

ANALISI DEL REGIME ANEMOMETRICO A SCALA URBANA DELLA CITTÀ DI PALERMO

Giorgio Beccali¹, Giuseppina Ciulla¹, Simona Culotta^{1*}, Valerio Lo Brano¹, Aldo Orioli¹

¹Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali (DREAM), Università degli studi di Palermo
Viale delle scienze, Edificio 9, 90128 Palermo
*simonaculotta@dream.unipa.it

SOMMARIO

Allo scopo di valutare la possibilità di sfruttare l'energia eolica anche in zone fortemente urbanizzate recentemente la Comunità Europea ha posto tra le sue priorità scientifiche la redazione di atlanti eolici a piccola scala. Al fine di fornire dati che possano condurre ad una corretta valutazione eolica di centri urbani, nel seguente lavoro vengono analizzate le caratteristiche del regime anemometrico dell'area urbana di Palermo, registrate da un rete di monitoraggio automatica afferente al Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali (DREAM) e composta da quattro stazioni meteo. Dopo un esame statistico preliminare, in cui le serie temporali della velocità del vento sono state divise e analizzate per andamenti stagionali, sono state impiegate le distribuzioni di densità di probabilità (PDF) Weibull e Gamma per descrivere la distribuzione frequenziale della velocità del vento rilevata. Per ogni centralina e per ogni periodo temporale sono state calcolate le distribuzioni, i parametri di scala e di forma e la loro stima è stata effettuata utilizzando gli stimatori di massima verosimiglianza. La bontà di adattamento ai dati reali delle funzioni di probabilità così desunte è stata valutata da due classici test statistici: Kolmogorov-Smirnov e Anderson-Darling. Infatti una corretta valutazione dei fattori di scala e di forma può consentire una accurata analisi energetica ed economica della risorsa microeolica.

INTRODUZIONE

L'energia eolica può essere sfruttata sia nelle centrali elettriche di grandi dimensioni sia in piccole installazioni per uso privato. Le centrali eoliche, che in passato erano situate principalmente nelle zone di pianura ed in grandi spazi aperti, recentemente sono state installate anche nelle vicinanze di zone boschive o comunque in siti caratterizzati da una complessa orografia locale.

Anche se può essere considerata una risorsa economicamente poco interessante, vi è una crescente attenzione per l'energia generata dal vento che soffia all'interno dell'ambiente urbano in quanto potrebbe utilmente contribuire a donare una parziale autonomia dalla rete elettrica nazionale a singoli edifici. Ovviamente, la collocazione di un impianto eolico in un luogo dove la circolazione dell'aria può essere fortemente influenzata dalla presenza di ostacoli naturali o artificiali, rende più difficile la corretta valutazione del rendimento energetico dell'impianto e richiede una migliore informazione circa le caratteristiche anemometriche locali.

Una delle priorità delle ricerche scientifiche individuate

dalla EUREC (European Renewable Energy Research Centres Agency) per le tecnologie energetiche rinnovabili, è la redazione di atlanti eolici a livello urbano [1]. Piccoli dispositivi, disponibili oggi sul mercato, sono stati appositamente sviluppati per la cosiddetta "generazione distribuita". Tali mini generatori eolici possono essere collegati alla rete elettrica nazionale (grid connected) oppure essere impiegati per alimentare direttamente utenze isolate (stand alone). Grazie ai progressi fatti in questo campo tecnologico ed alla recente introduzione di specifici incentivi economici, questi sistemi di produzione di energia elettrica si vanno diffondendo sempre di più e, anche se limitatamente alle aree caratterizzate da una energia eolica adeguata, ciò contribuirà in modo significativo alla riduzione dell'effetto serra. Seguendo la tendenza generale di molti paesi, l'Italia ha quindi recentemente introdotto incentivi economici volti a determinare un aumento del consumo di energia eolica. Il 18 dicembre 2008, il Ministero dello Sviluppo Economico ha decretato alcune importanti provvedimenti [2]; in particolare, le centrali eoliche che hanno una media annuale di potenza generata variabile da 1 a 200 kW possono vendere l'energia elettrica che viene immessa nella rete nazionale ad un prezzo

di 0,30 € / kWh per i prossimi 15 anni.

Con l'obiettivo di fornire i dati raccolti dalle misure effettuate in un contesto urbano reale, e di identificare e verificare la loro migliore distribuzione statistica, in questo lavoro viene riportata una dettagliata analisi della velocità del vento rilevata nella città di Palermo.

In particolare dopo una breve descrizione del sistema di misura della velocità del vento, vengono mostrati i risultati che sono stati ottenuti dall'applicazione delle distribuzioni di Weibull e Gamma. La qualità dell'adattamento dei dati è stata infine valutata utilizzando il test di Kolmogorov-Smirnov ed il test di Anderson-Darling.

