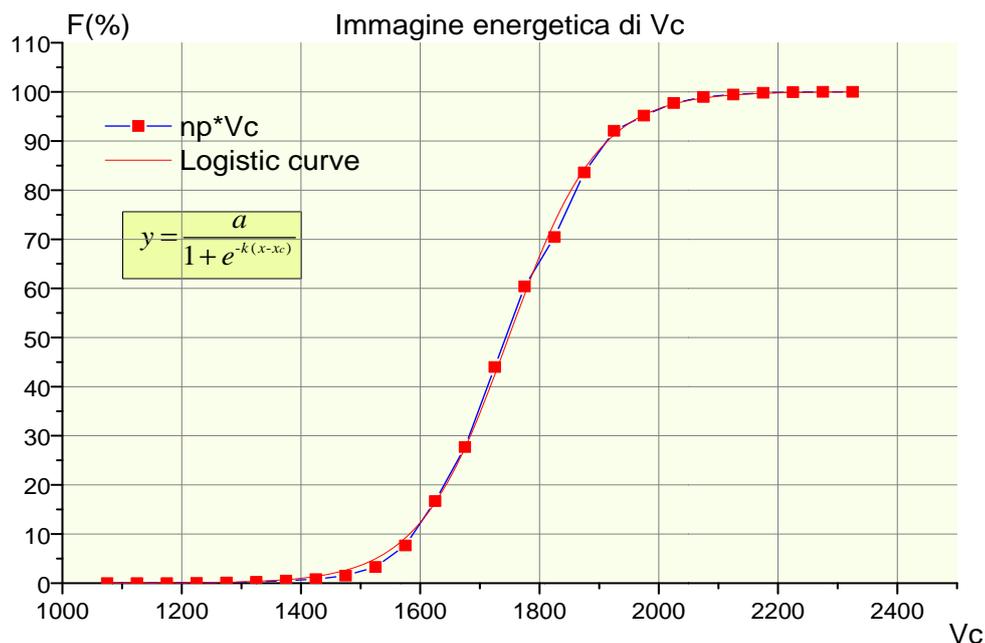


Figura 12.

Dall'analisi della distribuzione si è cercato di individuare una suddivisione in classi climatiche che consentisse di poter valutare, per ogni classe, l'incidenza energetica sul potenziale consumo energetico nazionale: in quest'ottica l'andamento della curva di frequenza, ha suggerito una ripartizione di 3 classi chiuse ed "equienergetiche" nel tratto centrale e due classi aperte nelle zone estreme.

Una ragionevole suddivisione conforme a tale criterio, è stata individuata ipotizzando un'incidenza del **15%** per le due classi estreme aperte (classi A ed E) e rispettivamente del **23,33%** per le tre classi chiuse centrali (B, C ed D), che insieme rappresentano, infatti, il 70% del fabbisogno energetico potenziale per la climatizzazione estiva.

I valori di $|\vec{V}_c|$ corrispondenti alle classi così definite, sono stati individuati sulla curva di frequenza approssimata con la funzione di tipo logistico.

Sono di seguito riportati il grafico della classificazione effettuata e una tabella con i valori limite di $|\vec{V}_c|$ delle varie classi climatiche e la potenziale incidenza energetica.

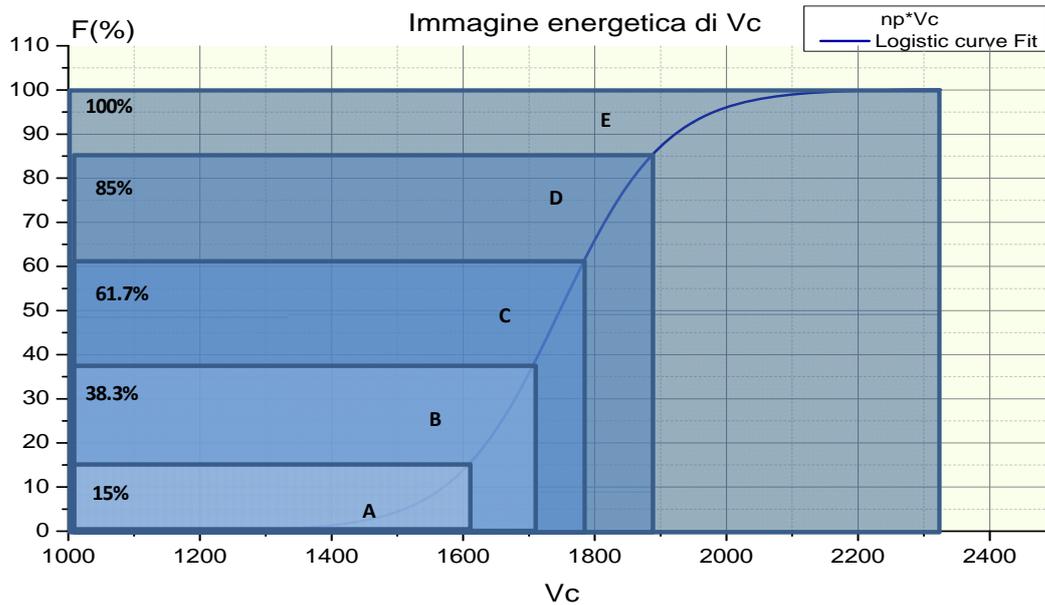


Figura 13.

Classe	F(%)	Vc range	Incidenza energetica (%)
A	15	<1610	15
B	38.3	1610-1709	23.3
C	61.7	1710-1789	23.3
D	85	1790-1889	23.3
E	100	>=1890	15

Tabella 2.

Le classi aperte, nelle zone estreme, sono caratterizzate da un range più ampio in termini di $|\bar{V}_c|$, e questo dovrebbe evitare l'esistenza di classi in cui ricadono solo poche località, caratterizzate o da condizioni climatiche più severe o, all'opposto da piccola incidenza energetica.

Il grafico di sintesi, riportato nella figura seguente, mostra un quadro d'insieme delle classi individuate, delle incidenze energetiche e i corrispondenti valori limite del Vettore climatico, ottenuti dall'analisi delle due curve di distribuzione esaminate.

Distribuzione e intervalli delle classi climatiche

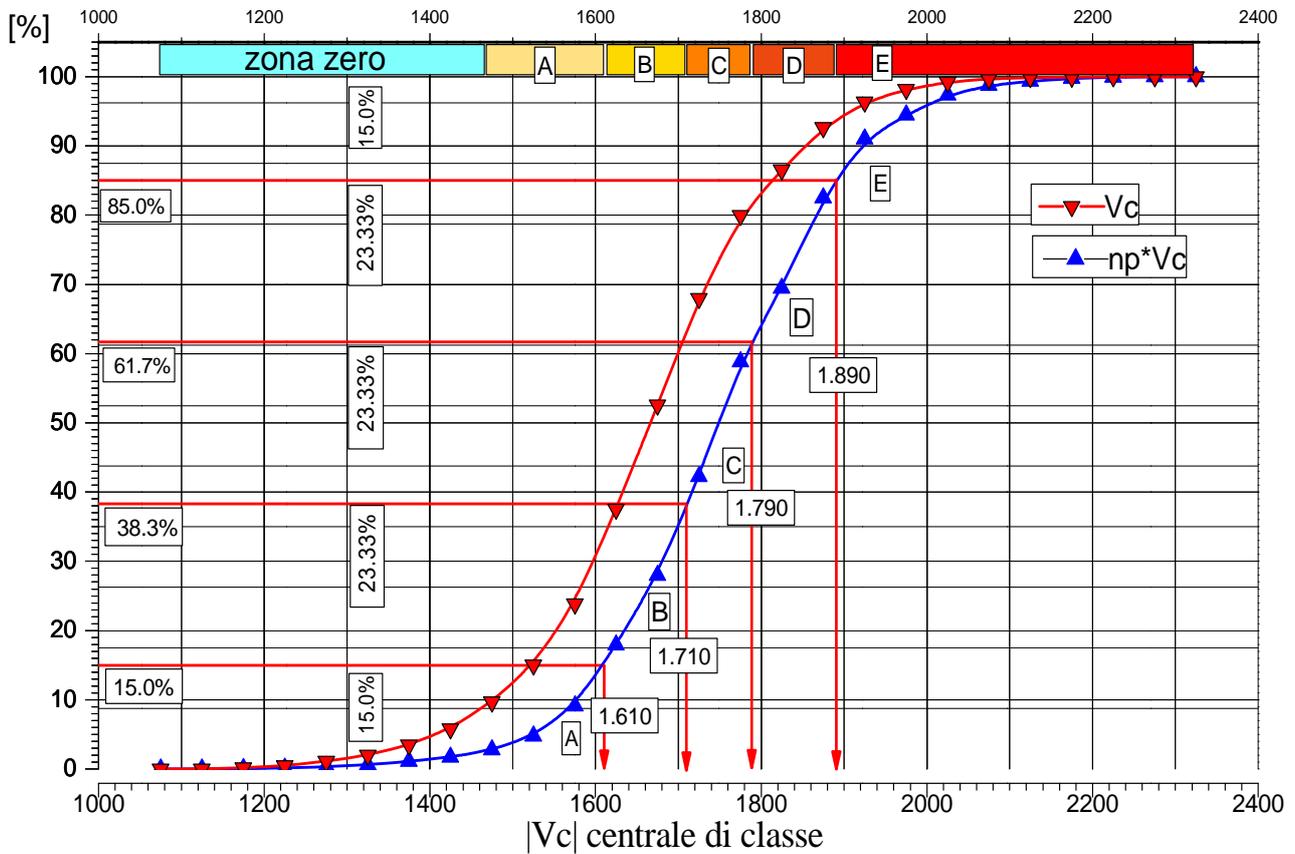


Figura 14

La definizione di classi climatiche e di una corrispondente incidenza energetica, seppur potenziale, può costituire un utile supporto per il legislatore nel momento in cui, in analogia a quanto fatto per il riscaldamento, saranno fissati dei limiti al fabbisogno energetico per la climatizzazione estiva, differenziati per area geografica.

Viene di seguito riportata una tabella di sintesi con i valori limite e centrali delle classi climatiche e i corrispondenti valori delle frequenze cumulate di $np|\bar{V}_c|$. Per completezza è riportato anche l'istogramma relativo alla discretizzazione effettuata e alla sua approssimazione logistica basata sui valori centrali.

Limiti di classe			Frequenza cumulata
limite sup. <	limite inf. <=	centrale di classe	$np \bar{V}_c $
1100	1050	1075	0.000
1150	1100	1125	0.012
1200	1150	1175	0.052
1250	1200	1225	0.111
1300	1250	1275	0.324
1350	1300	1325	0.577
1400	1350	1375	1.105
1450	1400	1425	1.764
1500	1450	1475	2.870
1550	1500	1525	5.008
1600	1550	1575	9.562
1650	1600	1625	18.327
1700	1650	1675	28.893
1750	1700	1725	44.214
1800	1750	1775	60.090
1850	1800	1825	70.196
1900	1850	1875	82.955
1950	1900	1925	91.147
2000	1950	1975	94.448
2050	2000	2025	97.321
2100	2050	2075	98.780
2150	2100	2125	99.340
2200	2150	2175	99.749
2250	2200	2225	99.960
2300	2250	2275	100.000
2350	2300	2325	100.000

Tabella 3.

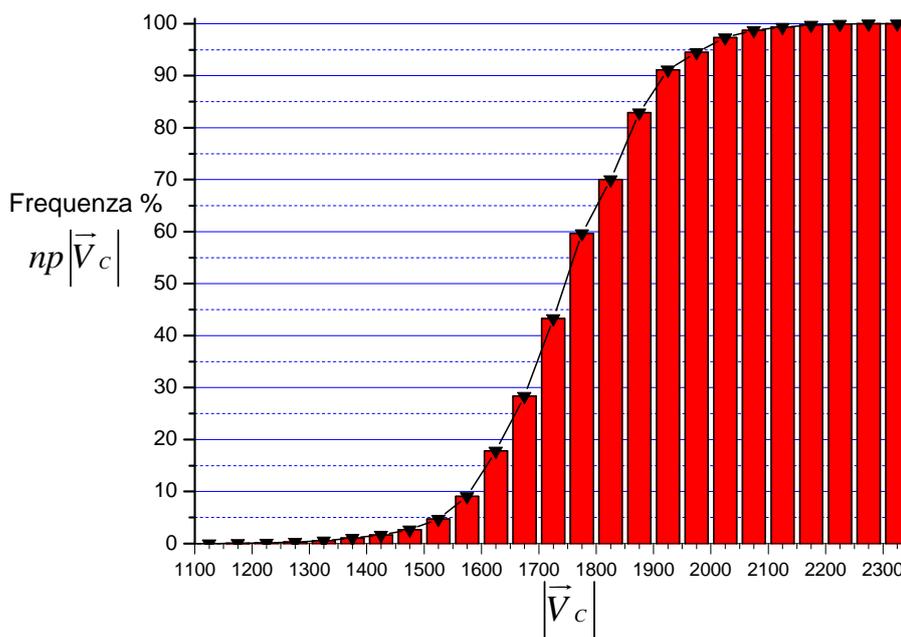


Figura 15.

3.4 La distribuzione dei comuni italiani secondo le nuove classi climatiche

La rimodulazione del numero delle classi climatiche estive, passate da sette (da A a G) a cinque (da A a E) ha comportato una ricollocazione dei comuni italiani nell'ambito delle singole classi rispetto a quanto riportato in [3]. Una sintesi nella nuova classificazione è proposta nella tabella seguente.

Classe climatica		Comuni
$10^3 \left \vec{V}_c \right $		n
1610 < A	A	2228
1610 ≤ B < 1710	B	2418
1710 ≤ C < 1790	C	1730
1790 ≤ D < 1890	D	1053
1890 ≤ E	E	665

Tabella 4. Numero di località per classe climatica estiva

In termini di numerosità delle classi, nella A e nella B troviamo quasi il 60% dei comuni italiani, mentre nella classe E a più alta severità climatica, sono presenti circa l'8% dei comuni italiani, situati principalmente nelle regioni del sud Italia e nelle isole.

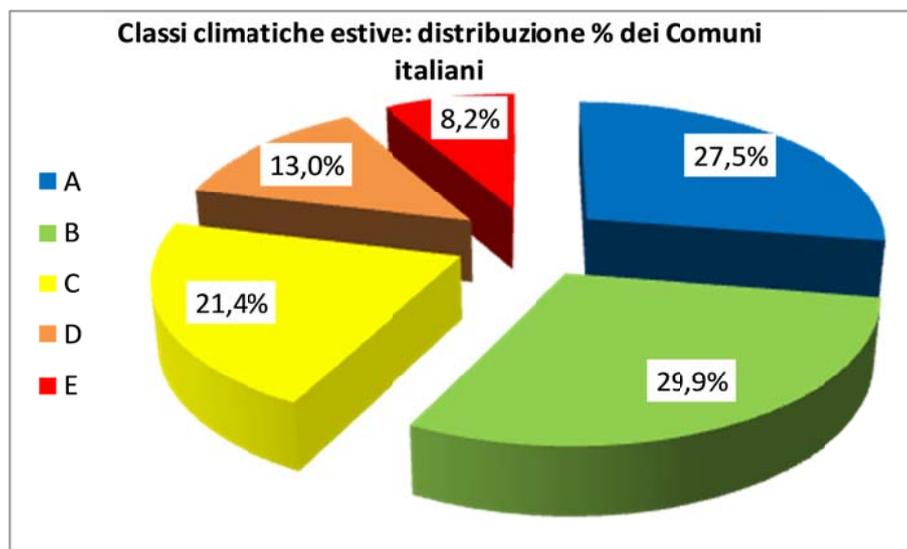


Figura 16. Distribuzione % dei comuni italiani per classe climatica estiva

Nella figura seguente è rappresentata una mappa riepilogativa della distribuzione geografica italiana delle classi climatiche estive.

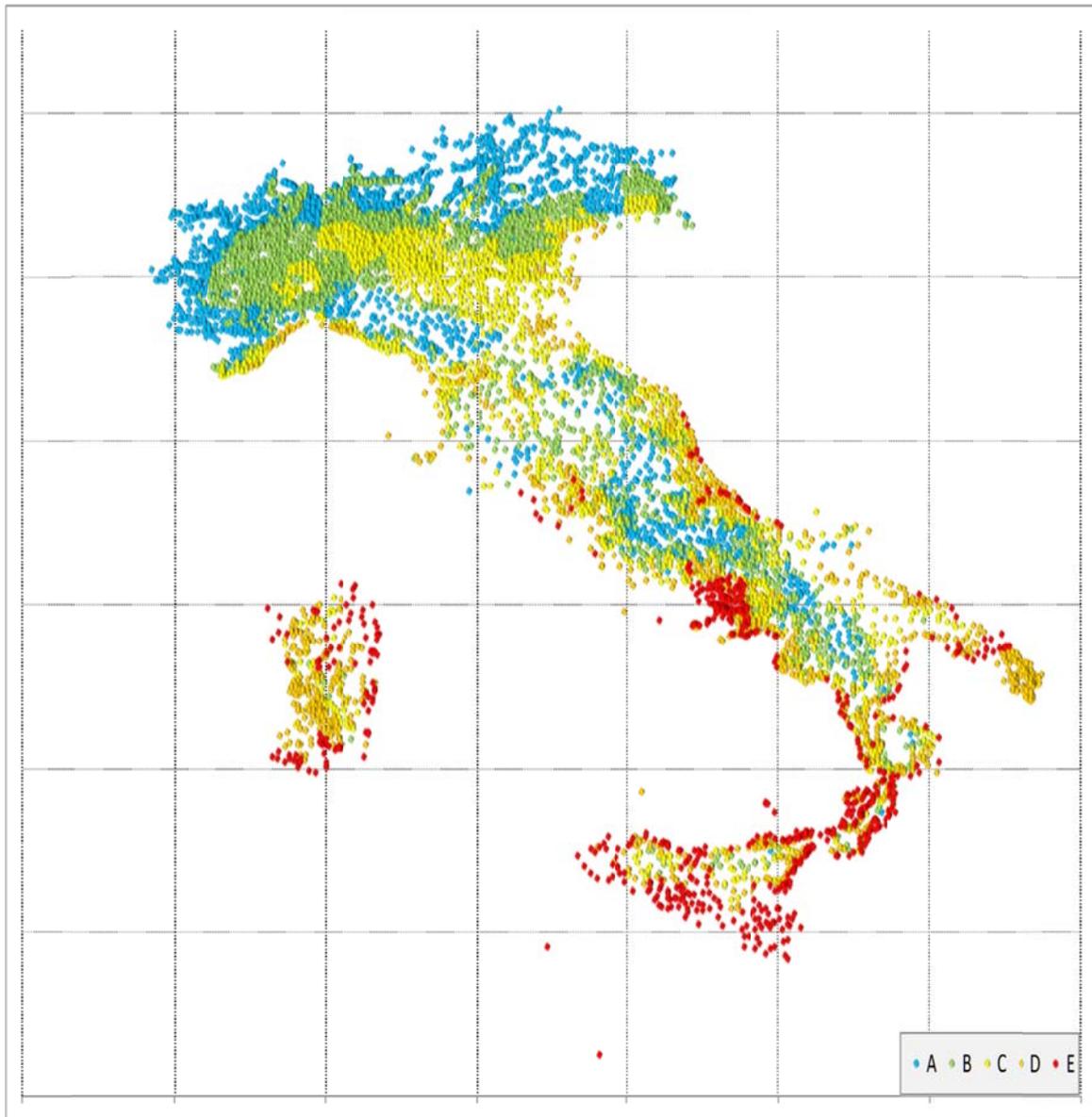


Figura 17. Distribuzione geografica nazionale delle classi climatiche estive

Dalla lettura della mappa risulta evidente che la classe climatica A interessa principalmente le zone alpine e appenniniche, mentre la classe climatica E le zone costiere del sud Italia e delle isole.