LA RETE DI MONITORAGGIO METEO CLIMATICA DEL DREAM

La città di Palermo ha un clima mediterraneo con inverni miti ed umidi ed estati calde e asciutte. In inverno la temperatura media oscilla tra gli 8 ed i 14 °C e raramente scende a 0 °C. Fenomeni come la neve e la nebbia sono estremamente rari. A volte è possibile misurare anche 25 °C nel mese di gennaio. Le piogge, che sono principalmente concentrate nei mesi di ottobre e marzo, sono generalmente deboli o moderate, raramente intense. La temperatura media durante l'estate varia tra i 21 ed i 28 °C. In estate le temperature raggiungono i 33 °C, ma sono anche state registrate temperature di 42 °C. L'umidità media è di circa il 70% nel corso di ogni stagione.

La rete urbana di monitoraggio meteo climatica creata e gestita dal DREAM è costituita da quattro stazioni, identificate in Fig.1 da un marker verde, situate in diverse zone della città di Palermo.

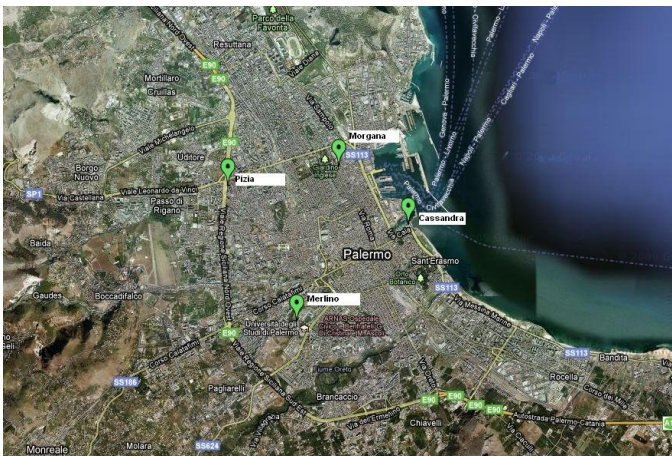


Figura 1: Dislocazione delle stazioni di rilevamento dati meteo climatiche nell'area urbana di Palermo (fornita da Google Map).

In dettaglio le stazioni hanno le seguenti coordinate geografiche:

- Stazione Merlino: Long. 13° 20' 46.25"E – Lat. 38° 06' 14.42" N
- Stazione Morgana: Long. 13° 21' 20.00" E – Lat. 38° 07' 51.95" N
- Stazione Cassandra: Long. 13° 22' 15.84" E – Lat. 38° 07' 15.88" N

- Stazione Pizia: Long. 13° 19' 49.59" E – Lat. 38° 07' 41.64" N

Ogni stazione meteorologica, che è alimentata da un pannello fotovoltaico e da una batteria di accumulo servita da un regolatore di carica, è dotata di sensori per la misurazione della temperatura dell'aria, dell'umidità e del punto di rugiada, della pressione atmosferica, della velocità e della direzione del vento, della radiazione solare e della pioggia istantanea e cumulativa. Le grandezze rilevate vengono registrate da un datalogger e tramite un modem GSM vengono inviati ad intervalli regolari ad un PC remoto, situato presso l'edificio del DREAM, utilizzando una connessione GPRS. La scelta dell'intervallo di archiviazione dati può variare da 1 a 120 minuti ed è possibile memorizzare una quantità di dati pari a 6 mesi. Il database remoto viene aggiornato ogni 30 minuti per mezzo di un SMS inviato dal modem GSM dotato di una scheda SIM abilitata alla trasmissione di dati.

Poiché il sistema di data processing assicurato dal software di gestione proprietario del datalogger utilizzato non era adatto allo scopo del presente studio, gli autori hanno sviluppato un sistema automatico per la raccolta ed il trattamento dei dati meteo. Ogni 30 minuti ciascuna stazione meteo invia un SMS contenente i dati aggiornati e viene creato un file ASCII contenente la serie storica dell'ultima settimana. Un server Linux si connette alla cartella in cui il file di testo viene generato e copia il file in una cartella locale. La procedura è automatizzata da uno script bash che si ripete per ogni stazione meteo. Una volta che è stato trasferito, il file ASCII deve essere modificato per consentire al sistema di aggiornare il database. La modifica viene automaticamente effettuata per mezzo di uno script scritto in Perl: un linguaggio particolarmente adatto per la gestione dei file di testo.

Il database scelto è MySQL, il più popolare tra i database open source; tale database server permette una ottima integrazione tra il sistema Linux, il server web Apache per la pubblicazione di siti e pagine web ed il linguaggio di scripting PHP per la creazione di pagine Web dinamiche. Questa piattaforma software è conosciuta anche come LAMP (Linux-Apache-MySQL-PHP). In questo modo, il sistema Linux dispone di un database MySQL sempre aggiornato ogni trenta minuti contenente i dati meteo relativi da tutte le stazioni installate.

La pubblicazione dei dati avviene in modo automatico sulla pagina web: <http://www.dream.unipa.it/meteo> che mostra, tramite interfacciamento Api al sistema di Google Maps, l'ubicazione delle stazioni. Visitando questo sito l'utente ha la possibilità di scaricare i dati rilevati a partire dalla data di attivazione di ciascuna centralina [3].

MISURAZIONE DELLA VELOCITÀ DEL VENTO ED ANALISI PRELIMINARE DEI DATI

Un anemometro a coppette misura la velocità del vento espressa in metri al secondo. I dati, letti ogni minuto, sono stati mediati con 30 campioni e ne sono stati conservati due per ogni ora.

La raccolta dei dati disponibili comprende un periodo di 3 anni che va dal 30 novembre 2006 al 30 novembre 2009. I dati registrati dalla stazione meteo Pizia, a causa di problemi di funzionamento, sono disponibili solo dal 21 maggio 2007 al 21 maggio 2009. Seguendo l'approccio adottato nella

letteratura scientifica sono stati considerati separatamente i dati di calma di vento [4] e, se non esplicitamente indicato, tutti i risultati mostrati in questo lavoro sono basati su dati di vento a velocità non nulla.

Per l'analisi statistica preliminare, la serie di dati relativa ad ogni stazione è stata suddivisa in quattro sottoinsiemi stagionali. Nelle tabelle 1 e 2 sono riassunte le coperture e le qualità dei dati del vento. Per ogni stazione sono riportati il periodo di osservazione, il numero di dati con velocità del vento non nulla e di misure di calma, il numero di dati atteso e quello dei dati assenti. Un'analisi più attenta mette in evidenza come per ogni stazione la frazione di dati assenti è molto

piccola, confermando quindi l'alta affidabilità del sistema di monitoraggio della rete. L'assenza di tali dati è causata principalmente ad errori di trasmissione tra le stazioni ed il server principale dovuti a casuali assenze di segnale GSM.

Le più elevate frequenze di calma sono state registrate dalle stazioni meteorologiche poste nella parte settentrionale della città, Pizia e Morgana. Le stazioni poste nella parte meridionale, Merlino e Cassandra, sono invece caratterizzate da basse frequenze di calma per l'intero periodo di monitoraggio; l'estate è la stagione che ha le frequenze di maggiore calma.

Tabella 1: Qualità dei dati delle stazioni meteorologiche Merlino e Cassandra

| | Inizio periodo | Fine periodo | Dati non nulli | Dati di calma | Totale dati | Frequenza dati di calma | Dati attesi | Dati assenti | Frazione dati assenti |
|----------------|----------------|--------------|----------------|---------------|-------------|-------------------------|-------------|--------------|-----------------------|
| Merlino | | | | | | | | | |
| Periodo totale | 11-30-2006 | 11-30-2009 | 46485 | 5959 | 52444 | 1.136E-01 | 52608 | 164 | 3.117E-03 |
| Inverno | Dicembre | Febbraio | 12314 | 680 | 12994 | 5.233E-02 | 13008 | 14 | 1.076E-03 |
| Primavera | Marzo | Maggio | 11525 | 1719 | 13244 | 1.298E-01 | 13248 | 4 | 3.019E-04 |
| Estate | Giugno | Agosto | 10697 | 2408 | 13105 | 1.837E-01 | 13248 | 143 | 1.079E-02 |
| Autunno | Settembre | Novembre | 11949 | 1152 | 13101 | 8.793E-02 | 13104 | 3 | 2.289E-04 |
| Cassandra | | | | | | | | | |
| Periodo totale | 11-30-2006 | 11-30-2009 | 42153 | 10426 | 52579 | 1.983E-01 | 52608 | 29 | 5.512E-04 |
| Inverno | Dicembre | Febbraio | 12339 | 669 | 13008 | 5.143E-02 | 13008 | 0 | - |
| Primavera | Marzo | Maggio | 11110 | 2133 | 13243 | 1.611E-01 | 13248 | 5 | 3.774E-04 |
| Estate | Giugno | Agosto | 7350 | 5897 | 13247 | 4.452E-01 | 13248 | 1 | 7.548E-05 |
| Autunno | Settembre | Novembre | 11354 | 1727 | 13081 | 1.320E-01 | 13104 | 23 | 1.755E-03 |

Tabella 2: Qualità dei dati delle stazioni meteorologiche Morgana e Pizia.

| | Inizio periodo | Fine periodo | Dati non nulli | Dati di calma | Totale dati | Frequenza dati di calma | Dati attesi | Dati assenti | Frazione dati assenti |
|----------------|----------------|--------------|----------------|---------------|-------------|-------------------------|-------------|--------------|-----------------------|
| Morgana | | | | | | | | | |
| Periodo totale | 11-30-2006 | 11-30-2009 | 34568 | 17963 | 52531 | 3.420E-01 | 52608 | 77 | 1.464E-03 |
| Inverno | Dicembre | Febbraio | 9390 | 3610 | 13000 | 2.777E-01 | 13008 | 8 | 6.150E-04 |
| Primavera | Marzo | Maggio | 9271 | 3919 | 13190 | 2.971E-01 | 13248 | 58 | 4.378E-03 |
| Estate | Giugno | Agosto | 8653 | 4594 | 13247 | 3.468E-01 | 13248 | 1 | 7.548E-05 |
| Autunno | Settembre | Novembre | 7254 | 5840 | 13094 | 4.460E-01 | 13104 | 10 | 7.631E-04 |
| Pizia | | | | | | | | | |
| Periodo totale | 05-21-2007 | 05-21-2009 | 26817 | 8232 | 35049 | 2.349E-01 | 35088 | 39 | 1.111E-03 |
| Inverno | Dicembre | Febbraio | 6971 | 1717 | 8688 | 1.976E-01 | 8688 | 0 | - |
| Primavea | Marzo | Maggio | 5964 | 2831 | 8795 | 3.219E-01 | 8832 | 37 | 4.189E-03 |
| Estate | Giugno | Agosto | 7021 | 1811 | 8832 | 2.050E-01 | 8832 | 0 | - |
| Autunno | Settembre | Novembre | 6861 | 1873 | 8734 | 2.144E-01 | 8736 | 2 | 2.289E-04 |