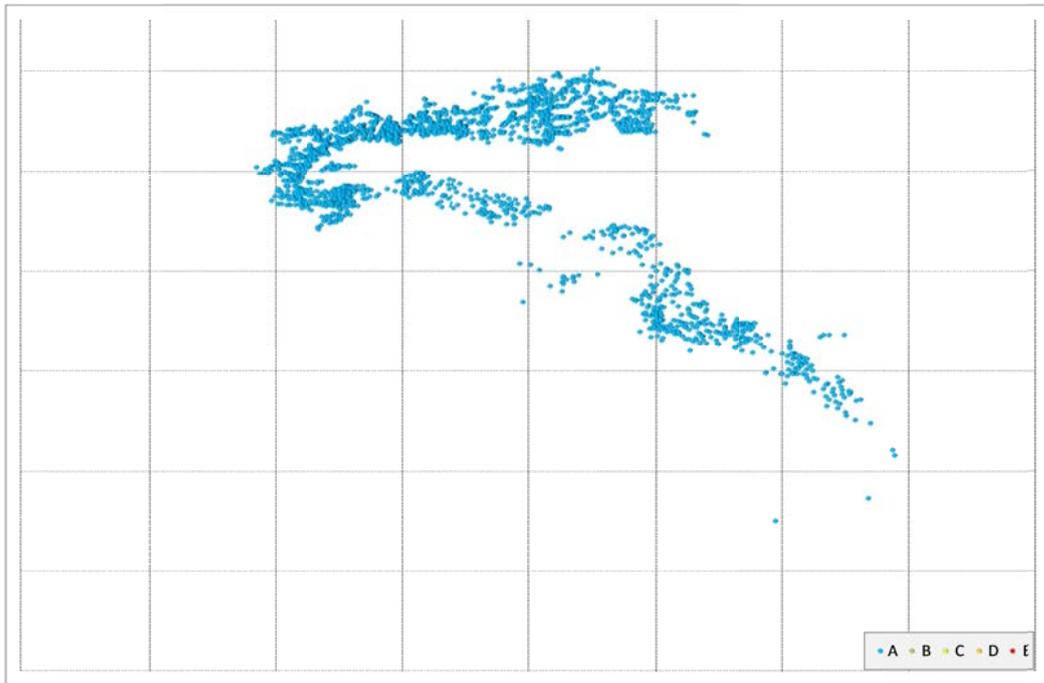


Figura 18. Distribuzione geografica nazionale della classe climatica A

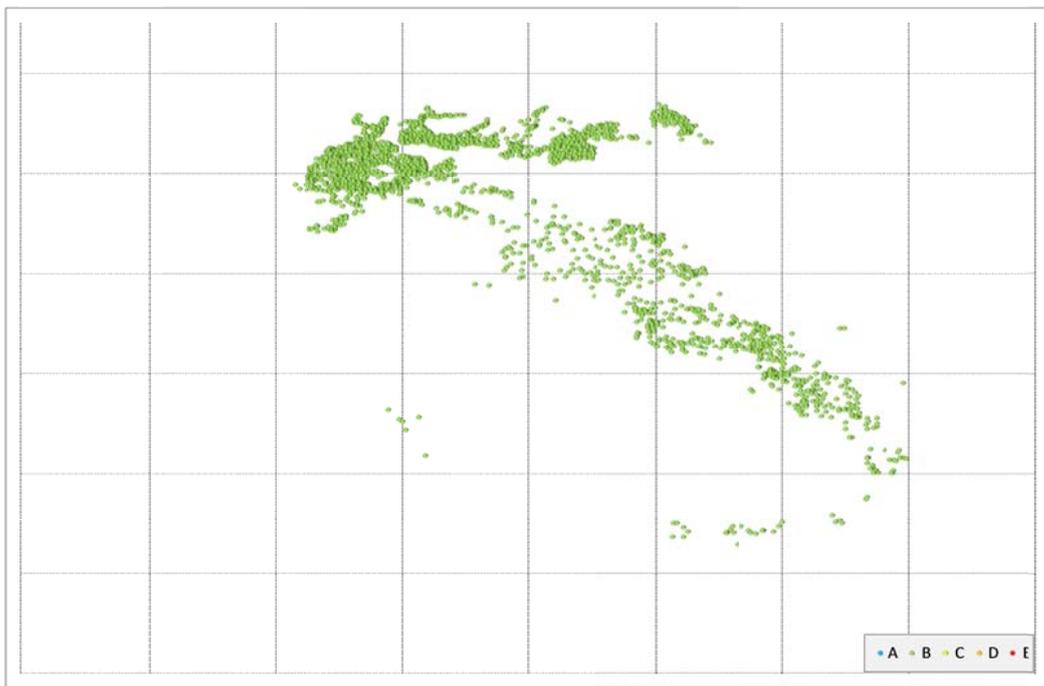


Figura 19. Distribuzione geografica nazionale della classe climatica B

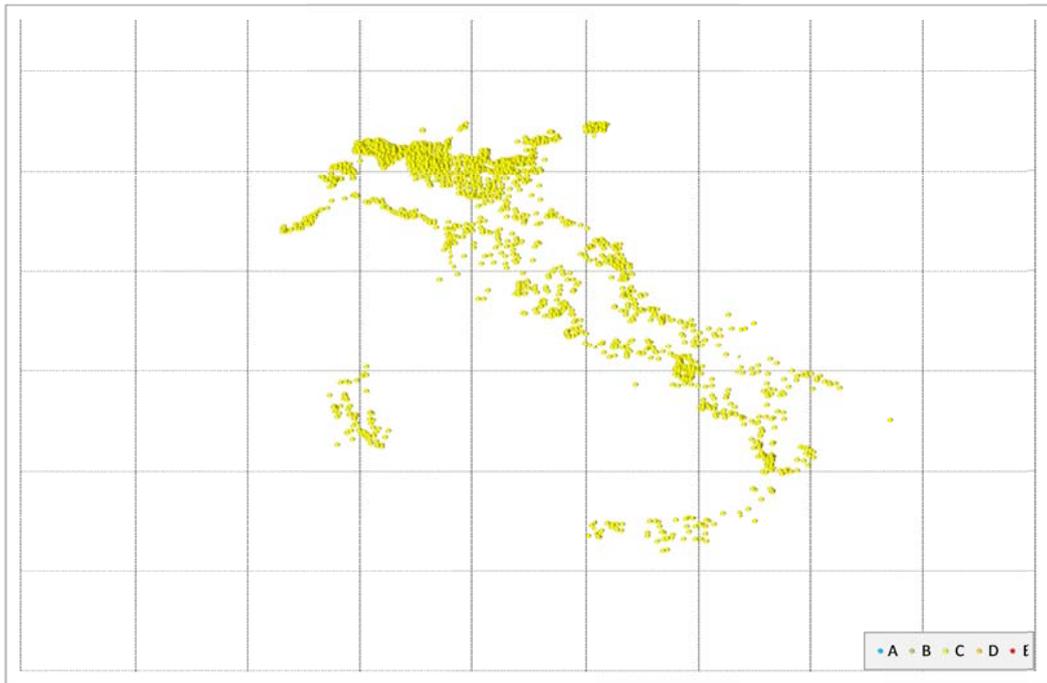


Figura 20. Distribuzione geografica nazionale della classe climatica C

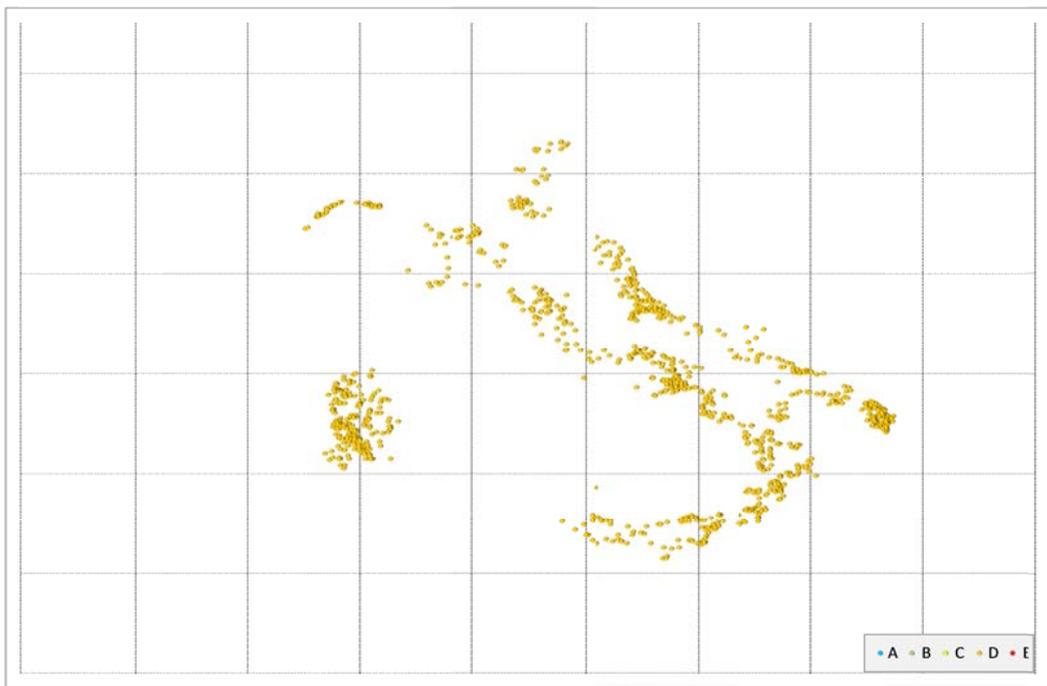


Figura 21. Distribuzione geografica nazionale della classe climatica D

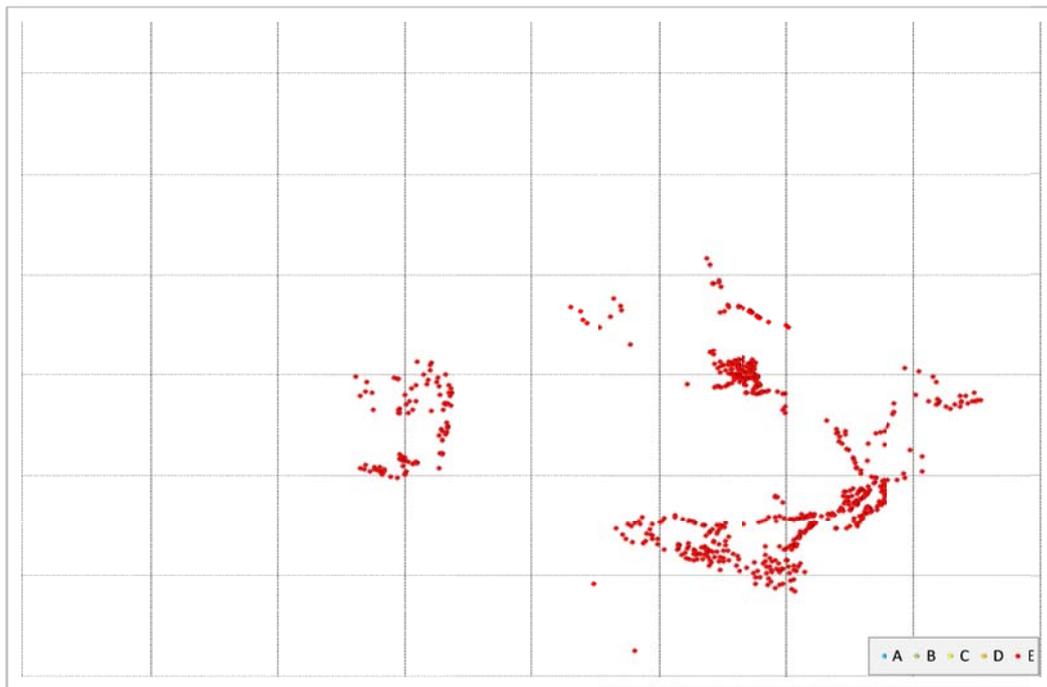


Figura 22. Distribuzione geografica nazionale della classe climatica E

Nella tabella che segue viene riportata, sotto forma di matrice, la distribuzione del numero dei comuni italiani in funzione delle classi climatiche estive ed invernali (si ricorda che da A a E cresce la severità climatica). Delle possibili 25 coppie di classi, ne risultano presenti solo 17.

		Classe climatica invernale				
		A e B	C	D	E	F
Classe climatica estiva	A			24	1142	1062
	B		1	298	2107	11
	C		72	678	979	
	D	8	475	526	46	
	E	151	437	76		

Tabella 5. Distribuzione dei comuni italiani in funzione delle classi climatiche estive ed invernali

Si osserva, come manifestamente atteso, una discreta diagonalizzazione della matrice che sarebbe ancor più evidente se anche le classi invernali fossero riorganizzate con lo stesso criterio delle classi estive proposte. Questo fatto sarebbe propedeutico alla individuazione di cinque classi climatiche per la climatizzazione annuale (estate + inverno).

3.5 La distribuzione della popolazione italiana secondo le nuove classi climatiche

La definizione delle classi climatiche estive basata sulla corrispondente incidenza energetica, ha come evidente conseguenza la concentrazione della popolazione italiana nell'ambito delle classi con il più alto potenziale energetico (oltre il 70%).

Una sintesi della distribuzione della popolazione è proposta in figura 23.

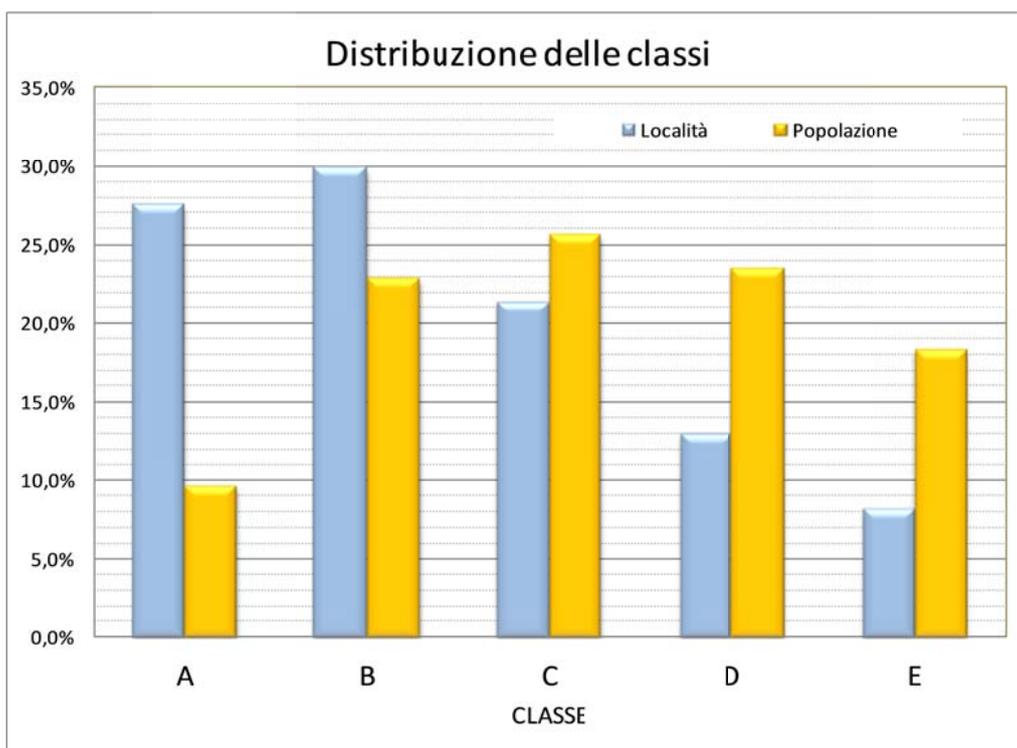


Figura 23. Distribuzione delle classi climatiche estive

Nei diagrammi che seguono sono riportate le distribuzioni regionali della popolazione italiana, in funzione delle singole classi climatiche.

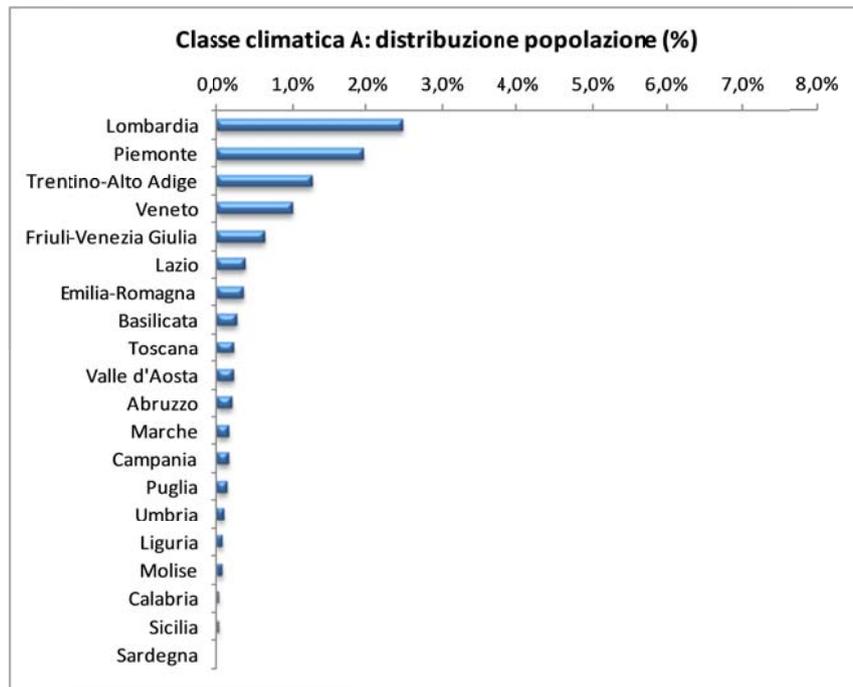


Figura 24. Quadro regionale della distribuzione % della popolazione - Classe climatica estiva A

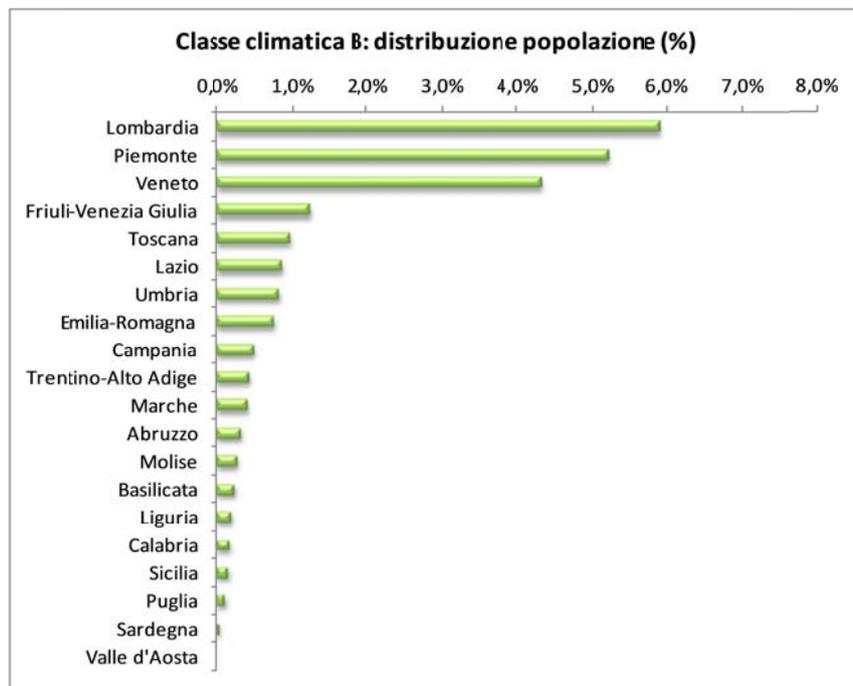


Figura 25. Quadro regionale della distribuzione % della popolazione - Classe climatica estiva B

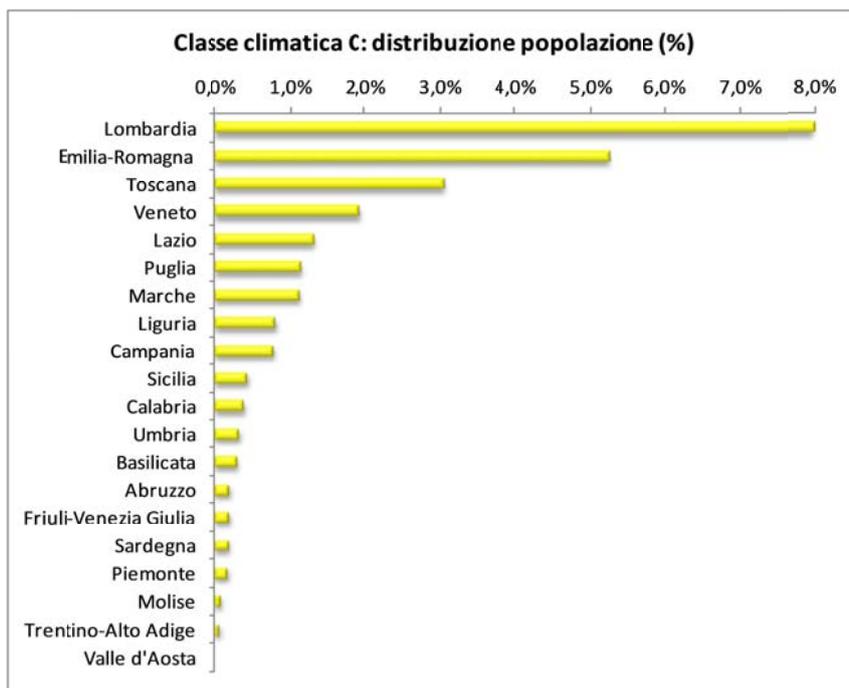


Figura 26. Quadro regionale della distribuzione % della popolazione - Classe climatica estiva C

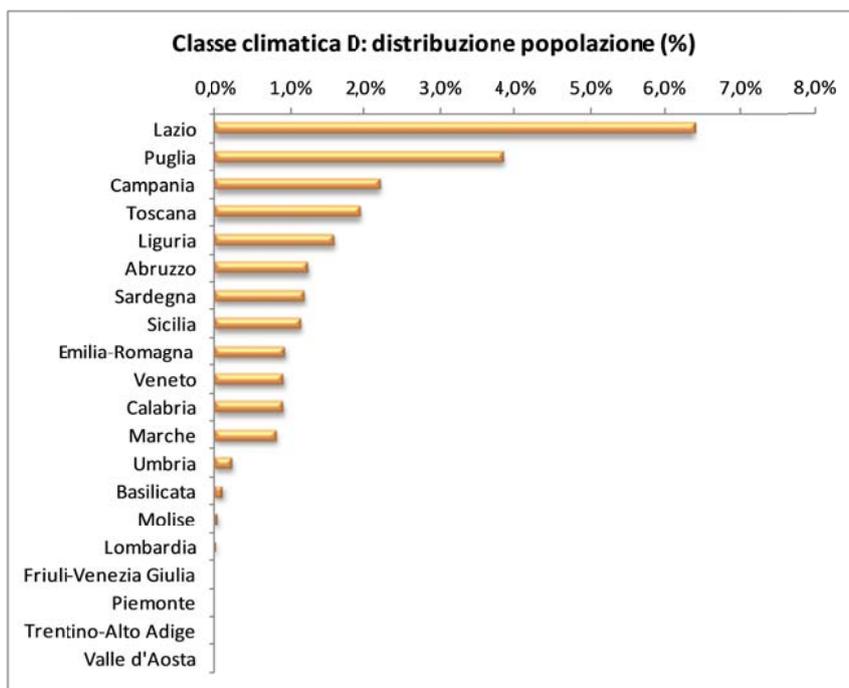


Figura 27. Quadro regionale della distribuzione % della popolazione - Classe climatica estiva D

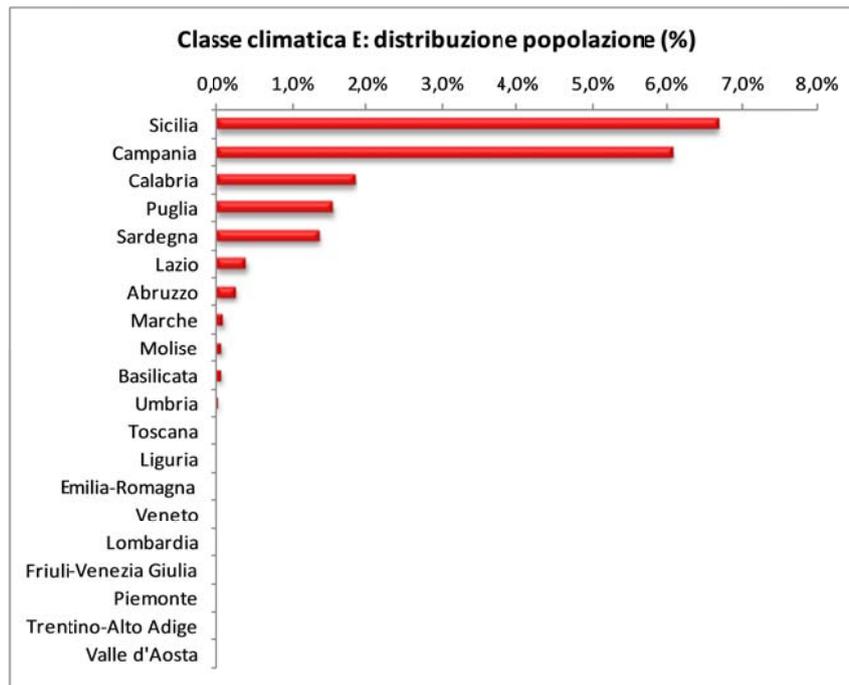


Figura 28. Quadro regionale della distribuzione % della popolazione - Classe climatica estiva D

3.6 La distribuzione regionale del peso energetico secondo le nuove classi climatiche

Una sintesi della distribuzione a livello regionale del peso energetico in accordo con la nuova classificazione proposta è illustrata dalle figure seguenti⁴.

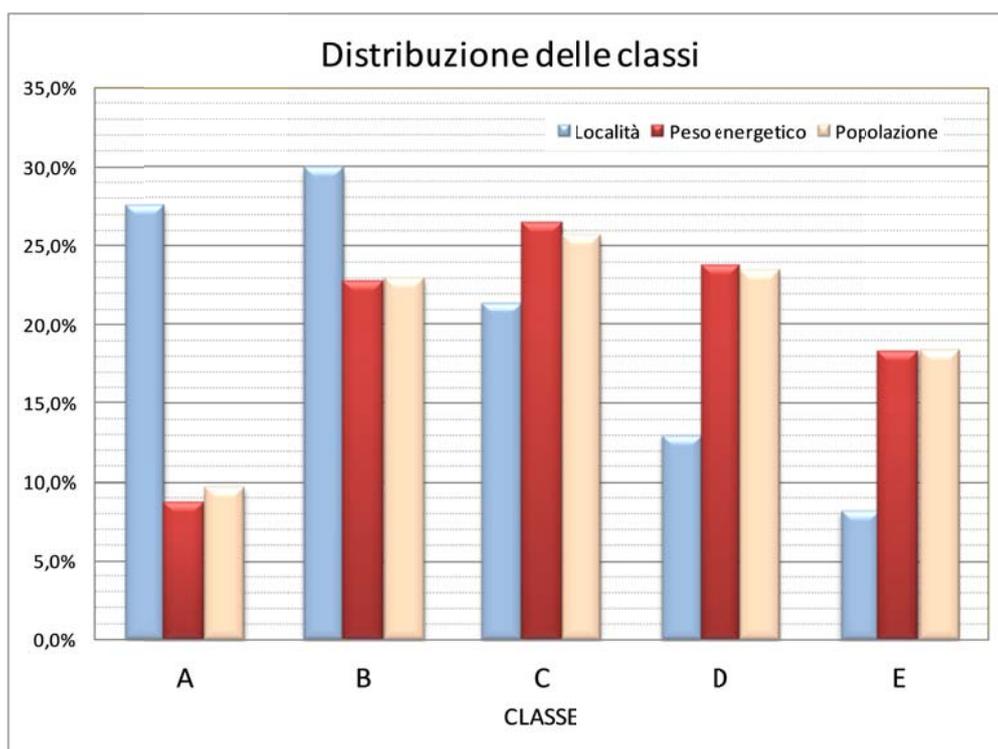


Figura 29

⁴ Il lettore attento noterà che rispetto al *target* di ripartizione dell'importanza percentuale delle classi (15%, 23.3%, 23.3%, 23.3% e 15%) che ci si era prefisso e che era basato sulla curva di distribuzione continua rispetto ai valori centrali delle classi del modulo del vettore climatico, il valore dell'importanza percentuale è leggermente cambiato. Questo effetto è dovuto al fatto che, una volta stabilite le nuove classi ed i relativi limiti inferiore (chiuso) e superiore (aperto), si è ritornati a una distribuzione discreta, riassegnando i singoli valori alle nuove classi. Se si volesse un rispetto maggiormente stringente delle ripartizioni iniziali imposte sarebbe necessario aumentare la discretizzazione dei dati iniziali passando ad un numero di classi superiore alle ventisei scelte, già ritenute statisticamente sufficienti: sarebbe, nell'opinione degli autori, una inutile e vana ricerca di accuratezza, lontano dallo spirito che dovrebbe animare lo statistico che non deve chiedere ai dati più di quanto questi possono fornire.

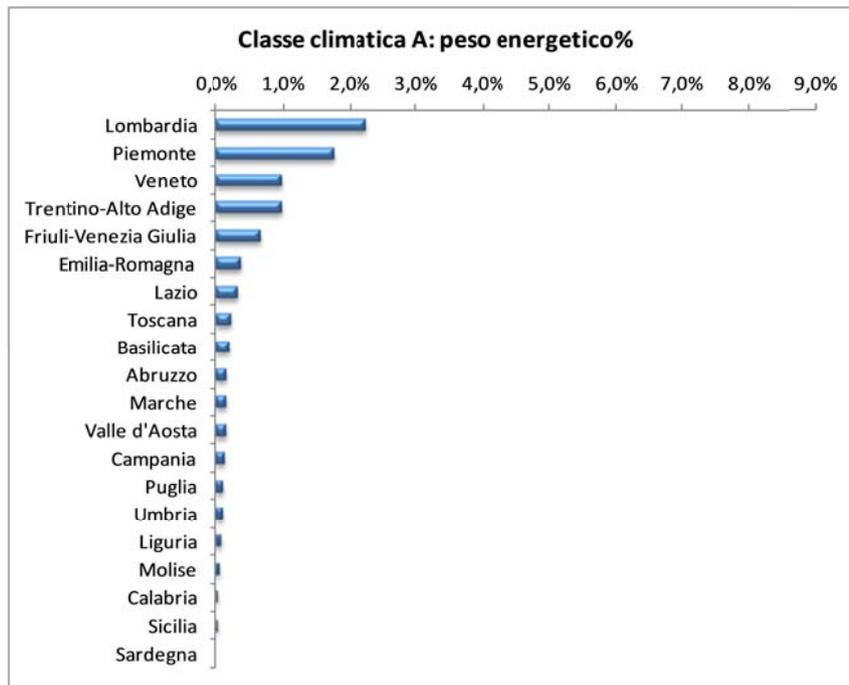


Figura 30. Peso energetico % della classe climatica estiva A - Quadro regionale

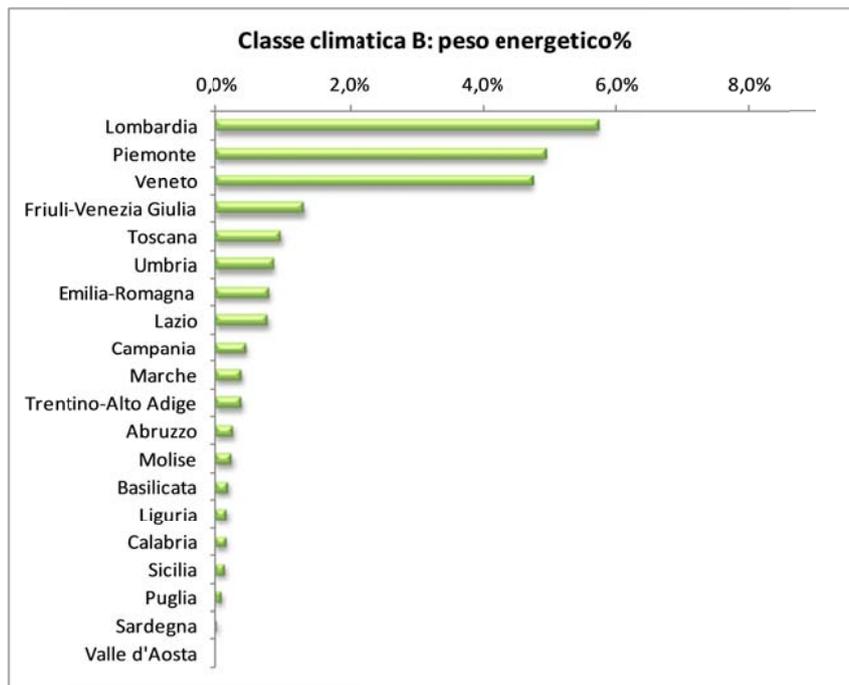


Figura 31. Peso energetico % della classe climatica estiva B - Quadro regionale

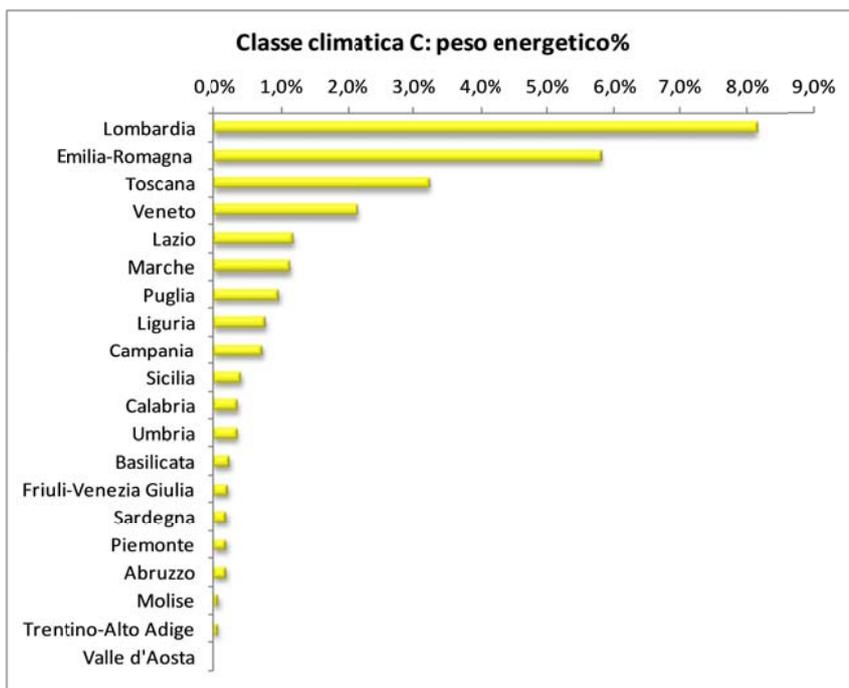


Figura 32. Peso energetico % della classe climatica estiva C - Quadro regionale

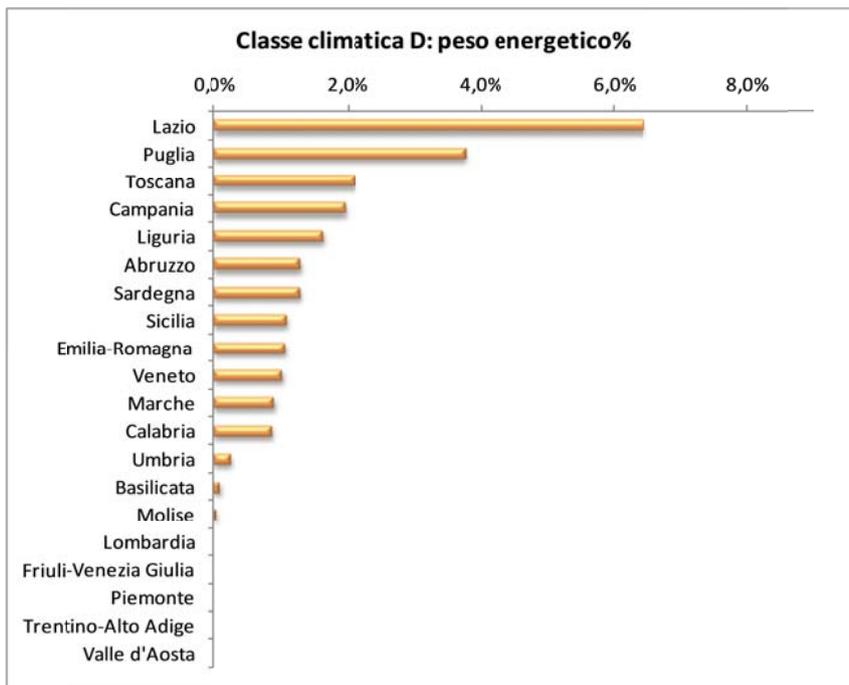


Figura 33. Peso energetico% della classe climatica estiva D - Quadro regionale

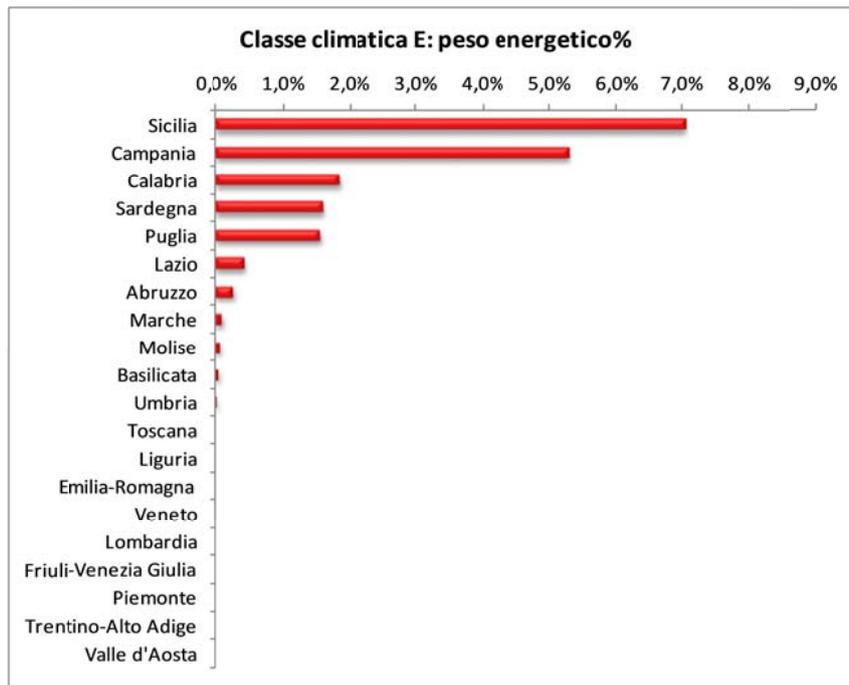


Figura 34. Peso energetico % della classe climatica estiva E - Quadro regionale

4 La durata del periodo di climatizzazione estiva

La metodologia dell'indice di severità climatica, finalizzata all'individuazione di un parametro (modulo del vettore climatico) che consentisse la zonizzazione climatica estiva del territorio nazionale in quanto immagine speculare del fabbisogno energetico per la climatizzazione, definiva questo parametro come valore integrale esteso al periodo convenzionale $T= 4392$ h (15 aprile – 15 ottobre), comune per tutte le località di calcolo, coerentemente con la necessità di stabilire una scala di severità climatica.

Il periodo di calcolo era stato opportunamente scelto in modo da contenere tutti i periodi di effettiva necessità di climatizzazione estiva (per mantenere cioè negli edifici le condizioni di comfort) delle località del territorio nazionale. All'interno di questo periodo T ci sono, naturalmente, località dove la necessità di climatizzazione gli edifici si manifesta per periodi di durata inferiore a T , con tempi d'inizio e fine differenti.

Per determinare, nelle varie località, il tempo d'inizio t_s e fine t_e delle climatizzazioni, è necessario definire l'indice di severità climatica e la sua controparte modulo del vettore climatico $|\vec{V}_C|$, al tempo corrente t con $0 \leq t \leq T$. Si vedrà nel seguito che è così possibile definire questi due valori del tempo (e quindi la durata del periodo di climatizzazione), attraverso le proprietà del solo modulo del vettore climatico corrente, in perfetta analogia con quanto si fa nel caso invernale attraverso l'utilizzo dei gradi-giorno invernali. *Arrivare a questo risultato richiede un po' di sviluppo matematico; se ne chiede venia al lettore interessato, senza alcuna colpa ovviamente, al solo risultato.*

4.1 Definizione del modulo del vettore climatico corrente $|\vec{V}_C(t)|$

La definizione è la stessa di quella vista in precedenza, con la sola variazione che le grandezze coinvolte sono calcolate come grandezze integrali (cumulate) tra il tempo convenzionale $t=0$, corrispondente all'ora 0 del 15 aprile, e il tempo corrente t . I fattori di normalizzazione Θ_* , X_* e Υ_* sono, invece, tenuti invariati.

$$|\vec{V}_C| = \sqrt{\dot{\Theta}_e^2 + \dot{X}_e^2 + \dot{\Upsilon}_e^2}$$

$$\dot{\Theta}_e(t) = \frac{\frac{1}{t} \int_0^t \vartheta_e dt}{\Theta_*} = \frac{\Theta_e(t)}{\Theta_*} \quad \text{con} \quad \Theta_* = \frac{1}{n} \sum_n \frac{1}{T} \int \vartheta_e dt$$

$$\dot{X}_e(t) = \frac{\frac{1}{t} \int_0^t x_e dt}{X_*} = \frac{X_e(t)}{X_*} \quad \text{con} \quad X_* = \frac{1}{n} \sum_n \frac{1}{T} \int x_e dt$$

$$\dot{\Upsilon}_e(t) = \frac{\frac{1}{t} \int_0^t I_0 dt}{\Upsilon_*} = \frac{\Upsilon_e(t)}{\Upsilon_*} \quad \text{con} \quad \Upsilon_* = \frac{1}{n} \sum_n \frac{1}{T} \int I_0 dt$$

È, ovviamente:

$$\lim_{t \rightarrow T} |\vec{V}_C(t)| = |\vec{V}_C(T)|$$

È facile verificare che, se i valori di riferimento per temperatura, umidità specifica e irradiazione solare si considerano costanti è:

$$|\vec{V}_{C,ref}(t)| = |\vec{V}_{C,ref}(T)| = V_C^* = \text{cost}$$

Per quanto riguarda l'altro parametro del modello lineare dell'indice di severità climatica, $k(\mu)$, che rappresenta le caratteristiche d'inerzia termica dell'edificio, si vedrà nel seguito come è affetto sia dal tempo corrente che dalle condizioni climatiche iniziali dell'edificio (appendice 2).

4.2 Il calcolo del modulo del vettore climatico corrente $|\vec{V}_C(t)|$

Per il calcolo del modulo del vettore climatico corrente sono necessari i valori, per una località assegnata, della temperatura e dell'umidità specifica dell'aria esterna e dell'irradiazione solare sul piano orizzontale al tempo corrente t .

Dai valori medi mensili di tali grandezze, disponibili o comunque ricavabili dalla norma UNI 10349-94, il programma di calcolo dinamico TRNSYS 16, impiegato per la stima del fabbisogno energetico per la climatizzazione estiva per il set di edifici sui quali è stata verificata la consistenza del modello dell'indice di severità climatica, valuta i valori orari di temperatura, umidità specifica e irradiazione solare attraverso un modello matematico proprio (Weather generator).

È quindi possibile calcolare il modulo del vettore climatico corrente con passo temporale orario nel periodo T di riferimento.

Le figure seguenti riportano un esempio dell'andamento del modulo del vettore climatico in funzione del tempo corrente, con passo temporale orario, per una località generica:

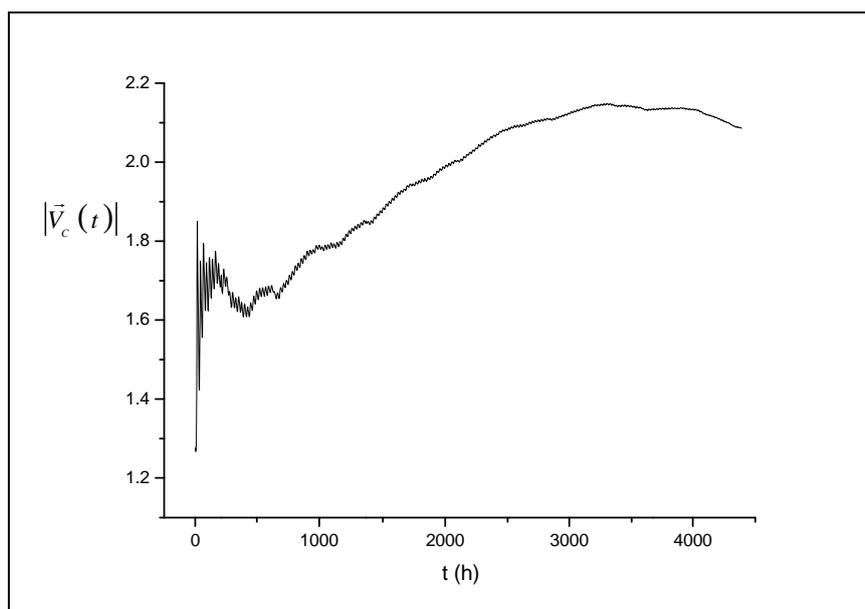


Figura 35a.

Un dettaglio della figura precedente:

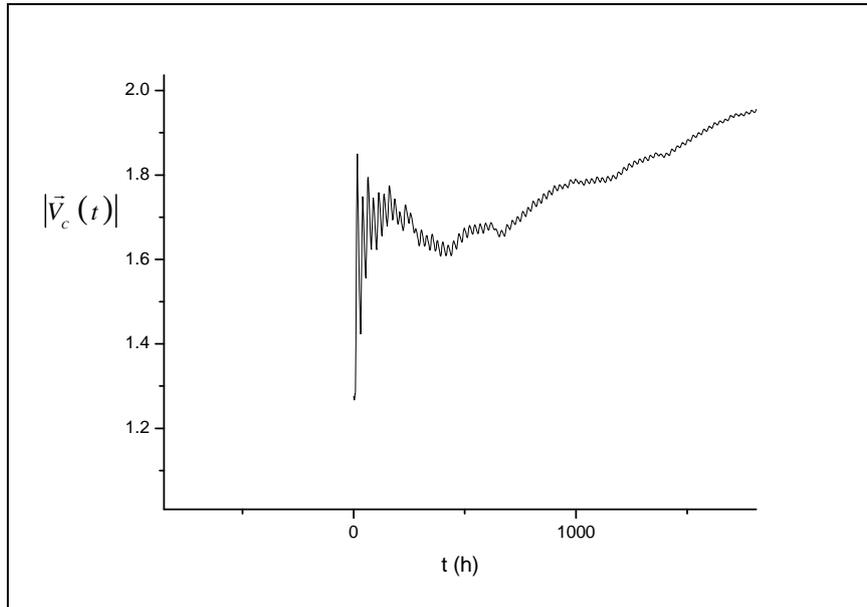


Figura 35b.

La funzione $|\vec{V}_c(t)|$ è dominata dall'andamento periodico delle funzioni componenti (temperatura, umidità specifica e irradiazione solare): si nota infatti una periodicità di 24 ore intorno ad un valore medio, evidenziata maggiormente nella seconda figura che riporta una parte ingrandita della prima. Queste oscillazioni si smorzano abbastanza velocemente al progredire del tempo.

Altra caratteristica dell'andamento del modulo del vettore climatico è la fase iniziale contraddistinta da una sovranelongazione (*overshoot*) sia del valore medio sia della componente oscillante.

Il grafico della funzione presenta, inoltre, un massimo in prossimità della fine del periodo di calcolo T .

Le caratteristiche descritte possono variare di entità (attenuandosi o esaltandosi) al cambiare della località di calcolo, cioè al cambiare dei valori di temperatura, umidità specifica e irradiazione solare, come illustrato dalla figura seguente:

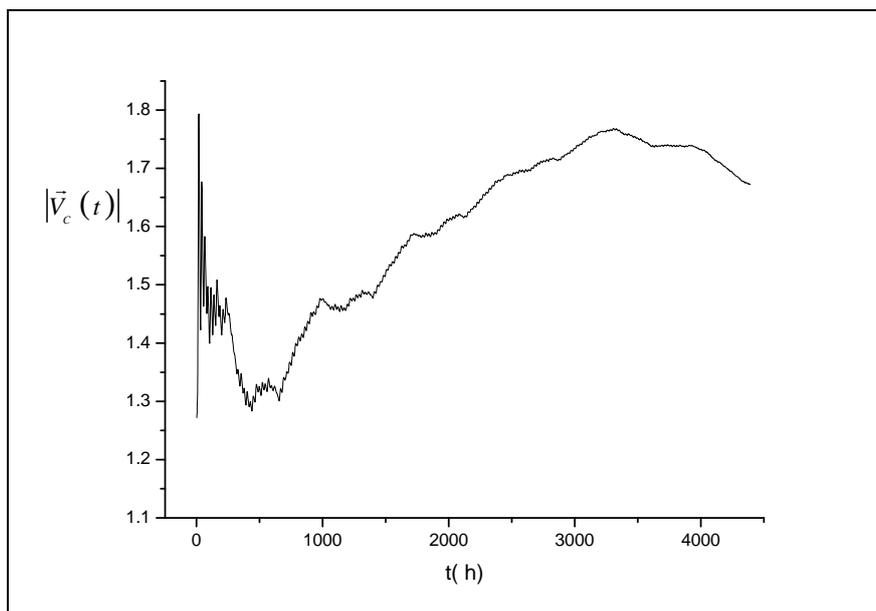


Figura 36.

Uno studio teorico della funzione $|\vec{V}_C(t)|$ che mette in risalto le caratteristiche prima evidenziate, presenti anche nel caso in cui la variabile t è continua, è riportato in appendice 1.

Dallo studio si evince che il comportamento della funzione dipende da come è stata definita e non dalla valutazione numerica (passo di calcolo orario) che ne è stata effettuata e se ne giustifica, inoltre, il comportamento in corrispondenza dell'origine dei tempi.

Viste queste caratteristiche, una rappresentazione opportunamente trasformata della funzione $|\vec{V}_C(t)|$ che ne colga le proprietà più importanti, significative ed utili per lo scopo di questo lavoro, e che contemporaneamente, la renda più "stabile" appare a questo punto necessaria.

4.3 Il filtraggio del modulo del vettore climatico corrente $|\vec{V}_C(t)|$

Tra le 20 località delle quali sono disponibili i dati per valutare il modulo del vettore climatico corrente, consideriamo Agrigento.

Il modulo del vettore ha l'andamento riportato nel grafico della seguente figura:

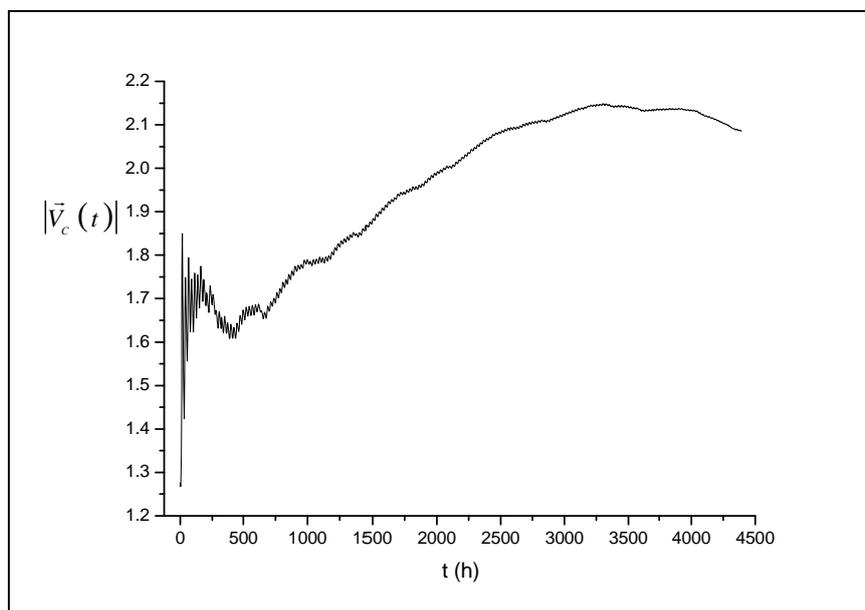


Figura 37.

Una rappresentazione più "stabile" si ottiene considerando la funzione $t|\vec{V}_C(t)|$ che non presenta la sovralongazione iniziale e limita le apparenti irregolarità, pur mantenendo il contenuto periodico delle 24 ore. Operando in tal modo non si alterano i dati di partenza, se ne dà solo una diversa rappresentazione.

Le figure successive illustrano la situazione:

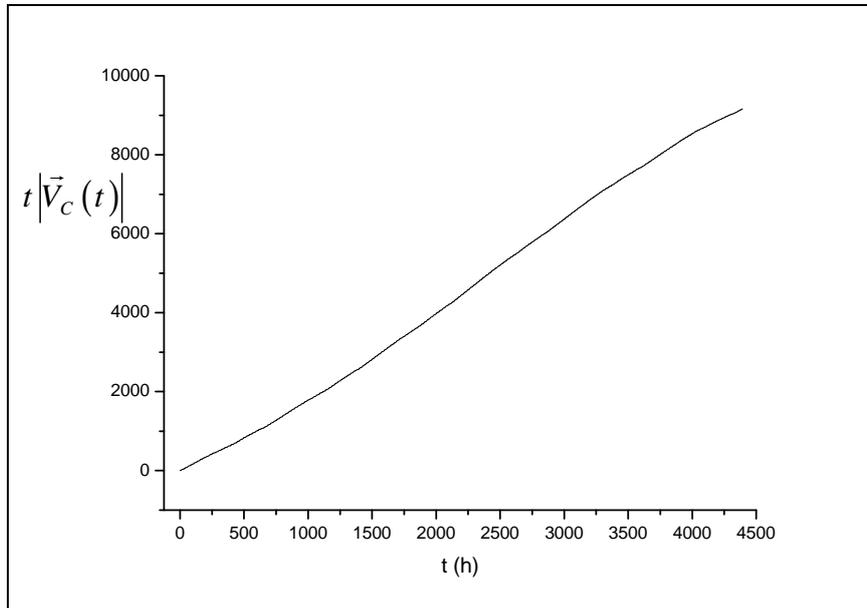


Figura 38a.

Un dettaglio della figura precedente:

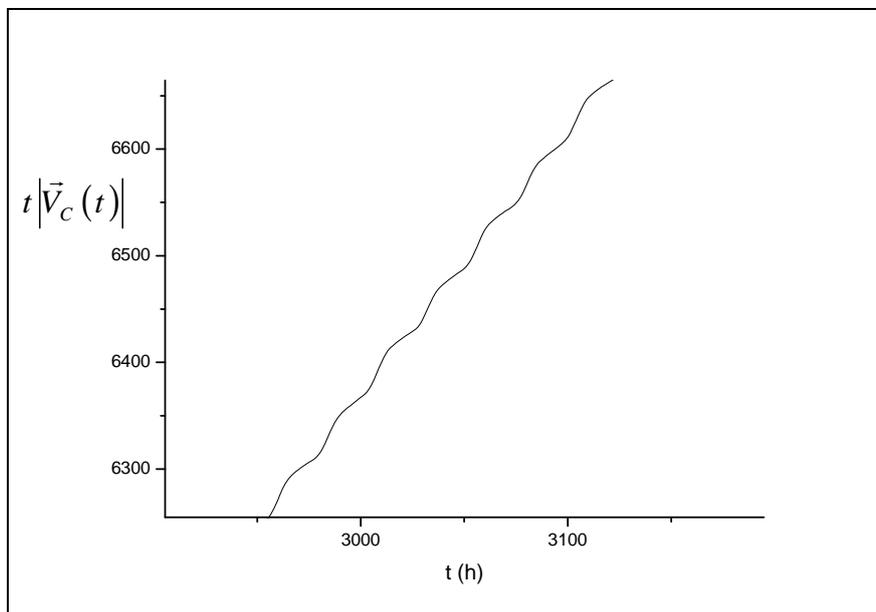


Figura 38b.

La funzione $|\vec{V}_C(t)|$ e quindi anche la funzione $t|\vec{V}_C(t)|$, per il modo in cui è stata costruita, ha componenti con periodo giornaliero, settimanale e mensile. Possiamo quindi adoperare una tecnica di filtraggio numerico, basata sull'algoritmo della *Fast Fourier Transform* (FFT) per isolarne le varie

componenti ed effettuare successivamente uno “*smoothing*” fisico e non puramente algebrico come avverrebbe impiegando una procedura di “*fitting*” ai minimi quadrati .