Nelle figure seguenti sono riportati gli istogrammi della velocità del vento per un periodo di tre anni per le stazioni Merlino, Cassandra e Morgana, e di due anni per Pizia.

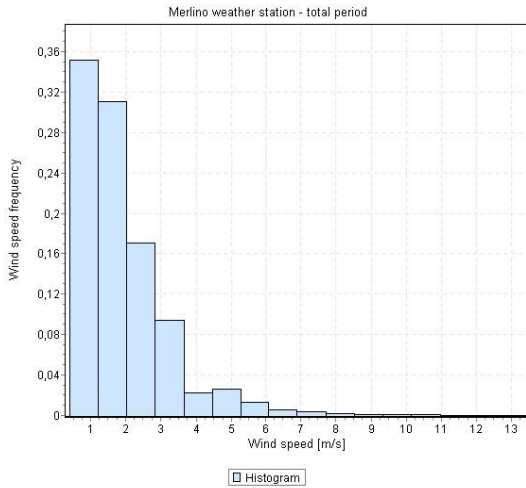


Figura 2: Istogramma della velocità del vento per la stazione meteorologica Merlino durante l'intero periodo di riferimento

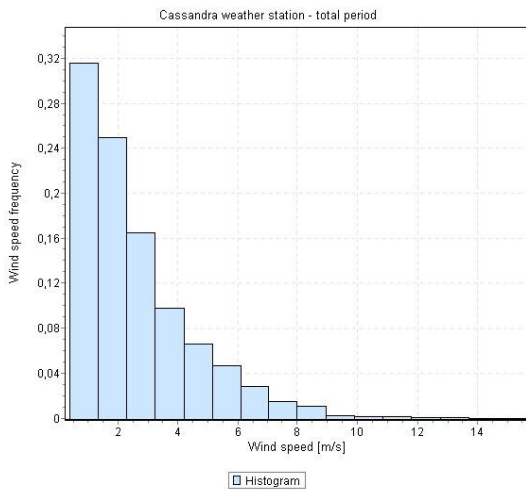


Figura 3: Istogramma della velocità del vento per la stazione meteorologica Cassandra durante l'intero periodo di riferimento.

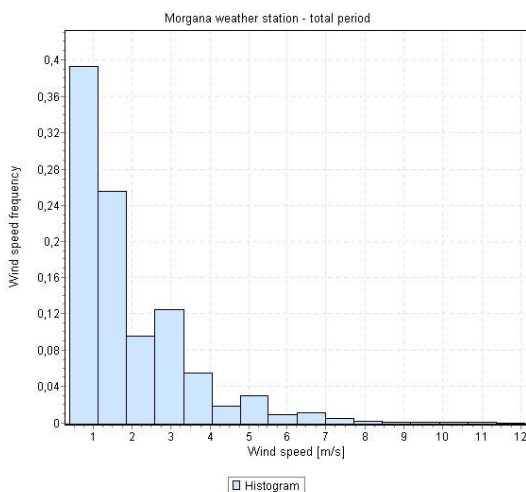


Figura 4: Istogramma della velocità del vento per la stazione meteorologica Morgana durante l'intero periodo di riferimento.

riferimento.

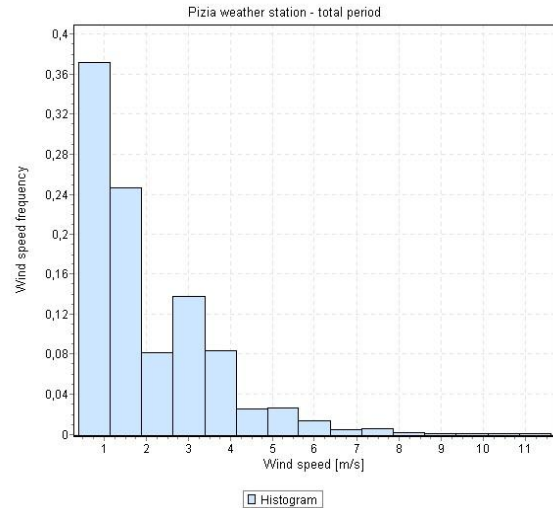


Figura 5: Istogramma della velocità del vento per la stazione meteorologica Pizia durante l'intero periodo di riferimento.

Le funzioni statistiche calcolate sono definite nella tabella 3, mentre i risultati di una prima analisi vengono riportati nella tabella 4.