4.3.1 Applicazione di filtri passabasso alla funzione $t|\vec{V}_C(t)|$

I periodi delle componenti sono:

$$\tau_d = 24h \quad \text{giorno}$$

$$\tau_w = 168h \quad \text{settimana}$$

$$\tau_m = 720h \quad \text{mese}$$

Applicando un filtro passa basso con frequenza di taglio $\frac{1}{\tau_w}$ si eliminano le componenti variabili con frequenza superiore a questa soglia intorno al *trend* generale della funzione.

La figura illustra il risultato dell’applicazione di questo filtro:

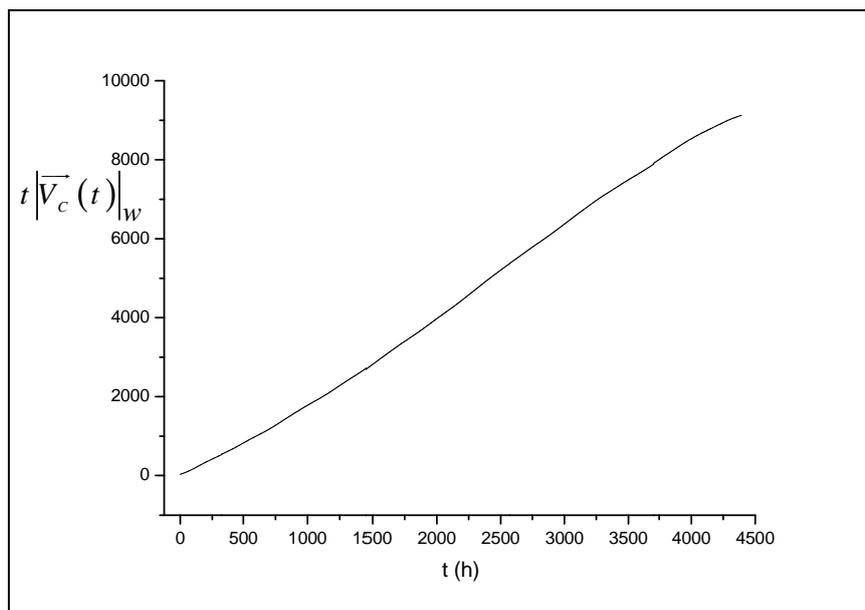


Figura 39a.

Un dettaglio della figura precedente: la periodicità a 24 ore è stata filtrata.

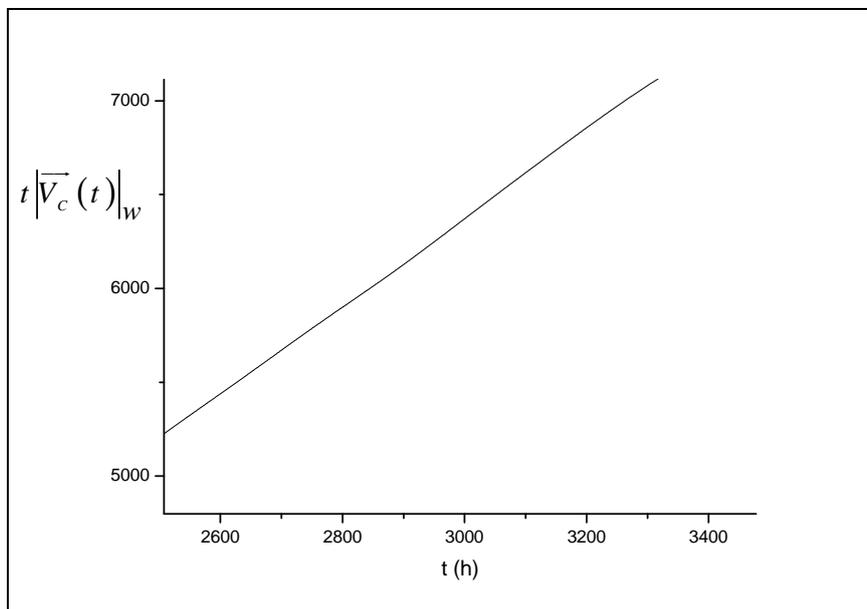


Figura 39b.

Se si applica un filtro passabasso con frequenza di taglio $1/\tau_m$ si ottiene $t|\overline{V}_c(t)|_m$:

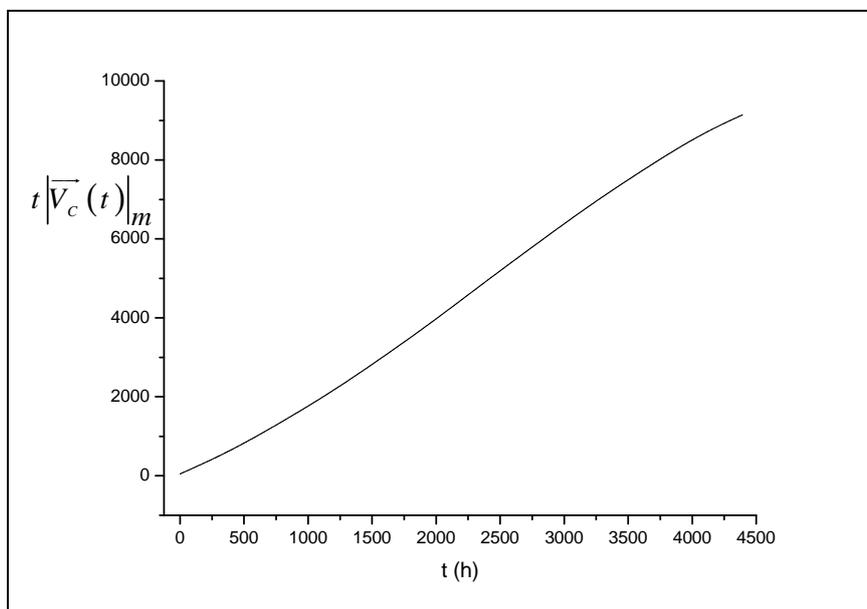


Figura 40.

Un confronto tra la funzione originale e la funzione filtrata evidenzia gli effetti dello *smoothing* effettuato:

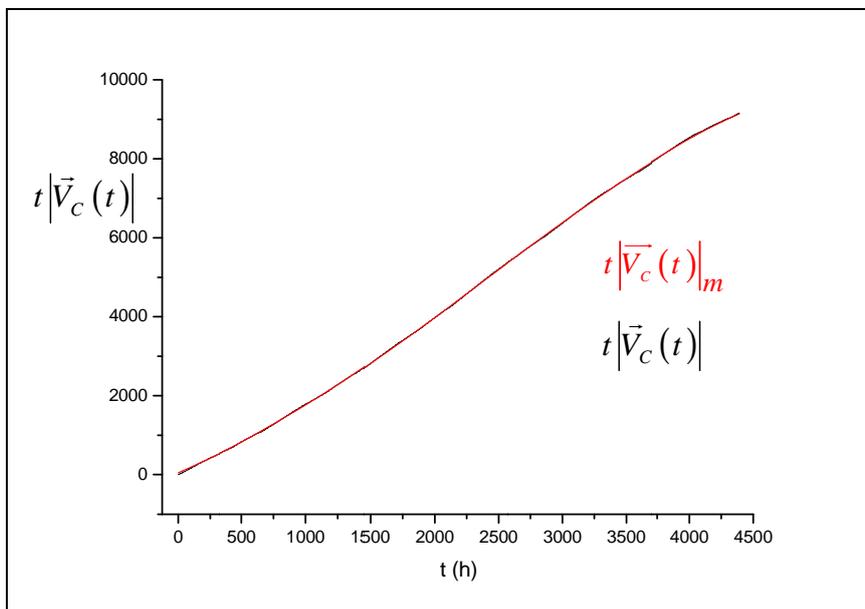


Figura 41a.

In dettaglio:

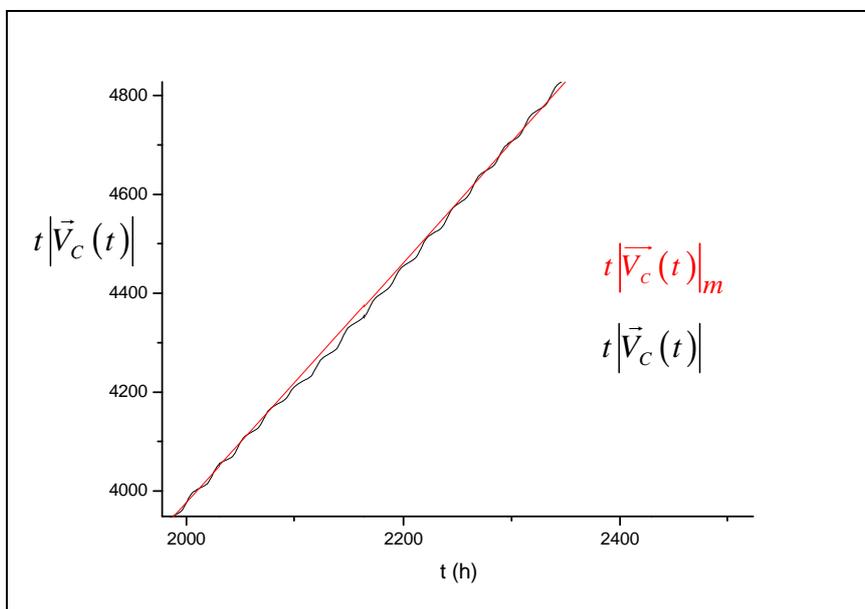


Figura 41b.

4.3.2 Ricostruzione delle funzioni $|\vec{V}_C(t)|_w$ e $|\vec{V}_C(t)|_m$

È immediato, a questo punto, ricavare $|\vec{V}_C(t)|_w$ e $|\vec{V}_C(t)|_m$:

$$|\vec{V}_C(t)|_w = \frac{t|\vec{V}_C(t)|_w}{t}$$

$$|\vec{V}_C(t)|_m = \frac{t|\vec{V}_C(t)|_m}{t}$$

La figura seguente riporta i risultati finali ottenuti:

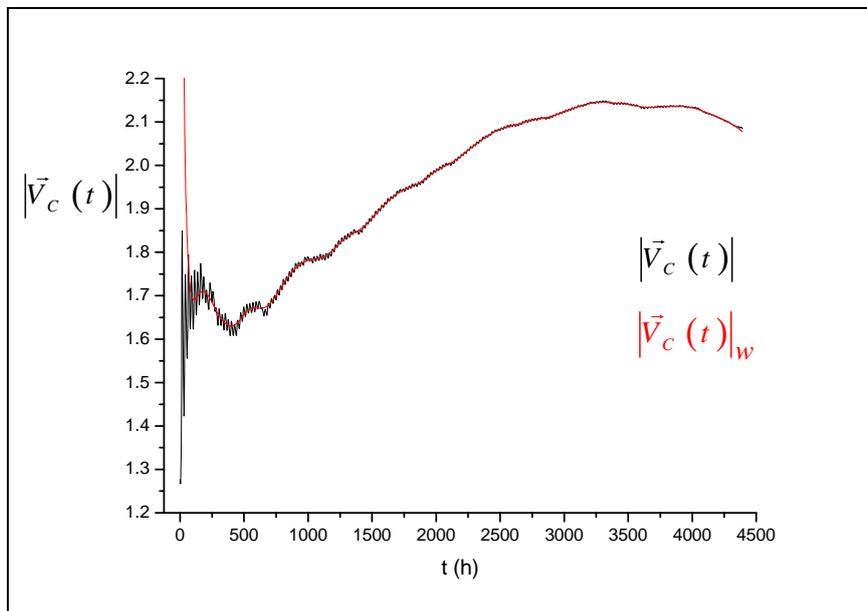


Figura 42.

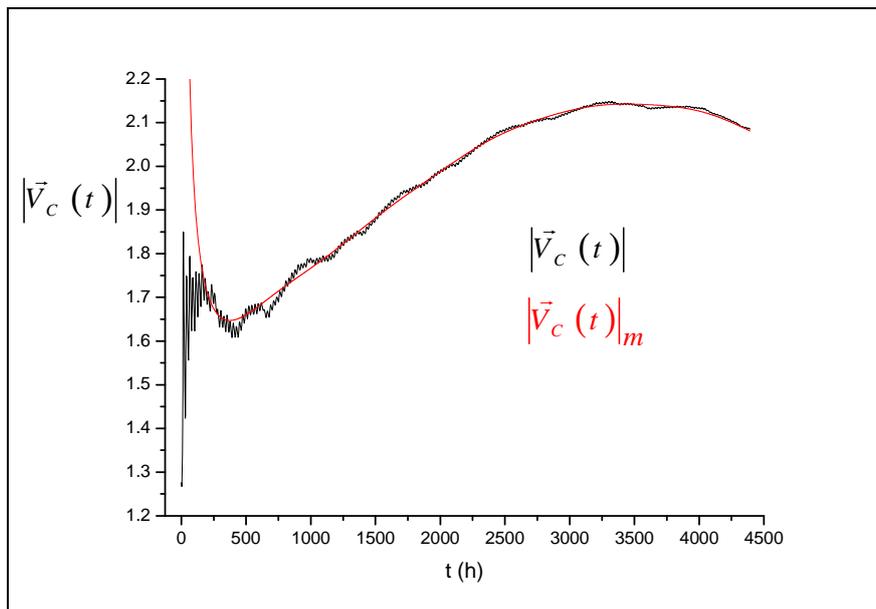


Figura 43

Si osserva che l'*overshoot* della fase iniziale si è evidenziato in quanto la procedura di *smoothing* adottata mette in risalto le caratteristiche matematiche della funzione $|\vec{V}_C(t)|$ in corrispondenza di $t=0$, come descritto nell'appendice 1, caratteristiche che sono in qualche modo parzialmente oscurate dal calcolo per passi temporali finiti (orari) della funzione stessa.

Il lettore studioso e curioso si domanderà, a questo punto, per quale motivo la procedura di *smoothing* non sia stata direttamente applicata alla funzione $|\vec{V}_C(t)|$ originaria: la risposta è che, operando in tal modo, lo *smoothing* non risulta particolarmente efficace e, spesso, si verificano problemi di convergenza della procedura numerica basata sulla Fast Fourier Transform.

4.4 Energia cumulata e potenza cumulata di climatizzazione

Riprendiamo il modello lineare dell'indice di severità climatica:

$$C = \frac{\tilde{z}}{|\vec{V}_B| \cos \omega} = |\vec{V}_C| - k(\mu) |\vec{V}_{C,ref}|$$

Ricordiamo che il modello era stato verificato e calibrato, per quanto riguarda i suoi coefficienti, per il periodo di calcolo convenzionale T .

È interessante vedere in che misura il modello mantiene la sua validità anche per $0 \leq t \leq T$, cioè se è possibile che sia ancora valida in questo campo di t un'espressione del tipo:

$$C(t) = \frac{\tilde{z}(t)}{|\vec{V}_B| \cos \omega} = |\vec{V}_C(t)| - K(\mu, t) |\vec{V}_{C,ref}|$$

Prima di effettuare questa verifica, appare opportuno cambiare e semplificare le notazioni (chiedendone scusa al lettore volenteroso) e scrivere l'espressione precedente come:

$$\frac{P(t)}{b} = V_C(t) - K(\mu, t) V_C^*$$

dove si è posto:

$\tilde{z}(t) \equiv P(t)$ richiamando anche nel simbolo il significato di "potenza" della variabile integrale (o cumulata) $\tilde{z}(t)$ per unità di volume climatizzato

$b = |\vec{V}_B| \cos \omega = \text{cost}$ se si considera un prefissato edificio

$V_C(t) = |\vec{V}_C(t)|$

$V_C^* = |\vec{V}_{C,ref}|$

Scrivendo la relazione in termini di energia cumulata per unità di volume, si ha:

$$\frac{E(t)}{b} = \frac{tP(t)}{b} = t [V_C(t) - K(\mu, t) V_C^*]$$

4.5 *Relazione tra potenza e energia cumulata e modulo del vettore climatico calcolati al tempo corrente t.*

Tra i quattro casi esaminati di edificio di riferimento, Q1, Q2, Q3 e Q4, come riportato in [1], consideriamo i risultati ottenuti per l'edificio Q1 (minimo isolamento, massima esposizione solare) per la località più "esigente" tra le venti dove si è calcolato il fabbisogno energetico per la climatizzazione estiva con il relativo modulo del vettore climatico (Agrigento).

4.5.1 *Potenza cumulata $P(t)$ al tempo corrente t.*

Le figure seguenti presentano i risultati ottenuti dall'analisi dinamica con passo di calcolo orario:

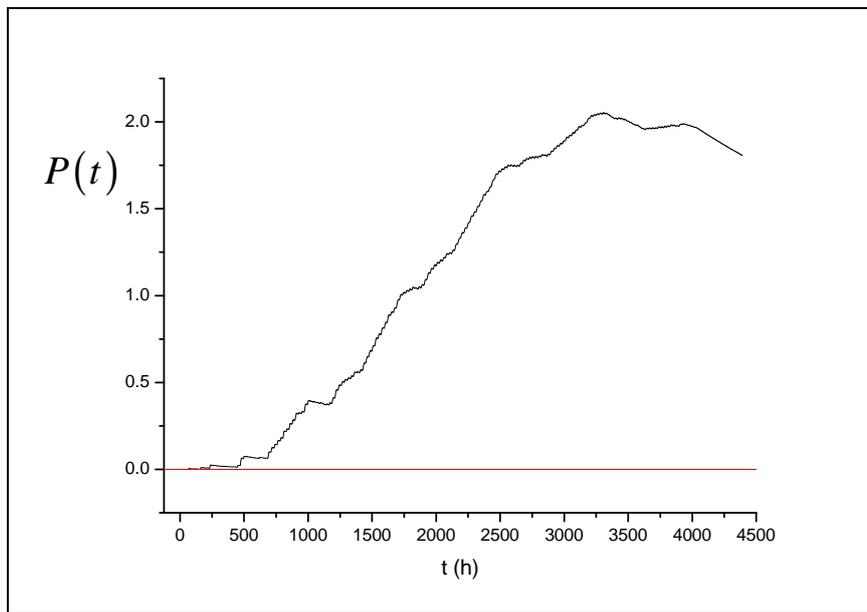


Figura 44a.

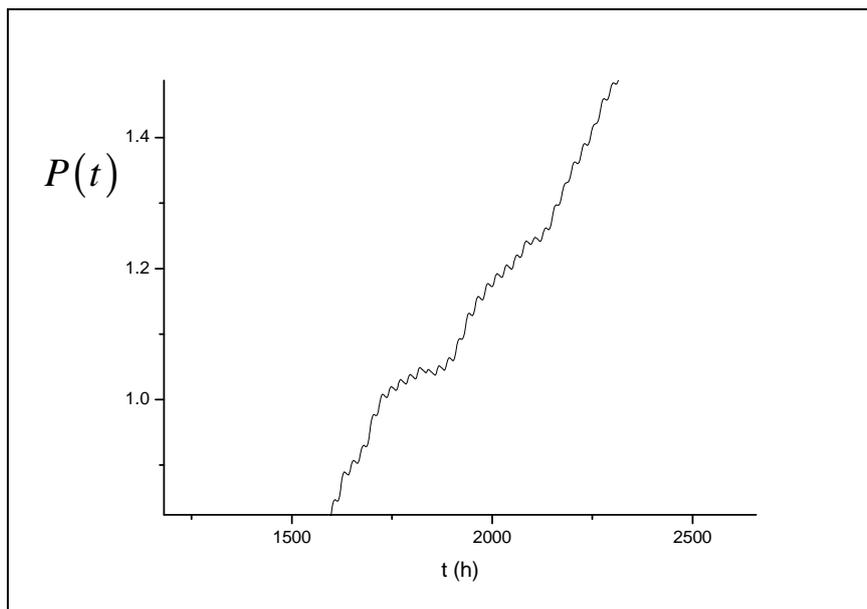


Figura 44b.

Nella figura di dettaglio si nota la periodicità di 24 ore già osservata nell'andamento del modulo del vettore climatico.

Applicando anche alla funzione $P(t)$ la procedura di *smoothing*, precedentemente vista, impiegando ancora i filtri passabasso con frequenze di taglio $1/\tau_w$ e $1/\tau_m$, si ottengono $P(t)_w$ e $P(t)_m$:

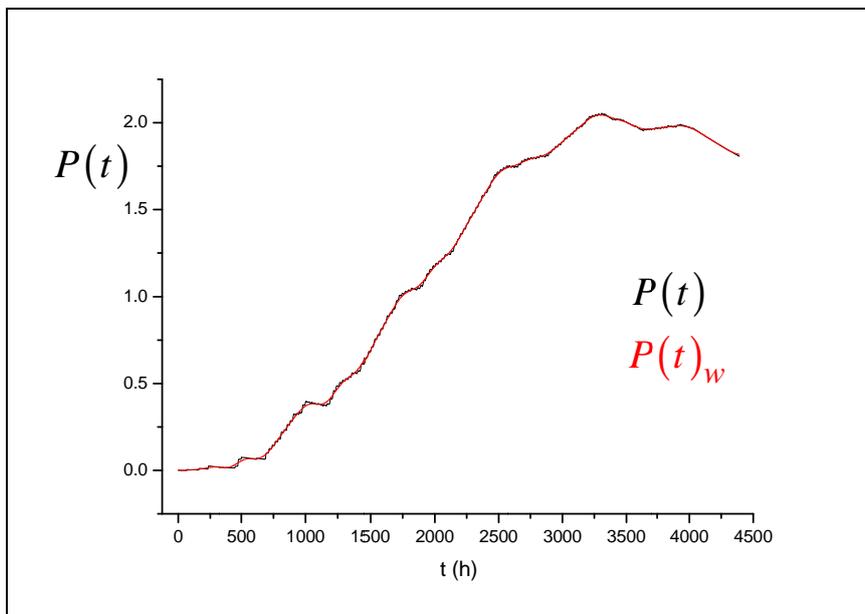


Figura 45a.

In dettaglio:

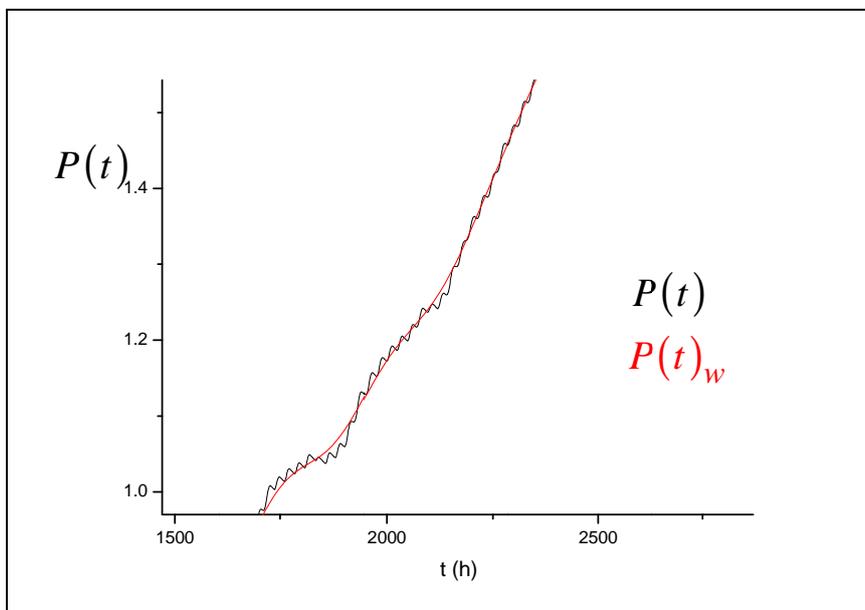


Figura 45b.

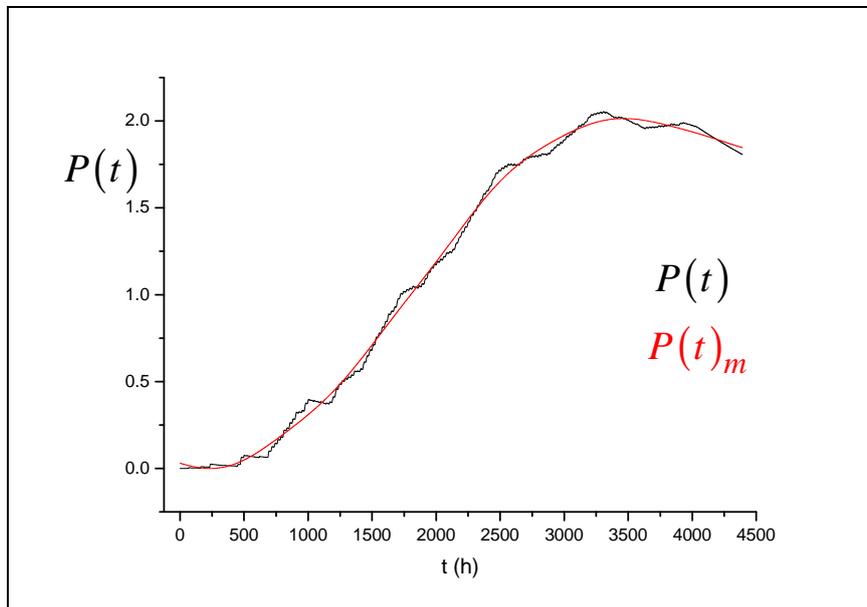


Figura 46a.