Tabella 3: Definizione delle funzioni statistiche

| | |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Media aritmetica | $\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i .$ |
| Varianza | $\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$ |
| Deviazione Standard | $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}$ |
| Errore standard | $se = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ |
| Asimmetria | $\frac{N}{(N-1)(N-2)} \frac{1}{\sigma^3} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3$ |
| Curtosi | $\frac{(N+1)N}{(N-1)(N-2)(N-3)} \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4} - 3 \frac{(N-1)^2}{(N-2)(N-3)}$ |

Dai dati riportati in tabella 4 risulta evidente come la stazione Cassandra, grazie alla sua favorevole posizione (di fronte al mare), sia quella maggiormente ventilata. In particolare nella seguente stazione è stata rilevato il valore più alto della velocità del vento pari a 15.6 m/s, l'unico valore della media aritmetica globale superiore a 2 m/s ed il più elevato valore della varianza pari a 3.42.

Inoltre è possibile notare come la curtosi sia quasi sempre positiva; è leggermente negativa solo nei mesi di luglio ed agosto per la stazione di Merlino e nei mesi di maggio e luglio per la stazione Pizia.

Tabella 4: Dati statistici stagionali e totali

| | Inv | Prim | Est | Aut | Tutto |
|---------------------|--------|-------------|---------------|--------|---------------|
| Merlino | | | | | |
| Numero dati | 12314 | 11525 | 10697 | 11949 | 46485 |
| Massimo | 10.3 | 13.4 | 9.4 | 10.7 | 13.4 |
| Media aritmetica | 1.8162 | 1.8914 | 1.7821 | 1.6847 | 1.7932 |
| Varianza | 1.9147 | 1.8446 | 1.2649 | 1.6296 | 1.68 |
| Deviazione standard | 1.3837 | 1.3581 | 1.1247 | 1.2766 | 1.2961 |
| Errore standard | 0.0124 | 0.0126 | 0.0108 | 0.0116 | 0.0060 |
| Asimmetria | 1.6152 | 1.6633 | 0.9905 | 1.9723 | 1.6389 |
| Curtosi | 3.035 | 5.114 | 1.8082 | 5.8031 | 4.2897 |
| Cassandra | | | | | |
| Numero dati | 12339 | 11110 | 7350 | 11354 | 42153 |
| Massimo | 14.3 | 15.6 | 12.1 | 13 | 15.6 |
| Media aritmetica | 2.6762 | 2.8921 | 2.4342 | 2.4789 | 2.6378 |
| Varianza | 3.5778 | 4.0736 | 2.848 | 2.8888 | 3.4269 |
| Deviazione standard | 1.8915 | 2.0183 | 1.6876 | 1.6996 | 1.8512 |
| Errore standard | 0.017 | 0.0191 | 0.0196 | 0.0159 | 0.009 |
| Asimmetria | 1.2804 | 1.1822 | 1.4978 | 1.5055 | 1.3573 |
| Curtosi | 1.7349 | 1.8897 | 3.5632 | 3.4209 | 2.4665 |
| Morgana | | | | | |
| Numero dati | 9390 | 9271 | 8653 | 7254 | 34568 |
| Massimo | 10.7 | 12.1 | 8.9 | 11.2 | 12.1 |
| Media aritmetica | 1.7583 | 2.1348 | 1.7743 | 1.67 | 1.8448 |
| Varianza | 2.103 | 2.5826 | 1.7055 | 1.9902 | 2.1405 |
| Deviazione standard | 1.4502 | 1.607 | 1.3059 | 1.4107 | 1.4631 |
| Errore standard | 0.0149 | 0.0166 | 0.014 | 0.0165 | 0.0078 |
| Asimmetria | 1.8062 | 1.2894 | 1.411 | 1.9752 | 1.6066 |
| Curtosi | 3.8737 | 1.8189 | 2.7725 | 5.5478 | 3.2751 |
| Pizia | | | | | |
| Numero dati | 6971 | 5964 | 7021 | 6861 | 26817 |
| Massimo | 9.8 | 11.6 | 8.9 | 11.6 | 11.6 |
| Media aritmetica | 1.9053 | 2.2885 | 1.8495 | 1.7486 | 1.9358 |
| Varianza | 2.48 | 2.9369 | 1.653 | 2.0686 | 2.2984 |
| Deviazione standard | 1.5748 | 1.7137 | 1.2857 | 1.4383 | 1.5161 |
| Errore standard | 0.0188 | 0.0221 | 0.0153 | 0.0173 | 0.0092 |
| Asimmetria | 1.533 | 1.1339 | 0.93 | 1.8697 | 1.4336 |
| Curtosi | 2.5419 | 1.5611 | 0.7543 | 5.2028 | 2.7242 |

METODOLOGIA DELL'ANALISI STATISTICA

La conoscenza della funzione di densità di probabilità della velocità del vento è molto importante per la valutazione delle prestazioni energetiche dei sistemi che sfruttano l'energia eolica. In realtà, la qualità delle analisi energetiche dipende dalla capacità della PDF di descrivere accuratamente la frequenza di distribuzione della velocità del vento misurata. Nel presente studio, dopo aver verificato circa 40 PDF diverse, sono stati messi in evidenza i risultati ottenuti da due delle distribuzioni statistiche maggiormente citate nella bibliografia di settore, ovvero la Weibull e la Gamma.