In dettaglio:

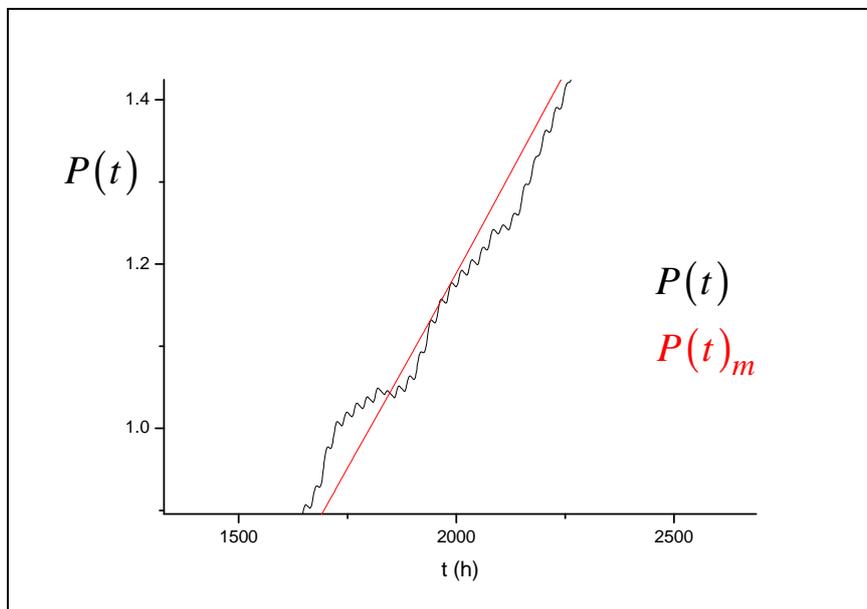


Figura 46b.

4.5.2 Relazione tra potenza cumulata $P(t)$ e modulo del vettore climatico $V_C(t)$.

Rprendiamo il grafico di $V_C(t)_w$ e di $V_C(t)_m$

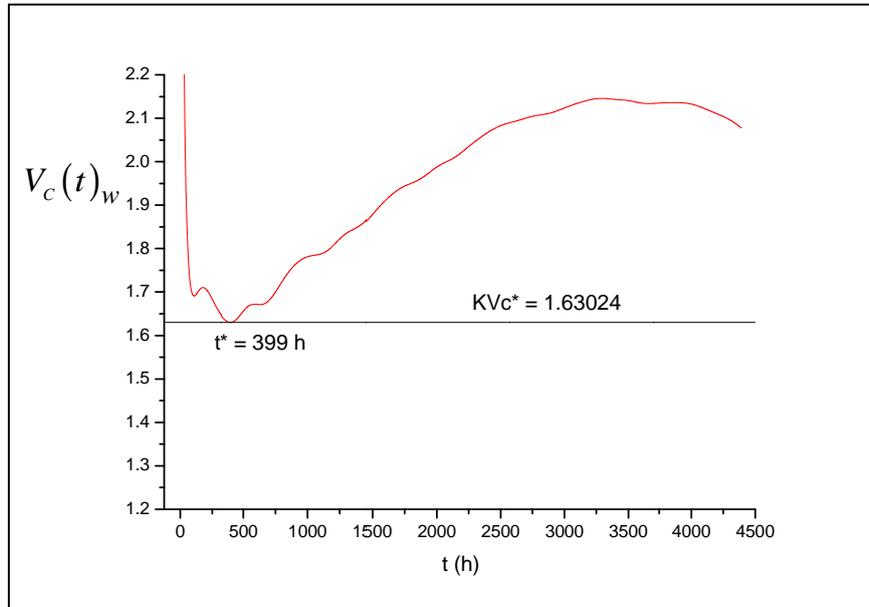


Figura 47.

Il punto di minimo ha coordinate $t^* \cong 399$ e $V_C \cong 1.630$

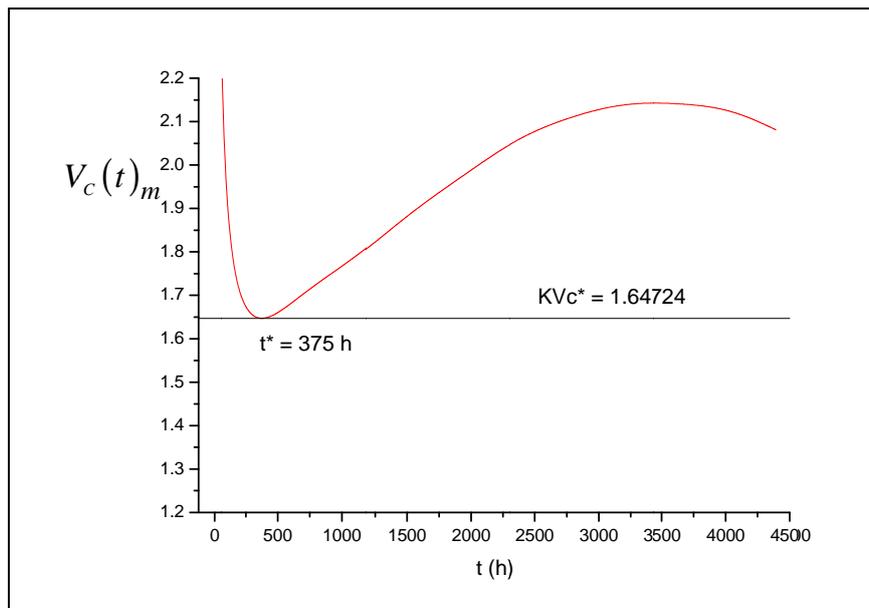


Figura 48.

Il punto di minimo ha coordinate $t^* \cong 375$ e $V_C \cong 1.647$

Riprendiamo in considerazione anche il grafico di $P(t)_w$ e $P(t)_m$:

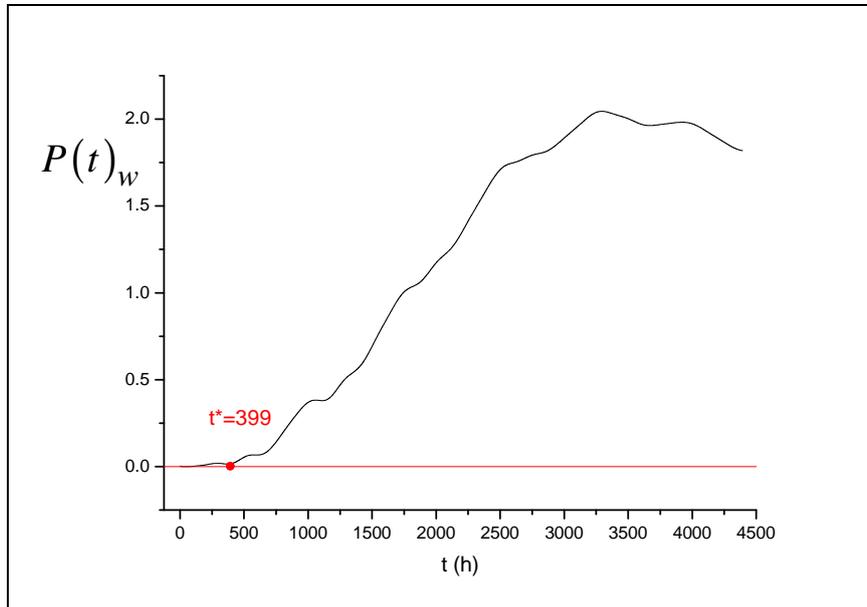


Figura 49.

È $P(t)_w \cong 0$ per $t \cong 399$

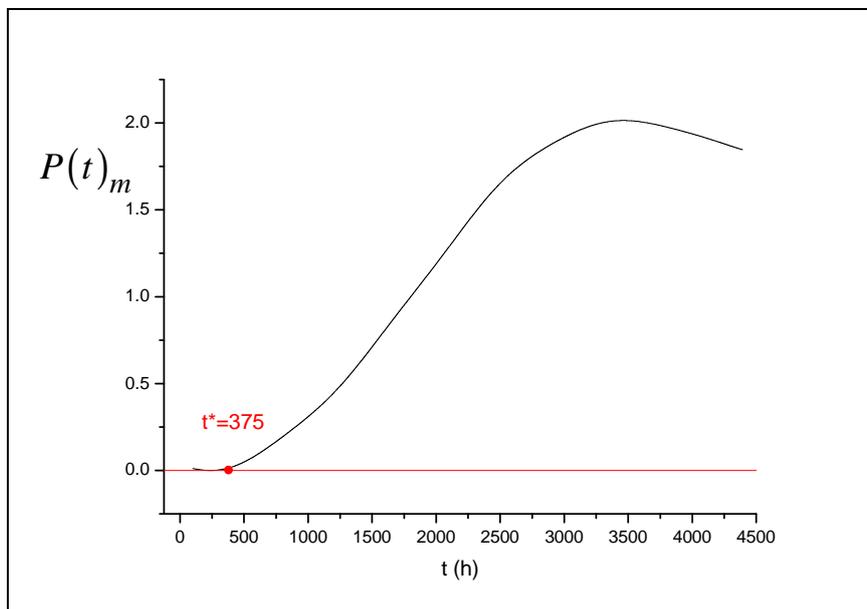


Figura 50.

È $P(t)_m \cong 0$ per $t \cong 375$

Si osserva che il punto di minimo della funzione $V_c(t)$ e il punto di minimo della $P(t)$ (zero in questo caso) praticamente coincidono in ambedue le scale di filtraggio considerate. La pratica coincidenza dei punti di minimo si verifica anche per le due funzioni non filtrate.

Ricordando il modello lineare proposto dall'indice di severità climatica estivo per la relazione tra le due funzioni:

$$\frac{P(t)}{b} = V_c(t) - K(\mu, t)V_c^*$$

s'identifica immediatamente il valore del punto di minimo della $V_c(t)$ con il termine $K(\mu, t^*)V_c^*$.

$$V_c(t^*) = V_c^{\min} = K(\mu, t^*)V_c^*$$

Il grafico rappresentato nella figura seguente riporta l'andamento delle funzioni $[V_c(t)_m - V_c^{\min}]$ e $P(t)_m$, normalizzate con il loro valore massimo, rispetto al tempo corrente t :

$$\hat{V}_{c,*}(t)_m = \frac{V_c(t)_m - V_c^{\min}}{[V_c(t)_m - V_c^{\min}]_{\max}}$$

$$\hat{P}(t)_m = \frac{P(t)_m}{P_{\max}}$$

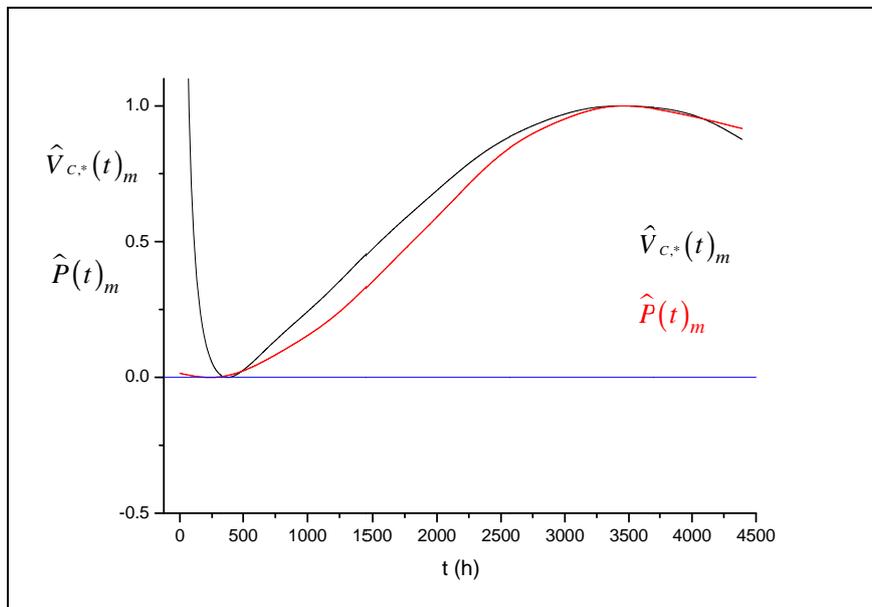


Figura 51.

È da notare come le due funzioni raggiungano il massimo praticamente allo stesso tempo t e presentino un andamento simile

Sempre conformemente al modello proposto per l'energia cumulata:

$$\frac{E(t)}{b} = \frac{tP(t)}{b} = t[V_C(t) - V_C^{\min}]$$

si riporta il grafico delle funzioni $\frac{E(t)_m}{b}$ e $t[V_C(t)_m - V_C^{\min}]$, normalizzate con il loro valore massimo, rispetto al tempo corrente t .

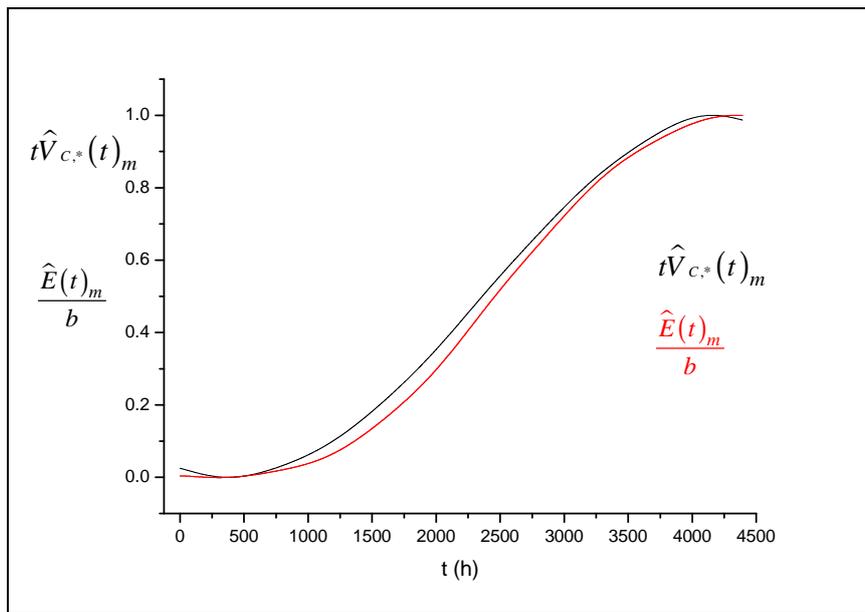


Figura 52.

Anche in tale rappresentazione le due funzioni raggiungono il massimo praticamente allo stesso tempo t e presentano un andamento simile.

Si può quindi ragionevolmente affermare che il legame tra le variabili energetiche $P(t)$ e $E(t)$ e le corrispondenti variabili climatiche rappresentate da $V_C(t)$ e $tV_C(t)$ continua a sussistere anche per $0 \leq t \leq T$.

Valutiamo ora il grado di linearità di tale relazione.

La descrizione dei risultati, impiegando direttamente le variabili del modello, fornisce i grafici delle figure seguenti per, rispettivamente a $P(t)_m$ e a $\frac{E(t)_m}{b}$:

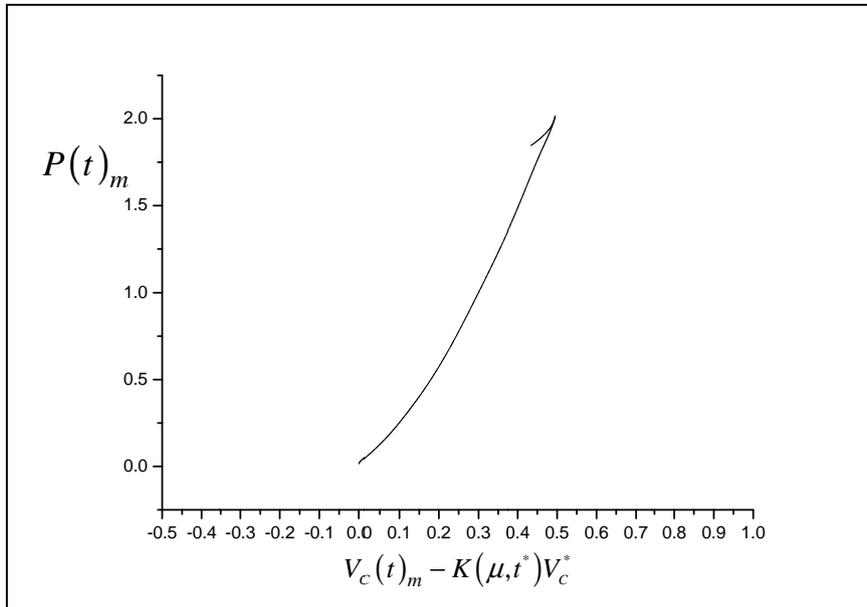


Figura 53.

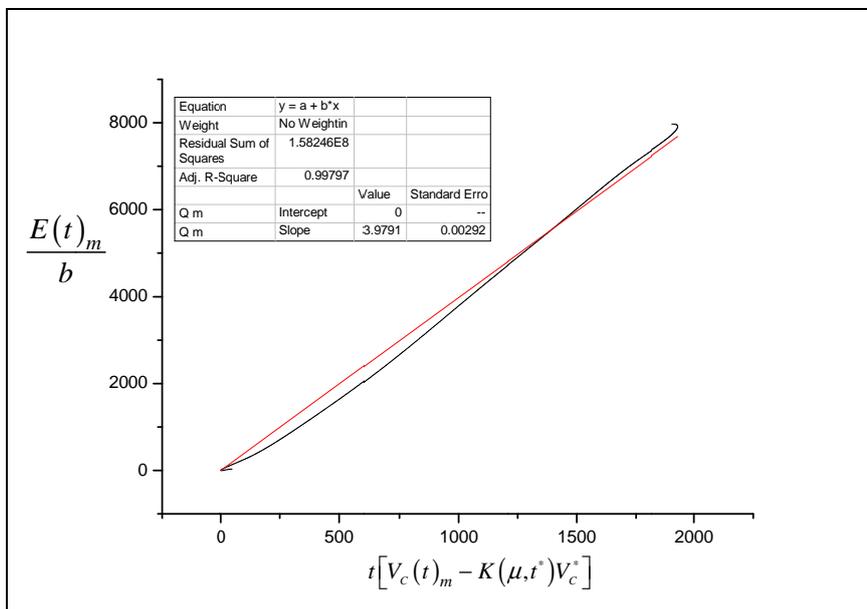


Figura 54.

È evidente la coerenza dei risultati di calcolo ottenuti con la struttura lineare suggerita dal modello dell'indice di severità climatica esteso al tempo corrente.

Analoghe considerazioni è possibile fare analizzando i risultati ottenuti dallo *smoothing* con frequenza di taglio $\frac{1}{\tau_w}$.

Nel grafico della figura seguente si riportano, ad esempio, le curve normalizzate rispetto ai relativi valori massimi, di $P(t)_w$ e di $[V_C(t)_w - V_{C,w}^{\min}]$ in funzione del tempo corrente:

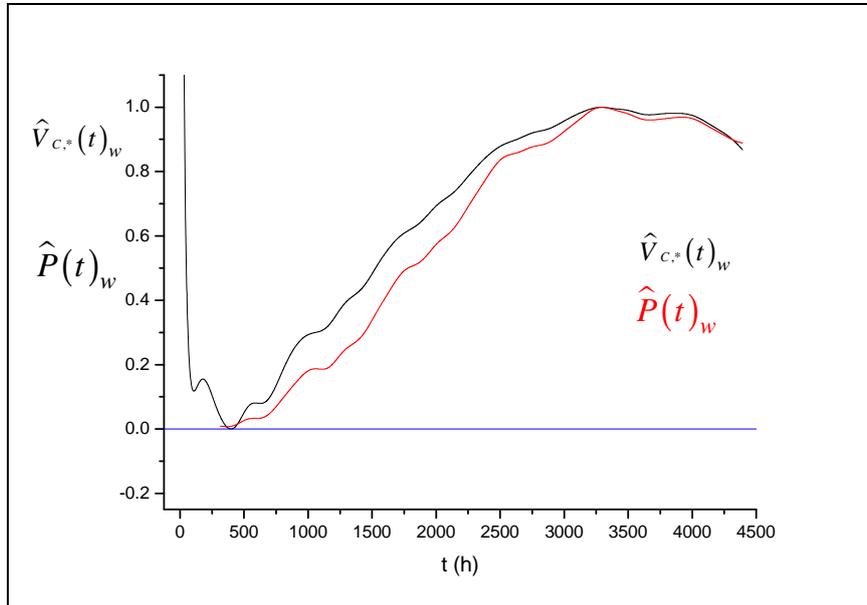


Figura 54.

In questa scala di filtraggio si evidenzia, in maggior misura, il parallelo andamento di $\hat{V}_{C,*}(t)_w$ e di $\hat{P}(t)_w$ con un anticipo temporale delle variazioni del vettore climatico rispetto alle variazioni della potenza di climatizzazione cumulata di evidente significato fisico: la funzione *forzante* anticipa la funzione di *risposta del sistema*.

Per valutare quantitativamente questo effetto è necessario mettere in risalto le variazioni nel tempo delle due funzioni operando una differenziazione numerica, riportata nel grafico della figura seguente:

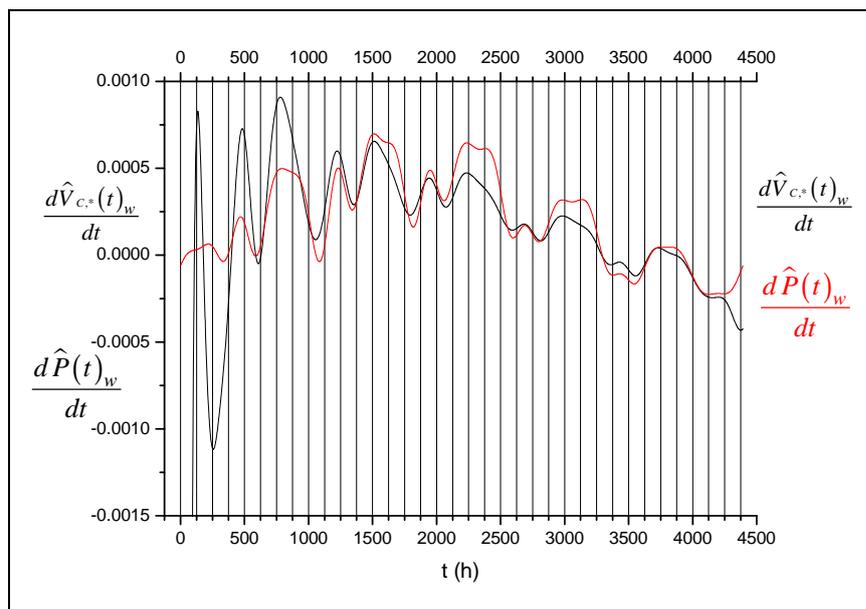


Figura 55.

L'andamento del ritardo è illustrato nel grafico della figura seguente:

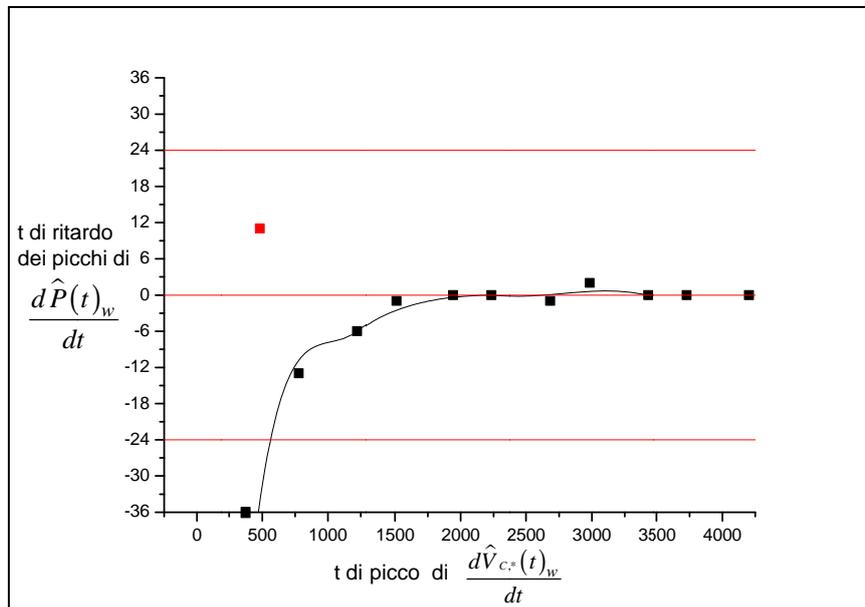


Figura 56.

A meno di un punto anomalo nella fase iniziale, per $t \cong 500h$, (la differenziazione è numerica e i dati sono discreti), la potenza è in ritardo sul modulo del vettore climatico fino a circa metà del periodo di calcolo T dopo di che è, in sostanza, in fase. La coincidenza temporale dei valori massimi delle due funzioni è correlata a questo fatto.

Si conferma per tale via che per periodi di tempo sufficientemente lunghi l'effetto dell'inerzia dell'edificio si annulla se si definiscono potenza e vettore climatico come grandezze integrali estese al tempo T , come considerato dal modello lineare dell'indice di severità climatico.

4.5.3 Gli intervalli temporali tipici del periodo di climatizzazione T e la loro utilizzazione per la determinazione dei tempi d'inizio e fine.

Nei paragrafi precedenti si sono illustrate alcune delle caratteristiche delle funzioni che definiscono il modello lineare dell'indice di severità climatico esteso al tempo corrente $0 \leq t \leq T$.

Ci soffermiamo ora su un'altra peculiarità che contraddistingue le funzioni $P(t)$ e $V_C(t)$.

Sia:

$$\Delta_{V_C}(t)_m = \frac{d[V_C(t)_m - V_C^{\min}]}{[V_C(t)_m - V_C^{\min}]}$$

L'espressione rappresenta, manifestamente, la variazione locale relativa della funzione $[V_C(t)_m - V_C^{\min}]$.

In termini finiti rappresenta la variazione percentuale di tale funzione rispetto al valore che essa assume al tempo per il quale la si calcola.

Analogamente sia:

$$\Delta_P(t)_m = \frac{dP_m(t)}{P_m(t)}$$

Essa rappresenta la variazione locale relativa della funzione $P_m(t)$ e rappresenta, in termini finiti, la variazione percentuale di questa funzione rispetto al valore che essa assume al tempo per il quale la si calcola.