Al fine di calcolare i parametri caratteristici di ogni PDF è stato utilizzato il metodo di massima verosimiglianza (MLM) [5].

La distribuzione di Weibull

La Weibull è una delle distribuzioni più usate per l'analisi statistica della velocità del vento. Recentemente, è stata applicata allo studio delle distribuzioni bimodali di vento per mezzo di una distribuzione mista basata su due PDF Weibull [6], [7]. Le proprietà statistiche della distribuzione sono descritte nella tabella 5 in cui α è il parametro di forma, β è il parametro di scala e Γ è la funzione Gamma.

Tabella 5: Proprietà statistiche della distribuzione di Weibull

| | |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PDF | $f(x) = \frac{\alpha x^{\alpha-1}}{\beta^\alpha} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}$ |
| Funzione di distribuzione cumulativa | $F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}$ |
| Media | $\beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$ |
| Varianza | $\beta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \right]$ |
| Asimmetria | $\frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{\alpha}\right) - 3\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right)\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) + 2\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \right]^3}$ |
| Curtosi | $\frac{\Gamma\left(1 + \frac{4}{\alpha}\right) - 4\Gamma\left(1 + \frac{3}{\alpha}\right)\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) + 6\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right)\left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \right]^2 - 3\left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \right]^4}{\left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \right]^2 \right\}^2}$ |

Gli stimatori di massima verosimiglianza (MLE) per la Weibull sono descritti dalle equazioni (1) e (2) [8]:

$$\alpha = \left[\frac{\sum_{i=1}^N x_i^\alpha \ln x_i}{\sum_{i=1}^N x_i^\alpha} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln x_i \right]^{-1} \quad (1)$$

$$\beta = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^\alpha \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (2)$$

dove a causa della forma implicita dell'equazione (1) il valore di α va calcolato con procedura iterativa.

Distribuzione Gamma

La distribuzione Gamma generalizzata è adatta a descrivere la frequenza delle velocità del vento quasi ovunque in Europa [9], [10]. Nella tabella 8 sono riassunte le proprietà statistiche della distribuzione in cui α è il parametro di forma, β è il parametro di scala, Γ è la funzione Gamma e $\Gamma_{x/\beta}$ è la funzione Gamma incompleta.

Tabella 6: Proprietà statistiche della distribuzione di Gamma

| | |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| PDF | $f(x) = \frac{x^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} e^{-\frac{x}{\beta}}$ |
| Distribuzione cumulativa | $F(x) = \frac{\Gamma_{x/\beta}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)}$ |
| Media | $\beta\alpha$ |
| Varianza | $\beta^2\alpha$ |
| Asimmetria | $\frac{2}{\sqrt{\alpha}}$ |
| Curtosi | $3 + \frac{6}{\alpha}$ |

Gli stimatori di massima verosimiglianza dei parametri di scala e di forma sono [11]:

$$\ln(\alpha) - \psi(\alpha) = \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^N x_i}{\sum_{i=1}^N \ln(x_i)} \right) \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1}{\alpha N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (4)$$

dove $\psi(\alpha)$ è la funzione digamma.

I risultati relativi all'applicazione degli MLE per le due distribuzioni sono riportati nella tabella seguente:

Tabella 7: parametri delle funzioni di distribuzione stagionali e totali

| | Inverno | Primavera | Estate | Autunno | TOTALE |
|------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| <i>Merlino</i> | | | | | |
| Gamma | $\alpha=1.7227$ $\beta=1.0542$ | $\alpha=1.9395$ $\beta=0.97521$ | $\alpha=2.5107$ $\beta=0.70978$ | $\alpha=1.7416$ $\beta=0.96732$ | $\alpha=1.914$ $\beta=0.93686$ |
| Weibull | $\alpha=1.5873$ $\beta=1.9949$ | $\alpha=1.6066$ $\beta=2.095$ | $\alpha=1.6931$ $\beta=2.0012$ | $\alpha=1.6244$ $\beta=1.8597$ | $\alpha=1.624$ $\beta=1.9856$ |
| <i>Cassandra</i> | | | | | |
| Gamma | $\alpha=2.0018$ $\beta=1.3369$ | $\alpha=2.0533$ $\beta=1.4085$ | $\alpha=2.0805$ $\beta=1.17$ | $\alpha=2.1272$ $\beta=1.1653$ | $\alpha=2.0304$ $\beta=1.2992$ |
| Weibull | $\alpha=1.6173$ $\beta=2.9468$ | $\alpha=1.5432$ $\beta=3.1936$ | $\alpha=1.5964$ $\beta=2.7044$ | $\alpha=1.6845$ $\beta=2.7475$ | $\alpha=1.6068$ $\beta=2.9131$ |
| <i>Morgana</i> | | | | | |
| Gamma | $\alpha=1.4701$ $\beta=1.196$ | $\alpha=1.7647$ $\beta=1.2097$ | $\alpha=1.8459$ $\beta=0.9612$ | $\alpha=1.4013$ $\beta=1.1917$ | $\alpha=1.5899$ $\beta=1.1603$ |
| Weibull | $\alpha=1.5252$ $\beta=1.9114$ | $\alpha=1.4817$ $\beta=2.3397$ | $\alpha=1.4836$ $\beta=1.9695$ | $\alpha=1.4782$ $\beta=1.8146$ | $\alpha=1.4859$ $\beta=2.0155$ |
| <i>Pizia</i> | | | | | |
| Gamma | $\alpha=1.4638$ $\beta=1.3016$ | $\alpha=1.7833$ $\beta=1.2833$ | $\alpha=2.0694$ $\beta=0.89377$ | $\alpha=1.919$ $\beta=0.9185$ | $\alpha=1.6305$ $\beta=1.1873$ |
| Weibull | $\alpha=1.3942$ $\beta=2.0662$ | $\alpha=1.3926$ $\beta=2.5103$ | $\alpha=1.5084$ $\beta=2.0575$ | $\alpha=1.4919$ $\beta=1.9516$ | $\alpha=1.4301$ $\beta=2.1172$ |