I grafici delle figure seguenti riportano l'andamento nel tempo delle due funzioni ora definite:

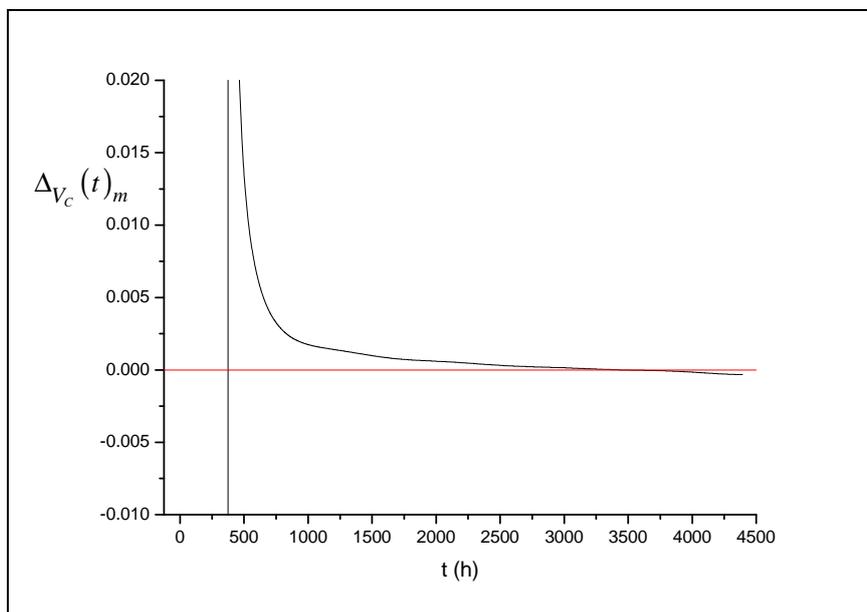


Figura 57.

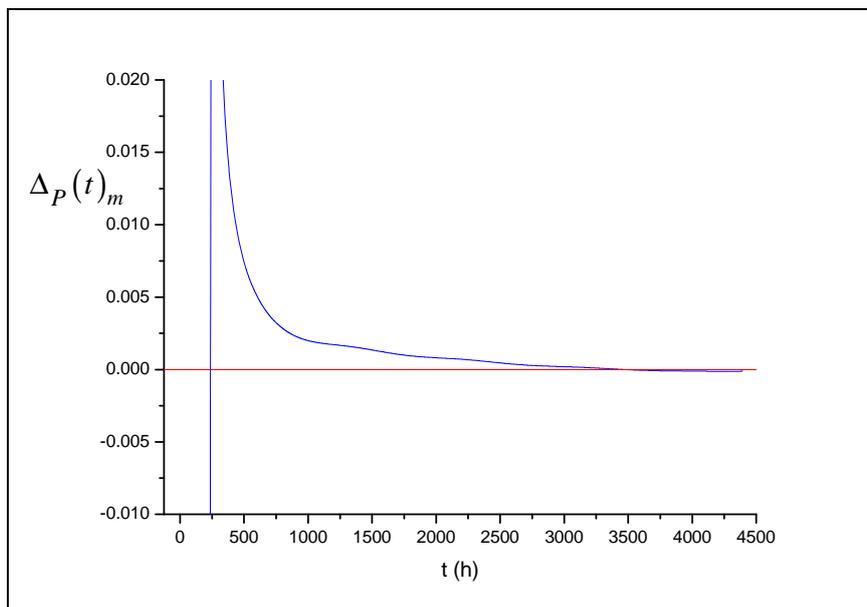


Figura 58.

È confermata l'analogia di comportamento delle due funzioni e si evidenzia, inoltre, l'attraversamento della linea di zero in corrispondenza del raggiungimento del massimo di $[V_C(t)_m - V_C^{\min}]$ e di $P_m(t)$.

La potenza cumulata al tempo t presenta una forte variazione percentuale positiva all'inizio del periodo di climatizzazione (grande variazione assoluta in rapporto con la ancora piccola potenza cumulata). Successivamente la variazione percentuale decresce velocemente per raggiungere un decremento con piccolo rateo, pur mantenendosi sempre positiva (potenza crescente).

Raggiunto il massimo, la potenza cumulata ha variazione percentuale negativa (potenza decrescente).

Il vettore climatico, come già osservato, presenta lo stesso comportamento.

La rappresentazione su scala semilogaritmica di $\Delta_{V_C}(t)_m$ consente di evidenziare queste caratteristiche ed è riportata nei grafici delle figure seguenti:

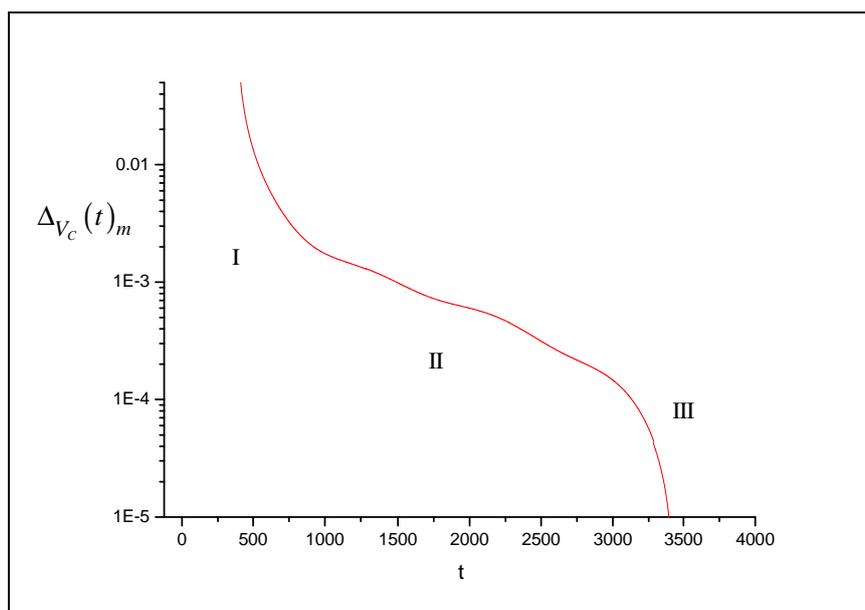


Figura 59.

Per l'arco temporale successivo al raggiungimento del massimo il differenziale della funzione $[V_C(t)_m - V_C^{\min}]$ e quindi anche $\Delta_{V_C}(t)_m$, è negativo e per rappresentare quest'ultimo nel piano semilogaritmico è necessario considerarne il valore assoluto $|\Delta_{V_C}(t)_m|$.

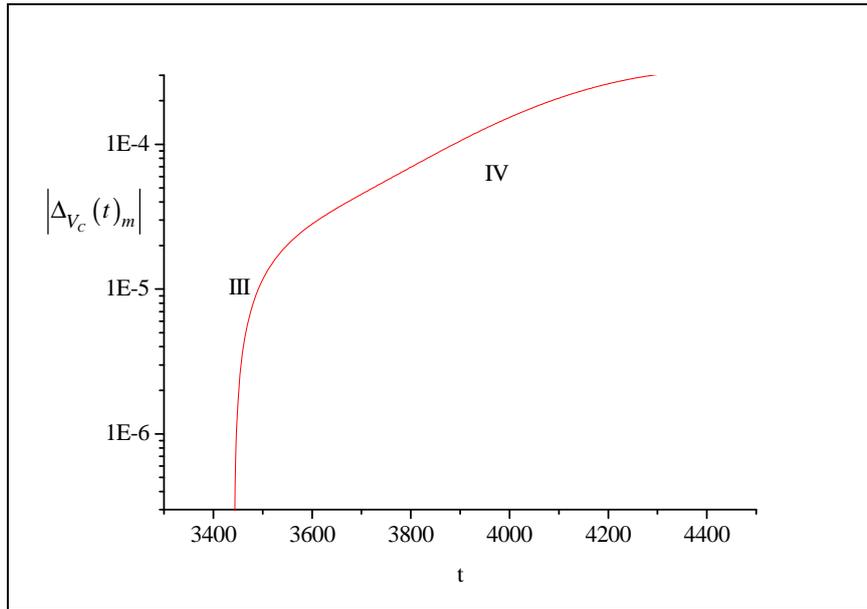


Figura 60.

La rappresentazione su scala semilogaritmica di $\Delta_P(t)_m$ è riportata nei grafici delle figure seguenti:

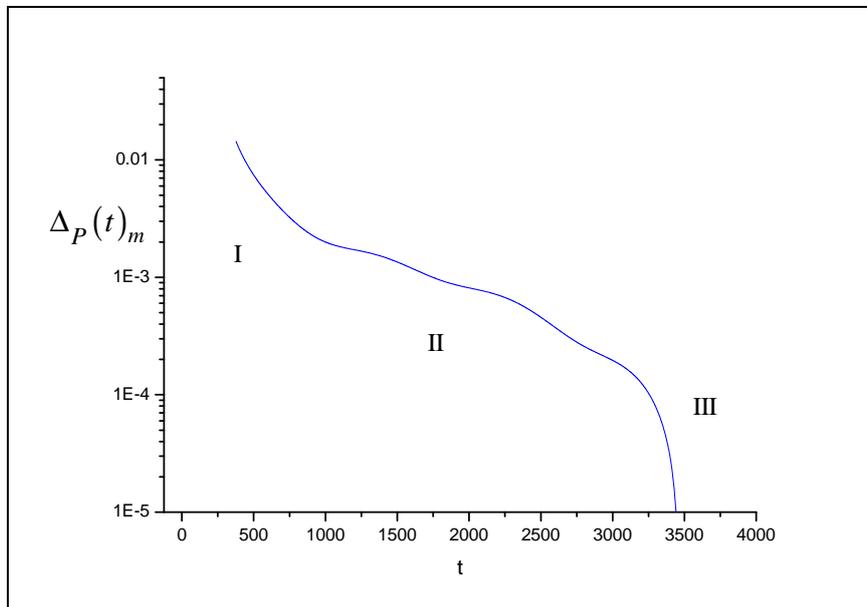


Figura 61.

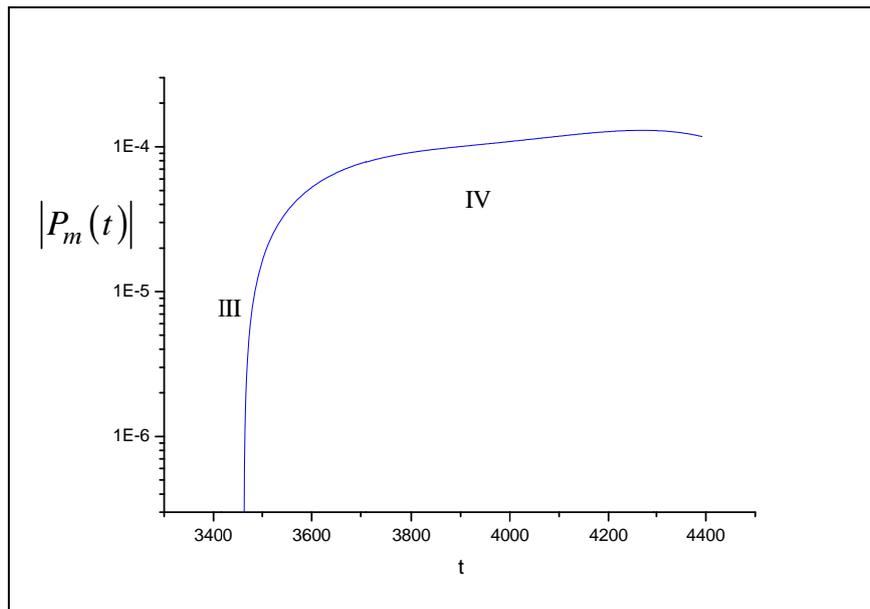


Figura 62.

Nei grafici delle figure precedenti si possono individuare i quattro intervalli temporali I, II, III e IV nei quali la funzione che rappresenta la variazione unitaria $\Delta_P(t)_m$ ha un andamento particolare e che ne individuano quattro diversi comportamenti:

- intervallo I : è il periodo di tempo transitorio iniziale nel quale la variazione relativa decresce rapidamente
- intervallo II: è il periodo nel quale la variazione relativa decresce con un basso rateo quasi costante
- intervallo III: è il periodo corrispondente all'intorno del raggiungimento del massimo della potenza cumulata
- intervallo IV: è il periodo di basso rateo finale della variazione relativa associato alla diminuzione della potenza cumulata dopo il raggiungimento del suo valore massimo.

Gli stessi intervalli trovano perfetta corrispondenza nella funzione $\Delta_{V_c}(t)_m$, come illustrato nelle figure di confronto seguenti:

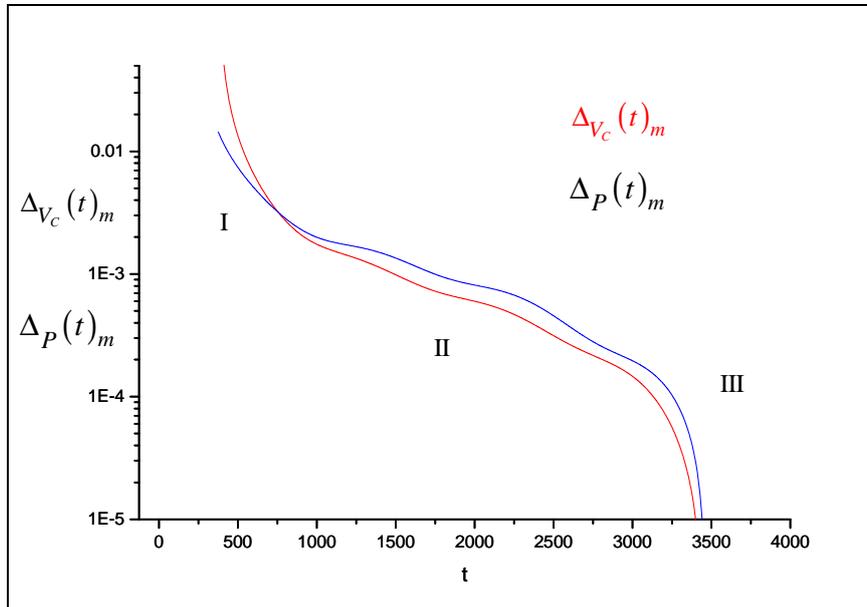


Figura 63.

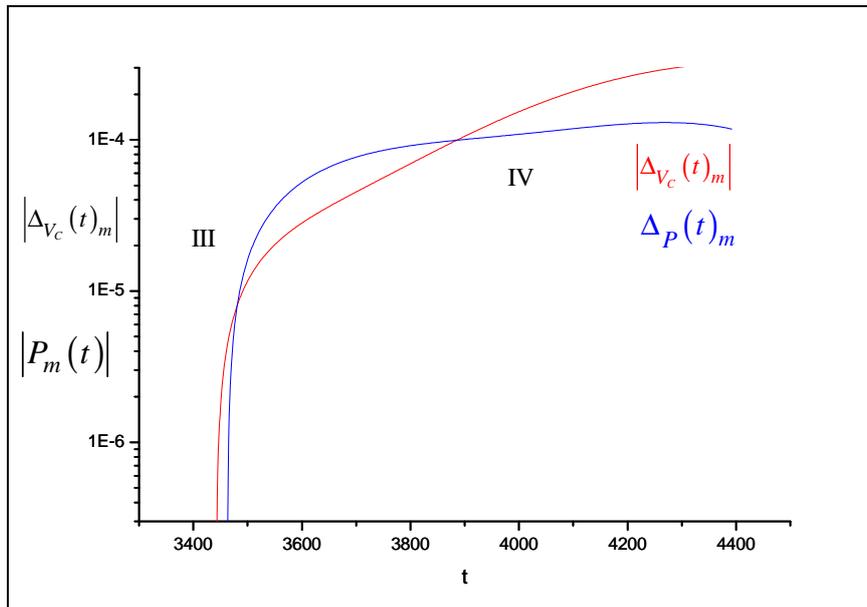


Figura 64.

È evidente, allora, che è possibile utilizzare gli intervalli caratteristici di $\Delta_{V_c}(t)_m$, parametro meramente climatico, per determinate un tempo convenzionale d'inizio e fine della climatizzazione connessi però con la potenza cumulata e con la sua variazione percentuale nel tempo:

- il tempo di inizio, t_s , si potrà situare al confine tra l'intervallo I e l'intervallo II
- il tempo di fine, t_e , si potrà situare al confine tra l'intervallo III e l'intervallo IV.

4.5.4 Una possibile proposta per determinare i tempi convenzionali t_s e t_e .

La determinazione del tempo d'inizio e del tempo di fine convenzionale del periodo di condizionamento si esegue affidandosi ad un procedimento *euristico*⁵ illustrato nelle figure seguenti.

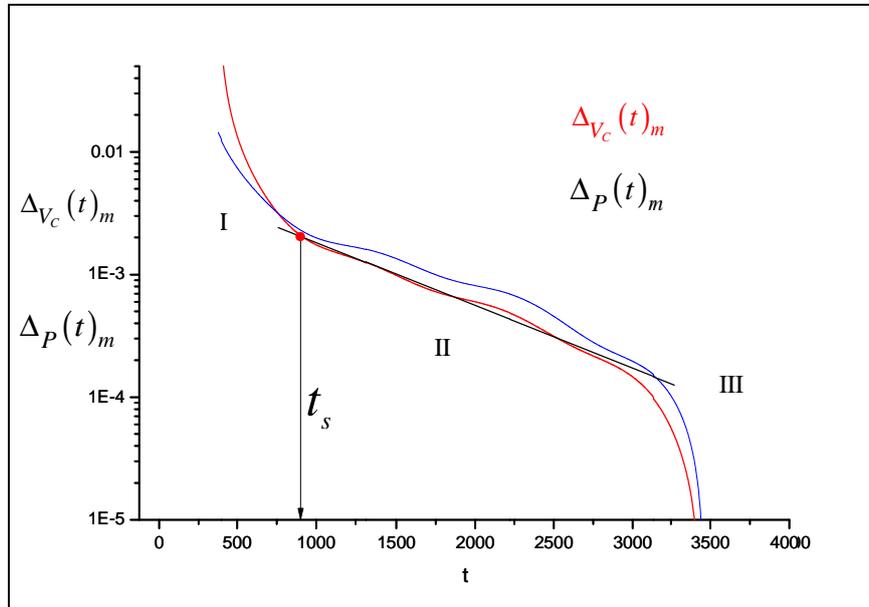


Figura 65.

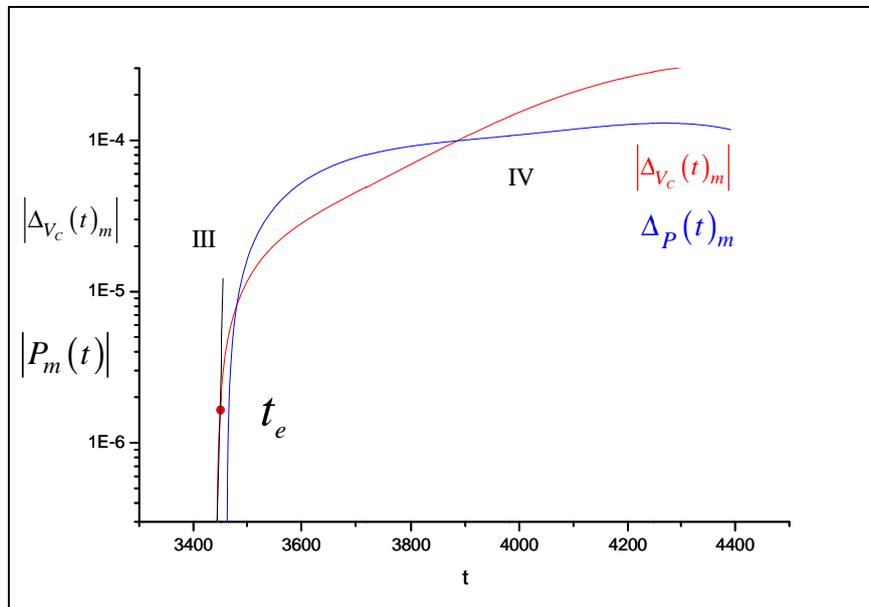


Figura 66.

⁵ *procedimento euristico*: un metodo di approccio alla soluzione dei problemi che non segue un chiaro e rigoroso percorso, ma che si affida all'intuito e allo stato temporaneo delle circostanze e conoscenze, al fine di generare nuova conoscenza.

Si individuano semplicemente sui grafici le intersezioni delle curve di $\Delta_{V_c}(t)_m$ e $\left| \Delta_{V_c}(t)_m \right|$ con le loro pseudotangenti (o rette di compenso) negli intervalli temporali II e III; l'ascissa di questi punti definisce t_s e t_e .

4.5.5 I risultati della determinazione dei tempi convenzionali t_s e t_e .

La procedura precedente è stata applicata ai dati climatici relativi a sette località italiane esplorando il *range* dei valori del modulo del vettore climatico calcolati per l'intero territorio nazionale e tenendo conto della zonizzazione proposta in questo lavoro.

Le località considerate sono, nell'ordine decrescente della severità climatica estiva:

- Agrigento
- Napoli
- Ancona
- Milano
- Vicenza
- Belluno
- Aosta

I risultati ottenuti per il tempo convenzionale t_s d'inizio del periodo di climatizzazione estiva sono riportati, nei grafici delle figure seguenti, in funzione sia del valore massimo del modulo del vettore climatico corrente, $V_c(t)_{\max}$ sia del suo valore finale $V_c(T)$ sul quale è basata la zonizzazione proposta.

I punti di calcolo riportano altresì una banda di errore (incertezza) stimata dell'ordine di 48 h.

Si osserva la rapida diminuzione del valore di t_s (il tempo convenzionale di zero è, ricordiamolo, il 15 aprile) all'aumentare della severità climatica nel campo $1.6 \leq V_c(t)_{\max} \leq 1.8$ o, in alternativa $1.5 \leq V_c(T) \leq 1.75$ e la diminuzione più lenta nel campo $V_c(t)_{\max} > 1.8$ o $V_c(T) > 1.75$ con l'ovvio significato del progressivo anticipo dell'inizio della necessità di climatizzazione estiva all'aumentare della severità climatica.

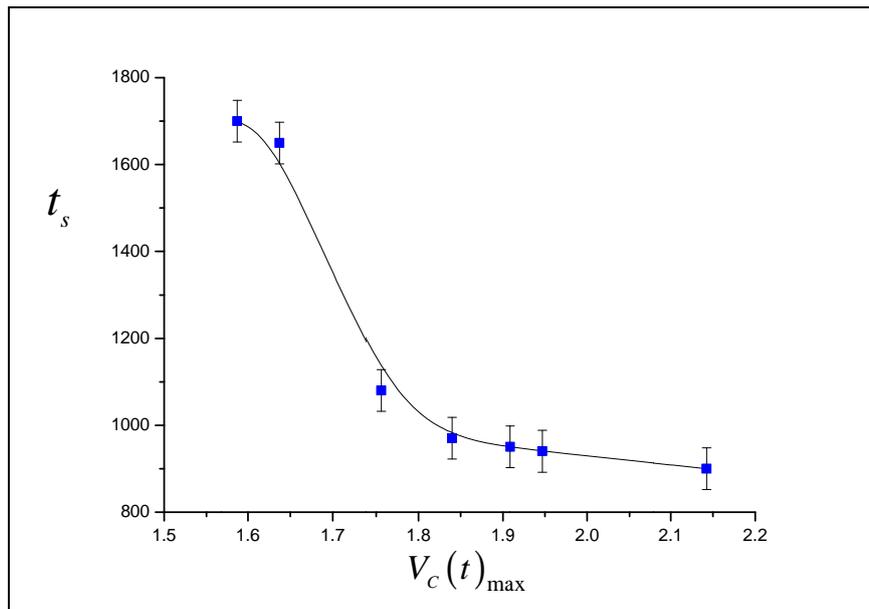


Figura.67.

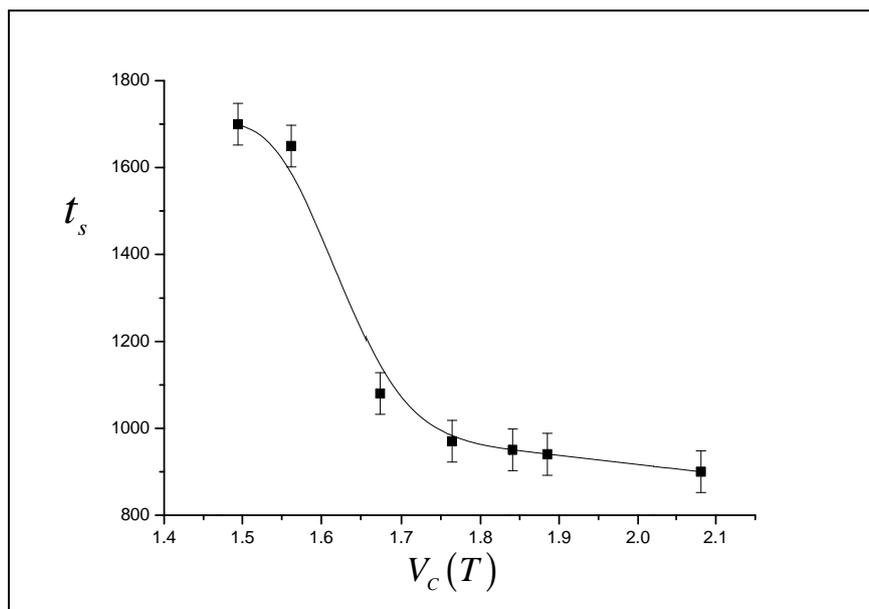


Figura 68.