In particolare per ogni stazione sono stati evidenziati i valori di α e β al variare della stagione e per l'intero periodo di campionamento.

ACCURATEZZA DELLE FUNZIONI DI DENSITÀ DI PROBABILITÀ NEL RIPRODURRE I DATI REALI

Al fine di valutare la qualità dell'adattamento dei dati sono stati utilizzati due test statistici: il test di Kolmogorov-Smirnov (K) e quello di Anderson - Darling (A).

Tali test misurano la compatibilità di un campione casuale con una funzione di distribuzione di probabilità teorica; ovvero mostrano come la distribuzione si adatta ai dati raccolti.

Test di Kolmogorov-Smirnov

Il test è basato sulla funzione di distribuzione cumulativa empirica (ECDF), detta anche funzione di ripartizione empirica, definita per mezzo dei campioni x_1, x_2, \dots, x_N da:

$$F_n(x) = \frac{1}{N} [n(i)] \quad (5)$$

dove $n(i)$ è il numero di campioni minori di x_i ed N è il numero totale di campioni esaminati.

Dalla figura 4 è chiaro come la $F_n(x)$ è una funzione a gradini che incrementa di $1/N$ ad ogni nuovo x_i .

Il test di Kolmogorov-Smirnov fornisce un criterio molto semplice e adattabile a diverse necessità in quanto è basato sulla determinazione della massima distanza D fra la curva della funzione di ripartizione teorica e quella empirica;

definita come:

$$D = \max_{1 \leq i \leq n} \left[F(x_i) - \frac{i-1}{n}, \frac{i}{n} - F(x_i) \right] \quad (6)$$

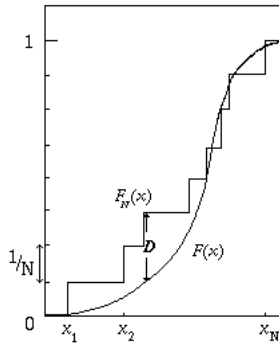


Figura 4: Rappresentazione grafica del test di Kolmogorov-Smirnov

Test di Anderson – Darling

La procedura di Anderson-Darling è un test generale

Tabella 8 Risultati della bontà dei test di adattamento (K:test di Kolmogorov-Smirnov; A: test di Anderson-Darling)

| | Inverno | | Primavera | | Estate | | Autunno | | totale | |
|------------------|---------|---|-----------|---|--------|---|---------|---|--------|---|
| Merlino | | | | | | | | | | |
| | K | A | K | A | K | A | K | A | K | A |
| Gamma | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Weibull | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Cassandra | | | | | | | | | | |
| | K | A | K | A | K | A | K | A | K | A |
| Gamma | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Weibull | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Morgana | | | | | | | | | | |
| | K | A | K | A | K | A | K | A | K | A |
| Gamma | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Weibull | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Pizia | | | | | | | | | | |
| | K | A | K | A | K | A | K | A | K | A |
| Gamma | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| Weibull | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |

Un'analisi dei risultati ottenuti dall'applicazione dei due test di adattamento mette in evidenza come in generale la distribuzione Gamma meglio descrive l'andamento dei dati registrati nell'area urbana di Palermo.

CONCLUSIONI

Tra le fonti di energia rinnovabile quella eolica ha avuto una più rapida crescita a livello mondiale e la redazione di atlanti eolici a livello urbano è una delle priorità delle ricerche per le tecnologie energetiche rinnovabili individuate dalla EUREC.

In tal senso la disponibilità di dati di velocità del vento nelle aree urbane, permetterà una migliore definizione delle caratteristiche tecniche delle mini turbine eoliche, specificamente sviluppate per la generazione distribuita. In questo articolo sono stati illustrati e analizzati i dati relativi alla velocità del vento registrati da una rete di monitoraggio installata nell'area urbana di Palermo. Dopo una breve

panoramica sul clima della città ed una descrizione della rete di monitoraggio meteo installata, sono stati analizzati i valori di tali misurazioni campionati con una cadenza di 30 minuti. Le serie temporali sono state suddivise in cinque periodi ausiliari ossia per ogni stagione e per l'intero periodo di campionamento.

utilizzato per verificare se un campione di valori rilevato può essere generato da una determinata PDF. Il test mette a confronto la funzione di distribuzione cumulativa osservata con la funzione di distribuzione cumulativa prevista per quel campione, dando maggior peso alle code della distribuzione rispetto al test di Kolmogorov-Smirnov.