I grafici delle figure seguenti riportano i risultati ottenuti per il tempo di fine del periodo di climatizzazione t_e in funzione delle stesse variabili climatiche.

Si nota il rapido aumento del tempo di fine climatizzazione all'aumentare della severità climatica nel campo $1.6 \leq V_c(t)_{\max} \leq 1.8$ o $1.5 \leq V_c(T) \leq 1.75$, la pratica stabilizzazione di t_e per $1.8 < V_c(t)_{\max} \leq 1.95$ ($1.75 < V_c(T) \leq 1.9$) e, infine, la rapida crescita per $V_c(t)_{\max} > 1.95$ ($V_c(T) > 1.9$) con il significato di un progressivo aumento del tempo di fine della necessità di climatizzazione.

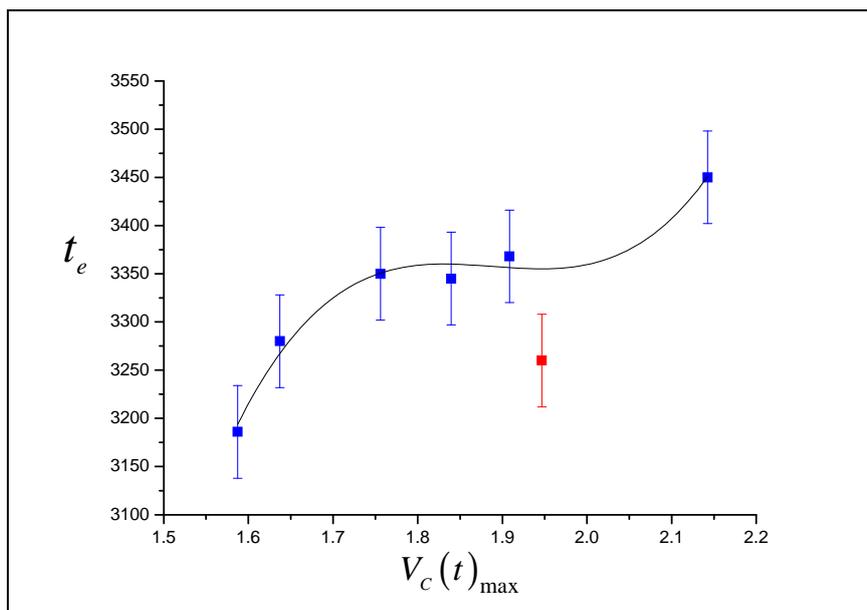


Figura 69.

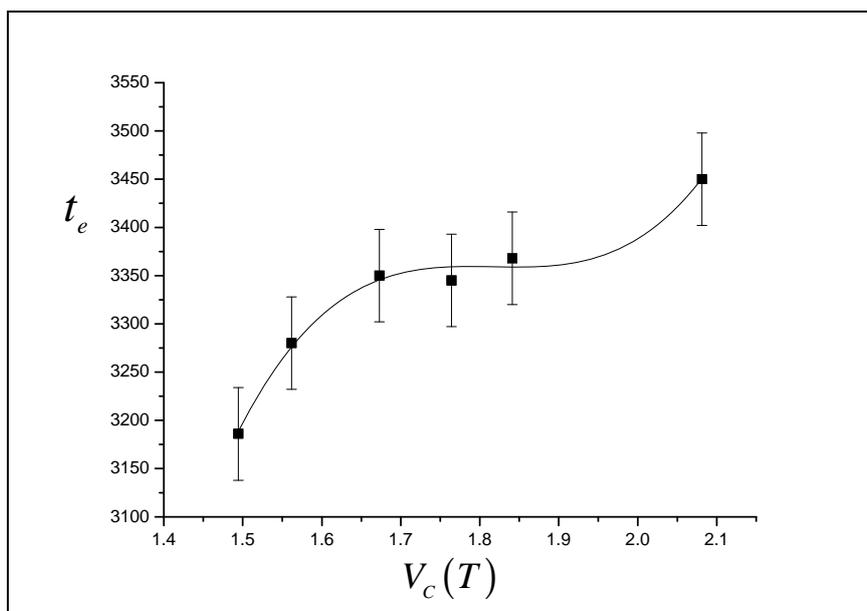


Figura 70.

4.5.6 La determinazione della durata della stagione di climatizzazione estiva nelle zone climatiche.

Dal punto di vista di una prossima applicazione normativa, in analogia con quanto già operante per la stagione di climatizzazione invernale, è necessario prefissare la durata della stagione di climatizzazione estiva nelle zone climatiche, proposte in questo lavoro, per l'intero territorio nazionale.

Pur dando per scontata l'applicabilità del metodo proposto, che suggerisce una variazione continua dei tempi d'inizio e fine della necessità di climatizzazione estiva, questo presuppone il passaggio ad una rappresentazione discretizzata (un solo valore di t_s e un solo valore di t_e per la singola zona climatica) che introduce una perdita di informazioni sulle singole località.

D'altra parte poiché i dati climatici di partenza sono stati dettati dalla normativa UNI 10349 e sono da considerare dati convenzionali di riferimento, difformità possono sempre esistere in alcune località. Si potrà ovviare a questi casi, come già fatto per la zonizzazione climatica invernale, provvedendo, eventualmente, ad una riclassificazione delle località interessate.

Poiché la zonizzazione estiva è stata effettuata impiegando come variabile climatica il modulo del vettore climatico valutato per un arco temporale pari a T , occorrerà considerare i risultati ottenuti per t_s e t_e in funzione della variabile $V_C(T)$ o più brevemente V_C .

Nel grafico della figura seguente è riportata la sovrapposizione del grafico t_s con le zone climatiche e la valutazione di t_s per il punto centrale della ripartizione delle zone:

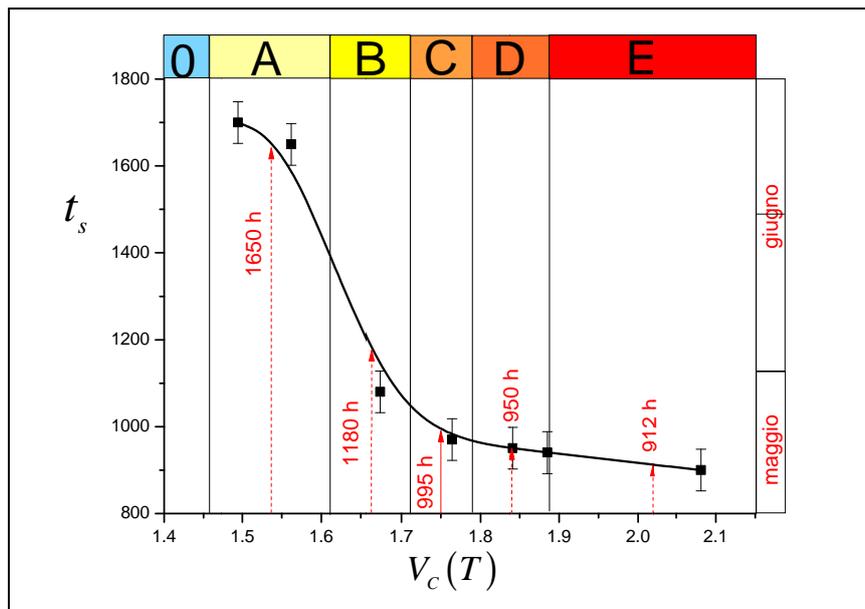


Figura 71.

Nel grafico della figura seguente è riportata, analogamente, la sovrapposizione del grafico t_e con le zone climatiche e la valutazione di t_e per il punto centrale della ripartizione delle zone A, B, C. Per la zona più "calda", la E, si è ritenuto opportuno valutare t_e in corrispondenza di un valore del modulo del vettore climatico situato a $\frac{2}{3}$ tra il limite inferiore della classe e il massimo valore nazionale del modulo :

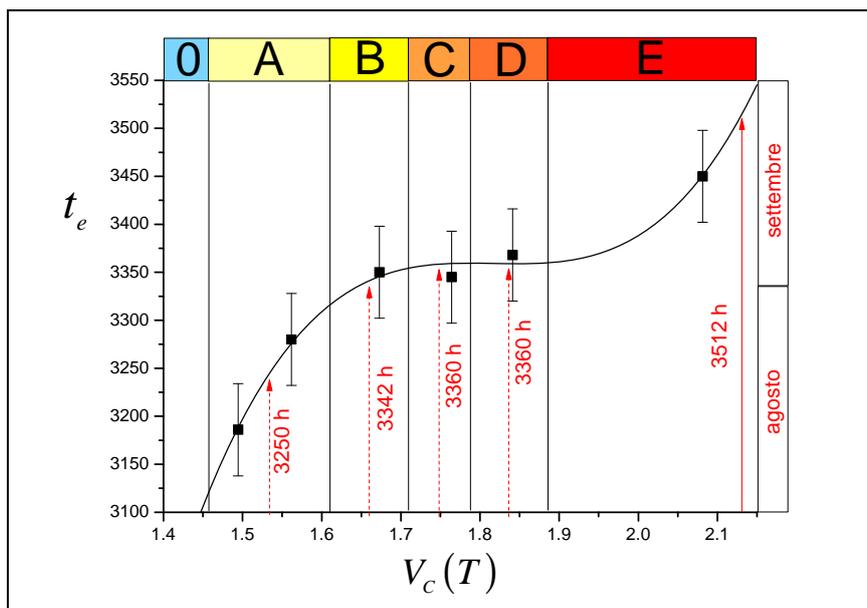


Figura 72.

La tabella seguente riassume i risultati ottenuti:

Zona climatica	t_s (h)	Data t_s	t_e (h)	Data t_e
A	1650	22 giugno	3250	28 agosto
B	1180	3 giugno	3342	1 settembre
C	995	26 maggio	3360	1 settembre
D	950	24 maggio	3360	1 settembre
E	912	22 maggio	3512	8 settembre

Tabella 6.

È opportuno stabilire la data d’inizio e fine del periodo di climatizzazione estiva riferendosi alle *settimane del mese* anziché al giorno del mese in modo da tenere conto sia delle incertezze dovute ai calcoli numerici effettuati sia a quelle implicite introdotte dai dati climatici impiegati per la valutazione del modulo del vettore climatico in quanto, come già precisato, si è utilizzato l’algoritmo *weather generator* di TRNSYS 16 per disporre dei dati orari a partire dai dati medi mensili della norma UNI 10349-94.

Di conseguenza la situazione finale proposta è quella riportata in tabella, dove si considera la *fine* della settimana indicata per il tempo d’inizio della climatizzazione e l’inizio della settimana indicata per il tempo di fine climatizzazione:

Zona climatica	Settimana t_s	Settimana t_e
A	3 ^a giugno	4 ^a agosto
B	1 ^a giugno	1 ^a settembre
C	3 ^a maggio	1 ^a settembre
D	3 ^a maggio	1 ^a settembre
E	3 ^a maggio	2 ^a settembre

Tabella 7.

5 Conclusioni

Nel lavoro degli stessi autori svolto per la precedente annualità della Ricerca di Sistema Elettrico, era stata riportata una proposta di zonizzazione estiva del territorio nazionale basata su un criterio statistico razionale che teneva conto della dispersione dei risultati ottenuti tramite la metodologia dell'Indice di Severità Climatica degli stessi autori. Nel presente lavoro è rivista la metodologia di zonizzazione al fine di "ponderare" la zona climatica di attribuzione di ogni singola località con la superficie abitativa media della località stessa; la nuova zonizzazione è quindi dipendente dall'intensità energetica connessa con la parte di territorio interessato.

È altresì proposto un metodo, del tutto originale e ancora basato sull'Indice di Severità Climatica, per la determinazione del tempo d'inizio e fine legale della stagione di raffrescamento, in modo da completare il parallelo con quanto già vigente il periodo invernale.

Sia la nuova zonizzazione che la determinazione della durata della stagione di raffrescamento saranno proposti al Ministero dello Sviluppo Economico al fine di inserirli nei decreti attuativi della L.90-2013 (recepimento della direttiva 2010/31/UE sull'efficienza energetica negli edifici) attualmente in preparazione.

6 Appendice 1

6.1 Studio della funzione $|\vec{V}_c(t)|$

L'espressione utilizzata per la definizione della funzione denominata "modulo del vettore climatico", limitando per semplicità il caso a due variabili, è della forma:

$$Z(t) = \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)}$$

dove è: $X(t) = \frac{\int_0^t x(t) dt}{t}$

e $Y(t) = \frac{\int_0^t y(t) dt}{t}$

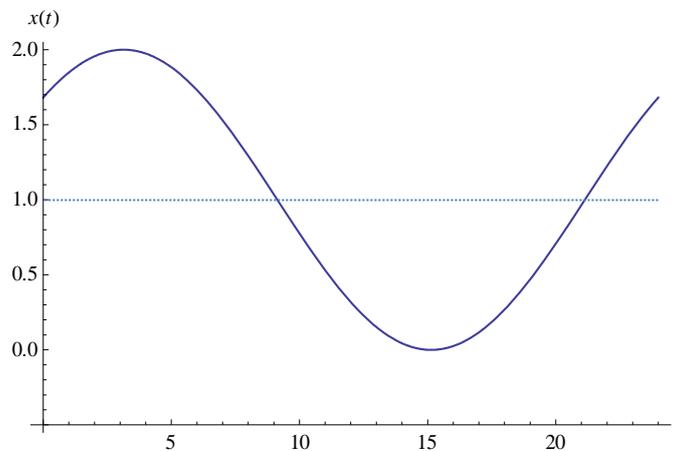
Esaminiamo, separatamente, il comportamento delle funzioni componenti la $Z(t)$.

Sia, per $X(t)$:

$$x(t) = a \operatorname{sen}(\omega t + \varphi) + A,$$

con a , A e φ costanti.

Questa funzione di t rappresenta una variazione sinusoidale, di ampiezza a , periodo T e pulsazione $\omega = 2\pi/T$, fase φ (fase temporale $t_\varphi = \varphi/\omega$), intorno ad un valore costante A :



e vuole rappresentare una variazione giornaliera "ideale" della temperatura dell'aria esterna intorno ad un valore medio costante (in figura è: $a = 1$, $A = 1$, $T = 24$, $\omega = \pi/12$, $\varphi = 0.75$, $t_\varphi = 9/\pi$).

La funzione $X^2(t)$ sarà allora:

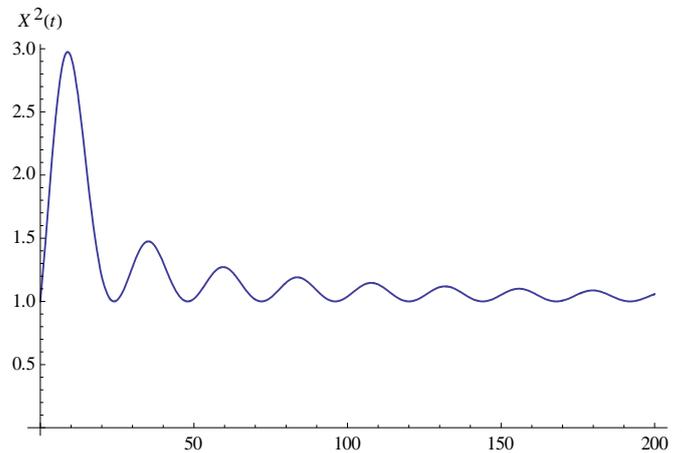
$$X^2(t) = \left\{ \frac{\int_0^t x(t) dt}{t} \right\}^2 = \left\{ A + \frac{a[\cos(\varphi) - \cos(\varphi + \omega t)]}{\omega t} \right\}^2$$

Se $\varphi = 0$ è:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} X^2(t) = A^2$$

$$\lim_{t \rightarrow 0} X^2(t) = A^2$$

In figura, assumendo $a = 1$, $A = 1$, $\omega = \pi/12$ e $\varphi = 0.0$ si ha:



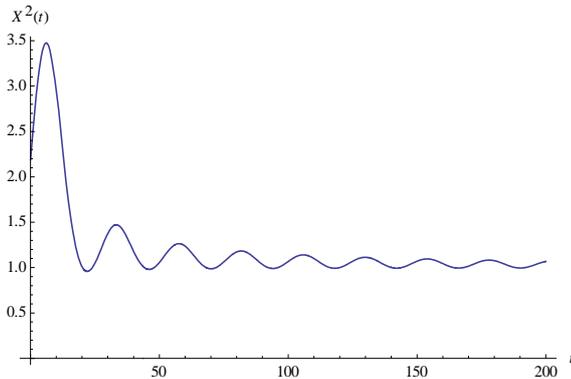
Si osserva che, dopo un notevole “overshoot” iniziale dal valore limite A^2 per $t = 0$, l’oscillazione si smorza rapidamente con t per tendere al valore limite A^2 all’infinito.

Per $\varphi \neq 0$ è, invece:

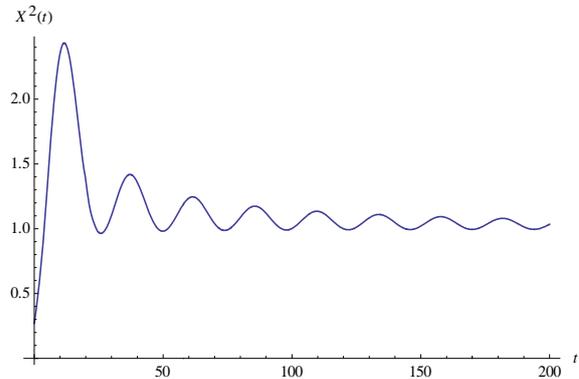
$$\lim_{t \rightarrow \infty} X^2(t) = A^2$$

$$\lim_{t \rightarrow 0} X^2(t) = (A + a \operatorname{sen} \varphi)^2$$

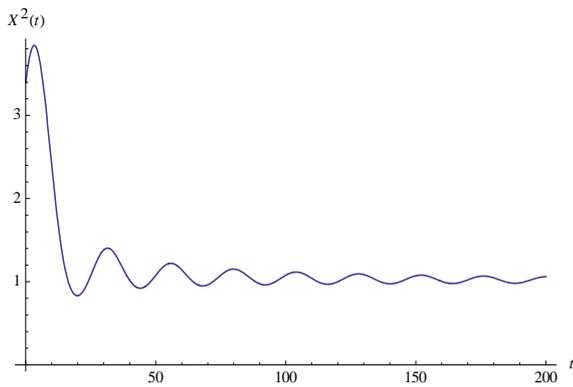
Si illustrano, in tal caso, alcune situazioni con differenti fasi φ :



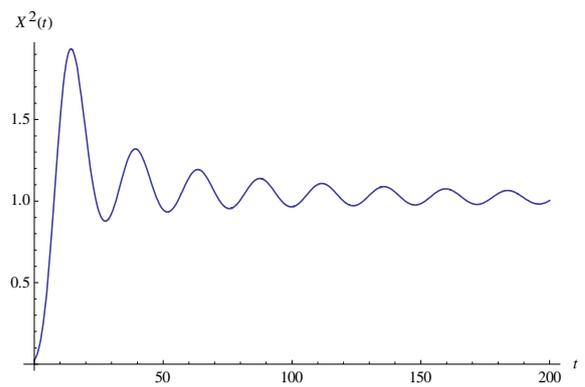
$\varphi = +0.5$



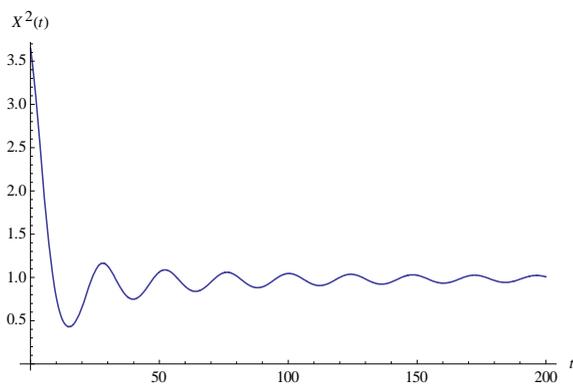
$\varphi = -0.5$



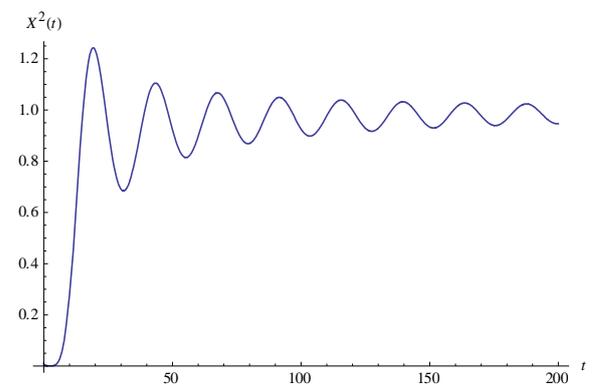
$$\varphi = +1.0$$



$$\varphi = -1.0$$

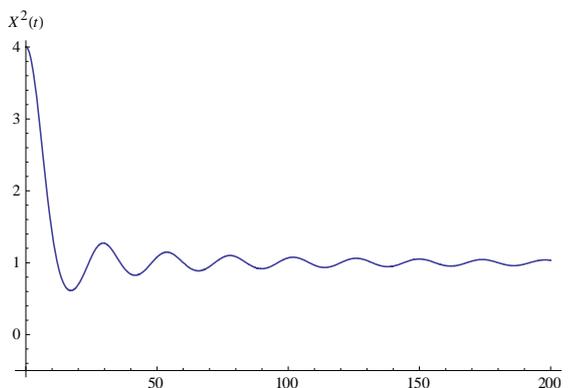


$$\varphi = +2.0$$

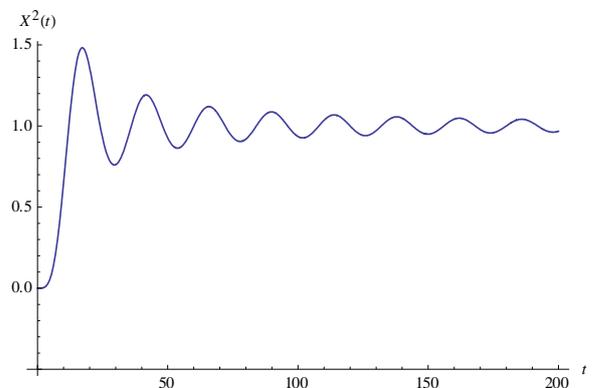


$$\varphi = -2.0$$

Per tutti i valori di $\varphi \neq 0$ l'“overshoot” si presenta sempre, esaltandosi per i valori positivi della fase. Per $\varphi \geq \frac{\pi}{2}$ l'“overshoot” si pone sempre più vicino dell'origine e raggiunge il massimo valore per $\varphi = \frac{\pi}{2}$ nell'origine. Per $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ in corrispondenza dell'origine il valore della funzione, per i parametri anzidetti, va a zero. Lo smorzamento, al progredire di t , è sempre sensibile.



$$\varphi = \frac{\pi}{2}$$



$$\varphi = -\frac{\pi}{2}$$

Analizziamo ora l'altra componente $Y(t)$ di $Z(t)$.

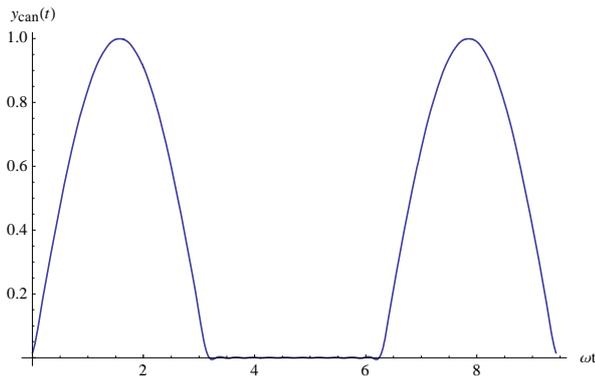
Sia, per $Y(t)$:

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t)$$

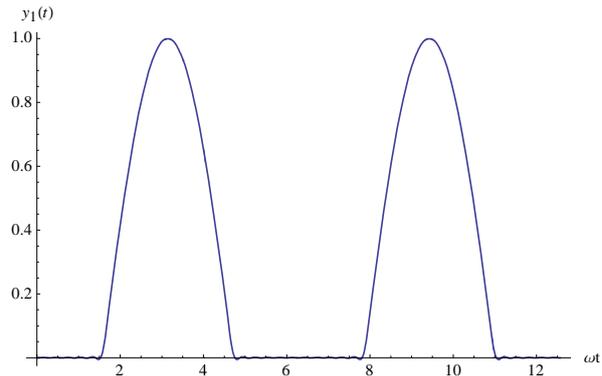
$$y_1(t) = \frac{b}{\pi} + \frac{b}{2} \text{sen}[\omega(t + 3t_0)] - \frac{2b}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos[2n\omega(t + 3t_0)]}{[(2n)^2 - 1]}$$

$$y_2(t) = B \frac{\tau}{T} + 2B \frac{\tau}{T} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen}[2n \frac{\tau}{T}]}{2n \frac{\tau}{T}} \cos[n\omega(t - 2t_0)]$$

La $y_1(t)$ rappresenta la serie di Fourier di una sinusoide ad una semionda positiva di ampiezza b , periodo $T = 24$, pulsazione $\omega = 2\pi/T$ e fase $\varphi = 3\pi/2$ (fase temporale $t_\varphi = \varphi/\omega = T \frac{3}{4} = 3t_0$ rispetto alla rappresentazione canonica di Fourier con fase nulla della sinusoide ad una semionda positiva).



$$\varphi = 0.0, \quad b = 1, \quad \omega = \pi/12, \quad n = 10$$



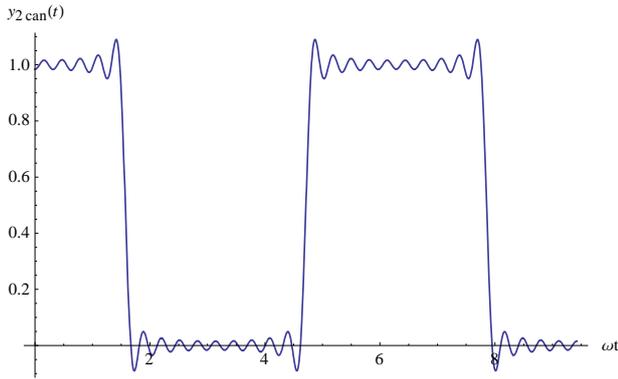
$$\varphi = 3\pi/2, \quad b = 1, \quad \omega = \pi/12, \quad n = 10$$

La $y_1(t)$ vuole rappresentare la variazione "ideale" giornaliera dell'irradianza solare su una superficie orizzontale (andamento sinusoidale durante il di, $6 \text{ h} < t < 18 \text{ h}$, e valore nullo durante la notte, $18 \text{ h} < t < 6 \text{ h}$) rispetto ad un valore medio di irradianza solare (costante durante il di, nullo durante la notte) rappresentato dalla funzione $y_2(t)$.

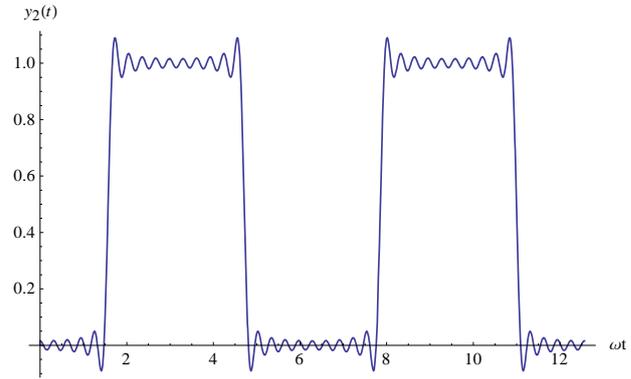
La $y_2(t)$ rappresenta, infatti, tale valore medio come la serie di Fourier di un'onda rettangolare non negativa di ampiezza B , periodo $T = 24$, pulsazione $\omega = 2\pi/T$ e fase $\varphi = -\pi$ (fase temporale

$t_\varphi = \varphi/\omega = -\frac{T}{2} = -2t_0$ rispetto alla rappresentazione canonica di Fourier con fase nulla) e rapporto tra

tempo di permanenza del valore B e periodo T (*duty-cycle* τ/T) pari a $1/2$.



$$\varphi = 0.0, B = 1, \omega = \pi/12, n = 20, \tau/T = 1/2$$



$$\varphi = -\pi, B = 1, \omega = \pi/12, n = 20, \tau/T = 1/2$$

La funzione $Y^2(t)$ sarà allora:

$$Y^2(t) = \left\{ \frac{\int_0^t y(t) dt}{t} \right\}^2 = \left\{ \frac{\int_0^t [y_1(t) + y_2(t)] dt}{t} \right\}^2 =$$

$$\left\{ \frac{1}{\omega t} \left(\frac{B\omega t}{2} + \frac{b\omega t}{\pi} + \frac{(-3(4B + b\pi) + 4b\cos[\omega t])\text{sen}[\omega t]}{6\pi} + \frac{2B\text{sen}[3\omega t]}{9\pi} - \frac{b\text{sen}[4\omega t]}{30\pi} - \frac{2B\text{sen}[5\omega t]}{25\pi} + \frac{2B\text{sen}[7\omega t]}{49\pi} \right) - \frac{2B\text{sen}[9\omega t]}{81\pi} + \frac{2B\text{sen}[11\omega t]}{121\pi} - \frac{2B\text{sen}[13\omega t]}{169\pi} + \frac{2B\text{sen}[15\omega t]}{225\pi} - \frac{2B\text{sen}[17\omega t]}{289\pi} + \frac{2B\text{sen}[19\omega t]}{361\pi} \right) \right\}^2$$

Si sono considerate sufficienti, nell'integrazione, solo due armoniche per $y_1(t)$, mentre ne sono necessarie almeno venti per una rappresentazione di $y_2(t)$ considerata adeguata .

In queste condizioni è:

$$\lim_{t \rightarrow 0} Y^2(t) = \left[B \left(\frac{1}{2} - \frac{22128676}{14549535\pi} \right) + b \left(-\frac{1}{2} + \frac{23}{15\pi} \right) \right]^2 \text{ per un numero di armoniche finito}$$

$$\lim_{\substack{t \rightarrow 0 \\ n \rightarrow \infty}} Y^2(t) = \lim_{c \rightarrow \frac{1}{2}} \left[(B - b) \left(\frac{1}{2} - c \right) \right]^2 = 0 \quad \text{per un numero di armoniche infinito}$$

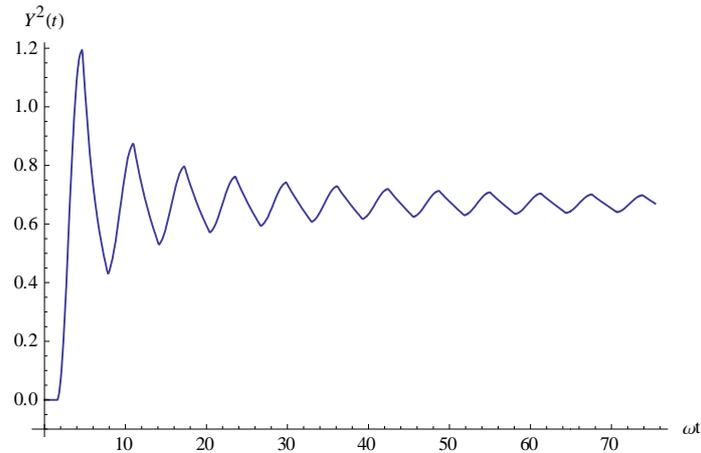
$$\lim_{t \rightarrow \infty} Y^2(t) = \left[\frac{B}{2} + \frac{b}{\pi} \right]^2$$

Assumendo $B = 1, b = 1$ si ha:

$$\lim_{t \rightarrow 0} Y^2(t) \cong 0.0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Y^2(t) = \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \right]^2 \cong 0.67$$

In figura è mostrato l'andamento di $Y^2(t)$ con queste posizioni:



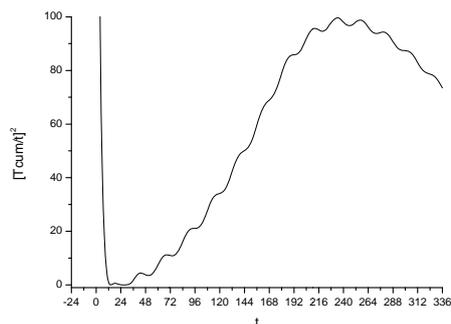
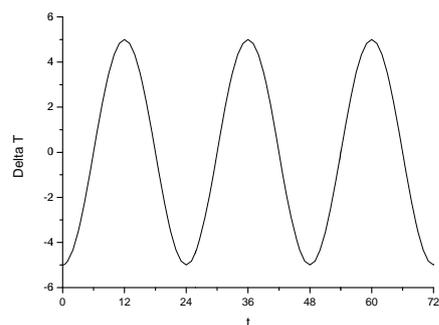
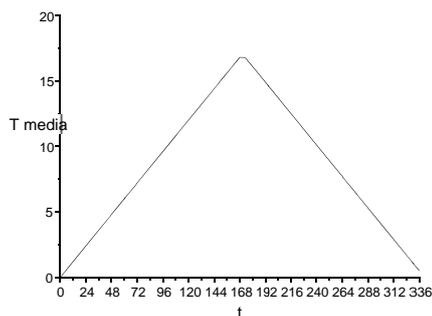
Anche in questo caso si osserva che, dopo un “overshoot” iniziale dal valore limite zero per $t = 0$,

l'oscillazione si smorza rapidamente con t per tendere al valore limite $\left[\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \right]^2$ all'infinito.

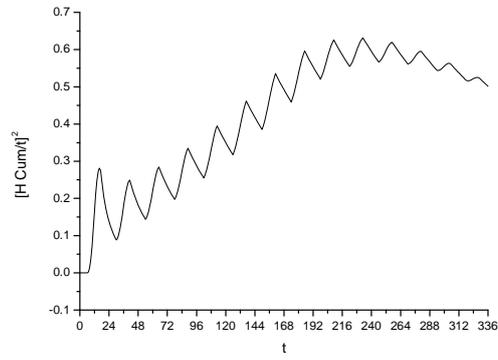
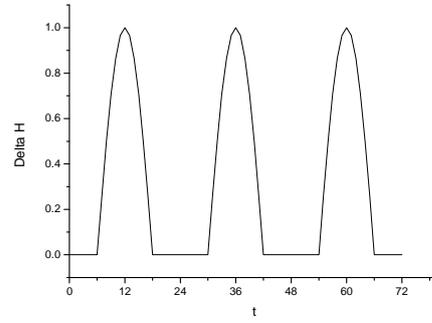
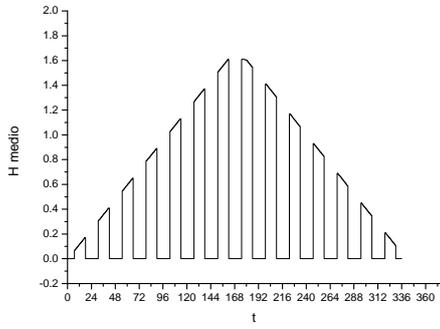
6.2 CONCLUSIONI

La funzione composta $Z(t) = \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)}$ riprodurrà le caratteristiche delle due funzioni componenti: in prossimità di $t = 0$ l'ampiezza delle oscillazioni sarà alta con la possibilità, inoltre, di un notevole “overshoot” e con il crescere di t le oscillazioni decresceranno e si stabilizzeranno intorno ad un valore medio. Le oscillazioni moduleranno questo valore medio che dipenderà dall'andamento della funzione $A(t)$ per la $X(t)$ e della funzione $y_2(t)$ per $Y(t)$. In altre parole il “trend” della funzione $Z(t)$ sarà dettato da $A(t)$ e da $y_2(t)$. I grafici seguenti illustrano la situazione per gli andamenti della temperatura $\{T(t) \equiv X(t)\}$ e dell'irradiazione $\{H(t) \equiv Y(t)\}$ indicati.

Temperatura T :



Irradiazione H:



7 Appendice 2

7.1 Considerazioni sul termine inerziale $K(\mu, t)$

Avevamo visto che la condizione di potenza cumulata di climatizzazione estiva $P(t) = 0$ si verificava per un tempo t^* in corrispondenza del quale era $V_C(t^*) = V_C^{\min} = K(\mu, t^*)V_C^*$ con $V_C^* = cost$.

In tutti i casi esaminati si è osservato che:

$$384h \leq t^* \leq 416h \quad \text{ovvero} \quad t^* = 400h \pm 4\%$$

$$1.25 \leq K(\mu, t^*)V_C^* \leq 1.65 \quad \text{ovvero} \quad K(\mu, t^*)V_C^* = 1.45 \pm 14\%$$

Riportiamo nella figura seguente, per esempio, il grafico del modulo del vettore climatico per Napoli:

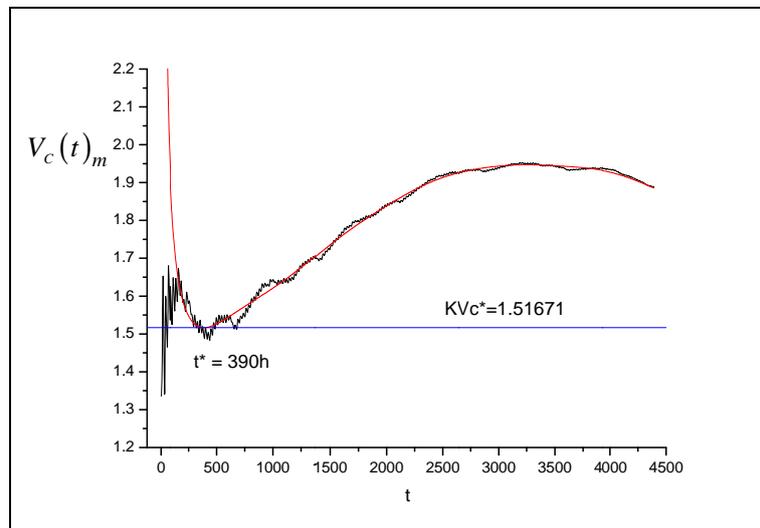


Figura2-1.

e l'analogo per Belluno

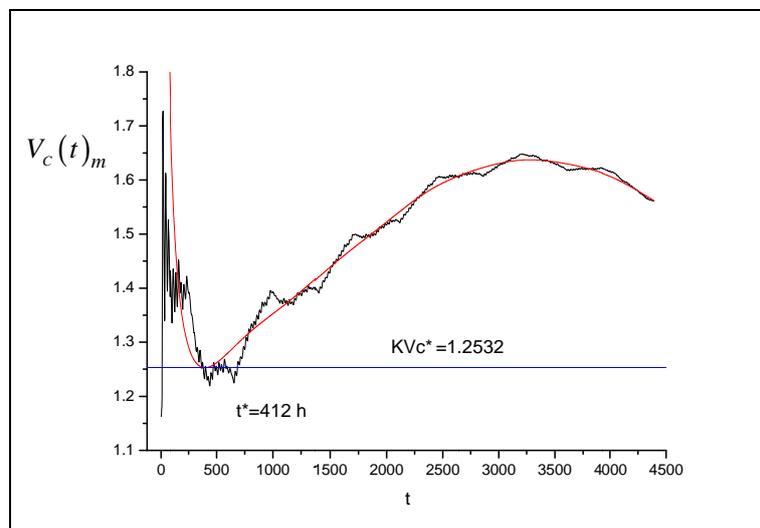


Figura2-2.

Il modello lineare dell'indice di severità climatica, applicato per l'intero periodo di osservazione $T = 4392h$, comportava che fosse:

$$\frac{P(T)}{b} = V_c(T) - K(\mu, T)V_c^* = V_c(T) - k(\mu)V_c^*$$

$$k(\mu)V_c^* = cost$$

La relazione lineare era stata calibrata [1] per 20 località e 4 tipologie di edificio differenti per massa e esposizione solare: il valore $k(\mu)V_c^* = 1.468$ era stato infatti ottenuto tramite *fitting* lineare ai minimi quadrati di tutti i risultati puntuali ottenuti dai 20x4 calcoli dinamici effettuati per le varie configurazioni.

Il valore ottenuto è quindi da considerare un valore mediato affetto però da una limitata dispersione:

$$k(\mu)V_c^* = 1.468 \pm 5\% \text{ nei casi esaminati.}$$

Questo risultato confermava che, per un tempo di calcolo sufficientemente lungo, l'effetto delle variazioni dell'inerzia e, di conseguenza, delle variazioni di energia accumulata dall'involucro e dall'aria in esso contenuta a causa delle differenti condizioni climatiche esterne di partenza in corrispondenza dell'inizio della climatizzazione, era limitato. Ne risulta anche giustificato l'utilizzo di tale approssimazione per la zonizzazione estiva del territorio italiano.

Rinunciando a questa visione *integrale* e volendo esplorare il funzionamento del modello per $0 \leq t \leq T$, occorre considerare con maggior attenzione l'influenza dell'inerzia dell'edificio e delle sue condizioni iniziali con riferimento all'energia accumulata fino all'intervento dell'impianto di climatizzazione.

Se si vuole considerare esplicitamente questo effetto, si deve scrivere:

$$\frac{P(T)}{b} = \frac{\Pi(T) - \eta V_c^{\min}}{b} = \frac{\Pi(T)}{b} - \hat{\eta} V_c^{\min} = V_c(T) - k(\mu)V_c^*$$

dove $P(T)$ è la potenza cumulata di calcolo valutata con il calcolo dinamico, $\Pi(T)$ la potenza cumulata "ideale" necessaria per portare il sistema alle condizioni climatiche identificate da $V_c(T)$ a partire da una condizione climatica ideale indicata da $V_c = 0$ e, infine ηV_c^{\min} è la potenza cumulata di base in corrispondenza di V_c^{\min} .

Per quanto riguarda il termine η , che è una costante dell'edificio, dovrà essere:

$$\eta = f(C, c_p, V)$$

dove per C si intende la capacità termica dell'edificio, e c_p e V sono rispettivamente il calore specifico a pressione costante dell'aria e il volume dell'aria interna.

Per ogni edificio, infatti, il fattore inerziale ηV_C^{\min} deve crescere in maniera lineare con le condizioni climatiche esterne rappresentate da V_C^{\min} , proprio per il suo significato fisico.

Per il tempo corrente t si scriverà allora:

$$\frac{P(t)}{b} = \frac{\Pi(t) - \eta V_C^{\min}}{b} = \frac{\Pi(t)}{b} - \hat{\eta} V_C^{\min} = V_C(t) - K(\mu, t^*) V_C^*$$

L'identificazione, vista nei paragrafi precedenti, del termine $K(\mu, t^*) V_C^*$ con il minimo del modulo del vettore climatico V_C^{\min} , in corrispondenza del quale si aveva potenza cumulata nulla, comporta:

$$K(\mu, t^*) = \frac{V_C^{\min}}{V_C^*}$$

Il fattore inerziale dipende, giacché è $V_C^* = cost$, direttamente da V_C^{\min} , cioè da un valore proporzionale all'energia iniziale accumulata dall'edificio, diversa da località a località.

Per tutte le sette località esaminate, il grafico della figura seguente riporta l'andamento del termine V_C^{\min} contro $V_C(t)_{\max}$.

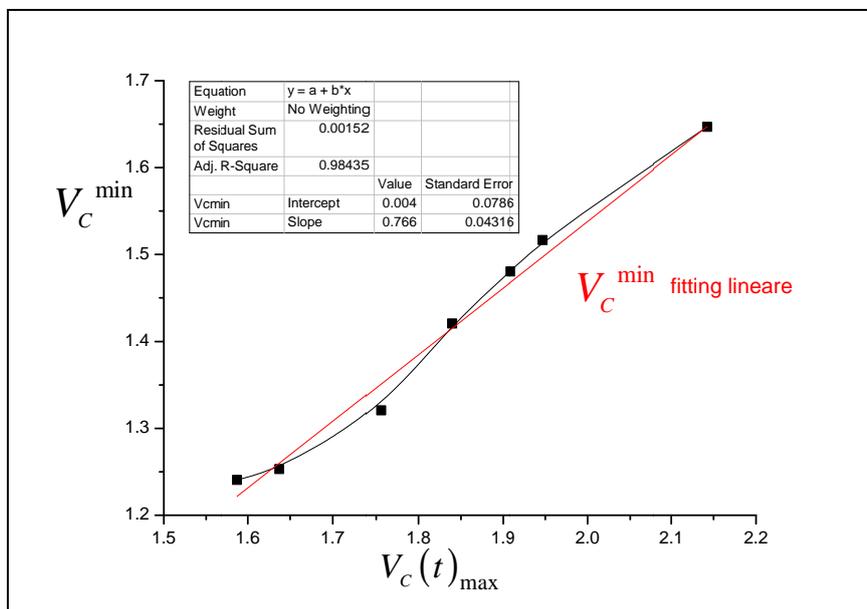


Figura 2-3.

Si osserva che il minimo del modulo del vettore climatico è ben correlato linearmente con il suo valore massimo.

Consideriamo le relazioni seguenti, d'immediata derivazione da quanto detto:

$$\frac{K(\mu, t^*)}{k(\mu)} = \frac{1}{k(\mu)} \frac{V_c^{\min}}{V_c^*}$$

$$V_c^{\min}(t) = a + bV(t)_{\max}$$

$$\frac{K(\mu, t^*)}{k(\mu)} = \frac{1}{k(\mu)} \frac{(a + bV(t)_{\max})}{V_c^*}$$

Se si considera che è mediamente $k(\mu)V_c^* = 1.468$, si può rappresentare nel grafico della figura seguente il rapporto tra il fattore inerziale del modello al tempo corrente con quello derivato dall'approccio integrale per l'intero tempo T .

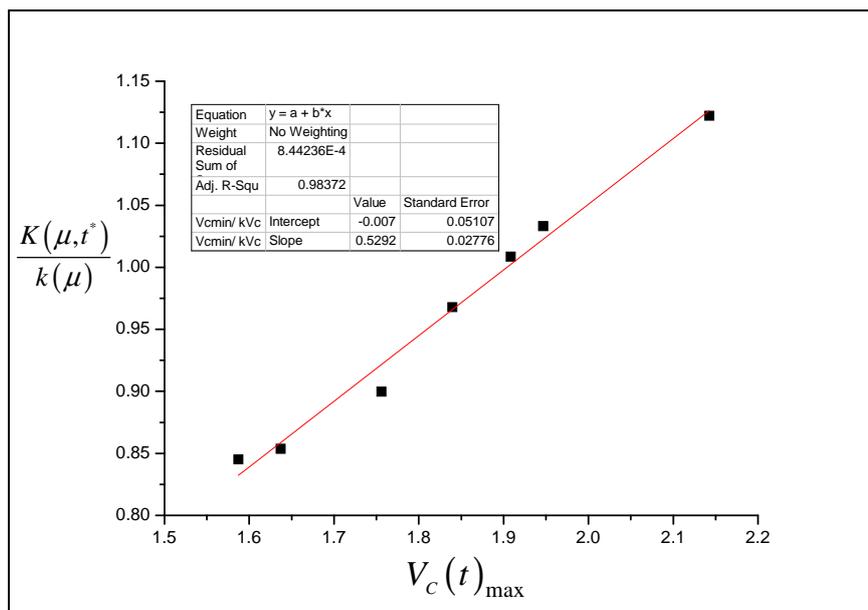


Figura 2-4.

Il grafico, apparentemente, riporta le stesse informazioni di quello precedente, anche se è concettualmente differente.

A conferma di quanto già detto sulle differenze tra fattore d'inerzia valutato al tempo T e quello valutato dal modello a tempo corrente $0 \leq t \leq T$, il valore medio di $\frac{K(\mu, t^*)}{k(\mu)}$, nel campo di $V_c(t)_{\max}$ esplorato e

considerato rappresentativo della distribuzione nel territorio nazionale, è $\left[\frac{K(\mu, t^*)}{k(\mu)} \right] = 0.96$, prossimo quindi al valore unitario, con una variazione massima di circa il $\pm 15\%$.

8 Riferimenti bibliografici

Technical reports:

- [1] Terrinoni Luciano, Signoretti Paolo, Iatauro Domenico, Romeo Carlo, Federici Alessandro (2010). Prima applicazione dell'indice di severità climatica "ALL WEATHER" per la definizione delle zone climatiche dell'Italia per la regolamentazione dei consumi energetici derivanti dalla climatizzazione estiva degli edifici. ENEA Technical Report (RT/2010/18/ENEA).
- [2] Terrinoni Luciano, Signoretti Paolo, Iatauro Domenico (2011). Edifici del settore terziario: seconda applicazione dell'indice di severità climatica "ALL WEATHER". ENEA Technical Report (RT/2011/12/ENEA).
- [3] Terrinoni Luciano, Signoretti Paolo, Iatauro Domenico (2012). Classificazione dei comuni italiani ai fini della classificazione estiva degli edifici. ENEA Technical Report (RT/2012/23/ENEA).
- [4] Terrinoni Luciano (2013). Indice di severità climatica: sul calcolo della superficie orizzontale equivalente di un involucro edilizio ai fini degli effetti termici della radiazione solare. ENEA Technical Report (RT/2013/4/ENEA)
- [5] Terrinoni Luciano (2006). Applicazione di un criterio razionale per la classificazione degli edifici nella certificazione energetica in edilizia. ENEA Technical Report (RT/2006/587/TER).
- [6] Terrinoni Luciano (2008). Un approccio razionale alla definizione delle zone climatiche di un territorio per la regolamentazione dei consumi energetici derivanti dalla climatizzazione degli edifici. ENEA Technical Report (RT/2008/20/TER).

Papers

- [7] Terrinoni Luciano, Iatauro Domenico (2009). Definizione delle zone climatiche di un territorio per la regolamentazione dei consumi energetici derivanti dalla climatizzazione degli edifici: dai gradi giorno invernali agli indici di severità climatica "ALL WEATHER". Proceedings, AIGE Energy Management Conference, Parma, 4-5 giugno, 2009
- [8] Terrinoni Luciano, Signoretti Paolo, Iatauro Domenico, Romeo Carlo, Federici Alessandro Definizione, analisi e applicazione di un Indice di Severità climatica per la zonizzazione del territorio nazionale ai fini della climatizzazione estiva degli edifici Proceedings, IV Congresso AIGE Energy Management Conference, Roma 26-27 Maggio 2010
- [9] Terrinoni Luciano, Signoretti Paolo, Iatauro Domenico, Romeo Carlo, Federici Alessandro (2010). Definition, analysis and application of a climatic severity index aimed at zoning the Italian territory for summer air conditioning of buildings. International Journal of Heat & Technology, Vol 28, n.2.
- [10] Terrinoni Luciano, Signoretti Paolo, Iatauro Domenico, Romeo Carlo, Federici Alessandro (2010). Summer air conditioning of buildings: definition, analysis and application of a climatic severity index aimed at zoning the Italian territory. Proceedings, PALENC 5th European Conference on Energy Performance & Indoor Climate in Buildings
- [12] Terrinoni Luciano, Signoretti Paolo, Iatauro Domenico, Romeo Carlo, Federici Alessandro (2013). Climatic Severity Index: definition of summer climatic zones in Italy through the assessment of air conditioning energy need in buildings. CLIMA 2013, 11th REHVA World Congress & the 8th International Conference on IAQVEC Praga 6-19 giugno