Il valore del test statistico A^2 viene definito come:

$$A^2 = -N - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (2i-1) \{ \ln F(x_i) + \ln [1 - F(x_{N-i+1})] \} \quad (7)$$

dove $F(x_i)$ è la funzione di distribuzione cumulativa della distribuzione ipotizzata ed N è il numero di campioni esaminati.

I risultati dei due test di adattamento vengono illustrati nella tabella 8 in cui è possibile visualizzare i dati ottenuti per ciascuna stazione meteo, per le quattro stagioni e per l'intero periodo di campionamento. La posizione di classifica 1 identifica la migliore distribuzione per il periodo esaminato secondo i due test analizzati.

Per ciascuna stazione sono state svolte alcune analisi statistiche preliminari e sono state calcolate la media aritmetica, la varianza, la deviazione standard, l'errore standard, l'asimmetria e la curtosi. Per meglio caratterizzare la qualità dei dati registrati, sono stati calcolati i dati attesi, la frazione di dati assenti e le frequenze di calma.

I parametri di distribuzione di ciascuna delle PDF utilizzate nello studio sono stati forniti insieme al MLE appropriato. Sono stati calcolati i parametri di scala e di forma per ogni periodo e per ogni stazione, allo scopo di consentire l'uso di questi dati anche in altri contesti. Infine, ogni PDF è stata sottoposta a due test statistici che hanno portato alla definizione di una classifica per la bontà di adattamento. I

risultati mostrano che la distribuzione Gamma risulta essere generalmente più accurata della Weibull per descrivere le frequenze di velocità del vento in ambiente urbano.

NOMENCLATURA

| | |
|--------------------|---------------------------------------|
| A^2 | test statistico di Anderson-Darling |
| D | test statistico di Kolmogorov-Smirnov |
| x_1, \dots, x_n | campioni di una distribuzione |
| N | numero totale di campioni |
| α | parametro di forma; |
| β | parametro di scala; |
| Γ | funzione Gamma; |
| $\Gamma_{x/\beta}$ | funzione Gamma incompleta. |
| $\psi(\alpha)$ | funzione digamma. |

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. EUREC, (2009) Research priorities for renewable energy technology by 2020 and beyond, European Communities 2009
2. Ministero dello sviluppo economico Decreto 18 dicembre 2008 Incentivazione della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, ai sensi dell'articolo 2, comma 150, della legge 24 dicembre 2007 n.24
3. Beccali G., Cellura M., Culotta S., Lo Brano V., Marvuglia A. Set up of a monitoring system for a preliminary evaluation of the Urban Heat Island in the town of Palermo PLEA 2008 – 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin, 22nd to 24th October 2008
4. Ucar, A., Balo, F. Investigation of wind characteristics and assessment of wind-generation potentiality in Uludag-Bursa, Turkey. Applied Energy 86 (3), 333-339, 2009
5. Seguro JV, Lambert TW. Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics; 85:75–84. 2000
6. Carta, J.A., Ramírez, P. Analysis of two-component mixture Weibull statistics for estimation of wind speed distributions. Renewable Energy. Vol: 32 Issue: 3, March, 2007
7. Jaramillo, O.A.; Borja, M.A.. Wind speed analysis in La Ventosa, Mexico: a bimodal probability distribution case. Renewable Energy Volume: 29, Issue: 10, August, 2004, pp. 1613-1630
8. Dimitri Kececioglu. Reliability Engineering Handbook, Volume 1 and Volume 2, Destech Publications, 2002
9. Sherlock R.H. Analysing winds for frequency and duration on atmospheric pollution, Meteorol. Monogr. Am. Meteorol. Soc., Volume: 4, 1951
10. Kiss, P. and Jánosi, I. M. Comprehensive empirical analysis of ERA-40 surface wind speed distribution over Europe, Energy Conversion and Management, 49, 2142–2151, 2008.
10. Evans, Hastings, and Peacock. Statistical Distributions, 3rd. Ed., John Wiley and Sons (2000).

SUMMARY

This study investigates the wind speed characteristics recorded in the urban area of Palermo, in the south of Italy, by means of a monitoring network composed by four weather stations. After a preliminary statistical analysis, in which the wind speed time series were split and analyzed for each month and season, seven probability density functions have been employed to describe the wind speed frequency distributions: Weibull, and Gamma. The Shape and scale parameters for each weather station, period and distribution are provided. Their estimation was performed using the maximum likelihood method; the maximum likelihood estimators for each probability density function are also provided. The quality of the data-fit was assessed by means of two classic statistical tests: Kolmogorov – Smirnov and Anderson-Darling. These statistical tests are used to rank the selected distributions in order to identify the distribution better fitting the wind speed data measured in the urban area of Palermo. The Gamma probability density function seems to be the most reliable statistical distribution.