



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PALERMO**  
**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

**CORSO DI LAUREA IN AMBIENTE E TERRITORIO**  
DIPARTIMENTO DI RICERCHE ENERGETICHE ED AMBIENTALI



**Tesi di Laurea di:**  
Giuseppe Bellia

**Relatori:**  
*Ch.mo Prof. Ing. Giorgio Beccali*

*Ch.mo Prof. Vincenzo Liguori*

**Correlatore:**  
*Ing. Josè Massimiliano Galletto*

---

**ANNO ACCADEMICO 2006 – 2007**



# **INDICE**

## **Premessa**

### ***PARTE I – INQUADRAMENTO GENERALE E PROBLEMATICHE AMBIENTALI***

<b>1 - ENERGIA E SVILUPPO SOSTENIBILE</b>	<b>2</b>
1.1 - Inquinamento atmosferico	3
1.2 - Le emissioni di carbonio aumentano in modo allarmante	5
1.3 - Le emissioni di anidride carbonica storiche ed attuali nella Regione Sicilia	9
1.4 - L'effetto serra	11
1.5 - Cambiamenti climatici	13
1.6 - Il Protocollo di Kyoto - gli accordi internazionali e gli obblighi fondamentali	15
1.7 - La formalizzazione di nuovi strumenti di attuazione	19
1.8 - L'Italia e il Protocollo di Kyoto	20
1.9 - Sviluppo sostenibile e Fonti Rinnovabili	23
1.9.1 - Il contributo delle fonti energetiche rinnovabili	26

### ***PARTE II – STRUMENTI DI INCENTIVAZIONE E QUADRO NORMATIVO***

<b>2 - INQUADRAMENTO NORMATIVO</b>	<b>28</b>
2.1 - Incentivazione : La politica a sostegno dello sviluppo e diffusione delle fonti rinnovabili	28
2.1.1 - Il Decreto Bersani, i Certificati verdi e i Certificati RECS	28
2.2 - Percorso Normativo Nazionale	30
2.3 - Normativa della Regione Sicilia riguardo agli impianti eolici offshore	33
2.3.1 - Decreto del 10/09/2003 n. 1014	34
2.3.2 - Decreto del 28/04/2005	35
2.3.3 - Circolare n. 14 del 26 Maggio 2006	38
2.3.4 - Circolare n. 17 del 14 Dicembre 2006	39

<b>3 - L'ENERGIA DEL VENTO – RISORSA E STRUMENTI DI MISURA</b>	<b>43</b>
3.1 - Risorsa naturale : il Vento	43
3.2 - Risorsa e indicatori biologici - Rugosità e turbolenza	45
3.3 - Strumenti di misurazione del vento e modelli applicativi	46
3.4 - Leggi matematiche e forze che governano l'energia del vento	58
3.4.1 - Energia dal vento	59
3.4.2 - Analisi statistiche dei dati del vento	61
3.4.3 - Legge di Betz	65
3.4.4 - Funzione densità di potenza	68
3.4.5 - La forza di Coriolis	69
<b>4- TECNOLOGIA DEGLI AEROGENERATORI</b>	<b>70</b>
4.1 - Principio di funzionamento e tecnologia	70
4.2 - Tipologie di aerogeneratori	72
4.3 - Componenti di un Aerogeneratore	76
4.4 - Classificazione degli Impianti	84
4.5 - Le Wind-Farm	87
<b>5 - GLI IMPIANTI EOLICI OFF-SHORE - VALUTAZIONI ECONOMICHE</b>	
<b>E IMPATTI SULL'AMBIENTE</b>	<b>89</b>
5.1 - Differenze tra turbine offshore e onshore	90
5.2 - Vantaggi e limiti dell'offshore	93
5.3 - Tipologie di fondazioni per gli impianti eolici offshore	94
5.3.1 - Fondazione a gravità	96
5.3.2 - Fondazione Monopalo	98
5.3.2.1 - Erosione del terreno di fondazione dei monopali	101
5.3.3 - Fondazione Tripode	104
5.3.4 - Strutture di supporto galleggianti	105
5.4 - Fasi di montaggio di una turbina eolica a mare e lay-out	107
5.5 - Costi degli impianti eolici offshore	112
5.6 - Piano di smantellamento di un impianto eolico offshore	118
5.7 - Impatto ambientale degli impianti eolici offshore	121
5.8 - L'offshore nel mondo	130

**PARTE IV – CASO STUDIO:**  
*REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO EOLICO OFFSHORE IN SICILIA*

**6 - REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO EOLICO OFFSHORE AL LARGO**

<b>DELLA COSTA DI AGRIGENTO</b>	<b>137</b>
6.1 - L'impianto Eolico - Descrizione generale	138
6.2 - Inquadramento del sito	139
6.3- Geologia e formazione della Sicilia	145
6.4 - Aspetto idrogeologico esistente	151
6.5 - Studio geolitologico e degli apporti solidi potenziali dei bacini idrografici del territorio di Agrigento	151
6.6 - Stratigrafia generale	153
6.7 - Considerazioni Geomorfologiche sul sito in esame	156
6.8 - Sismicità e calcolo delle forze dinamiche secondo il D.M. 24/01/1986	156
6.9 - Studio Idraulico Marittimo	163
6.10 - Studio anemologico	164
6.11 - Previsione del moto ondoso al largo : Distanze di mare libero e valutazione dei fetches effettivi	175
6.12 - Caratteristiche dell'onda significativa al largo	176
6.13 - Studio della rifrazione	185
6.14 - Caratteristiche del moto ondoso	186
6.15 - Studio Vestas sulla ventosità del sito, sulla produzione annua di energia dell'impianto e stima delle emissioni annue di gas inquinanti evitate	195
6.16 - Descrizione delle installazioni previste	208
6.17 - Gestione Impianto	214
6.18 - Particolari costruttivi	215
6.19 - Costi dell'impianto offshore esaminato e confronto con i costi di un impianto onshore	232
6.20 - Piano di Smantellamento dell'impianto	234
6.21- Impatto ambientale e opere di mitigazione proposte	237
 Conclusioni	 241
 Bibliografia	



## ***PREMESSA***

L'obbiettivo di questa tesi è quello di fornire le informazioni necessarie, sia da un punto di vista normativo che tecnico, sulla produzione di energia elettrica da impianti eolici posti a mare con particolare attenzione al suo possibile sviluppo in Sicilia.

A tal fine, dopo una prima parte in cui verrà fatto un inquadramento generale di quelle che sono le problematiche ambientali e degli accordi internazionali stipulati tra i vari Paesi per fronteggiarle, si farà riferimento alla normativa, nazionale ed in particolare a quella vigente nella Regione Sicilia, riguardante gli impianti eolici offshore.

Successivamente si daranno delle informazioni circa le risorse, gli strumenti di misura, le leggi matematiche e le forze che governano il vento, la tecnologia e i principi di funzionamento degli aerogeneratori.

Verranno poi analizzati nel particolare gli impianti eolici offshore, considerando le differenze, da un punto di vista sia tecnico che dei costi, tra impianti onshore ed offshore, e verrà fatto cenno al grado di affermazione di questa tecnologia, nel mondo e nel nostro Paese.

Infine, per comprendere meglio le problematiche tecnico-progettuali che si riscontrano nella realizzazione di un impianto eolico a mare, è stato preso in esame il progetto proposto dalla Ditta "Moncada Costruzioni". Nell'affrontare lo studio di tale progetto verrà posta particolare attenzione agli aspetti geologici, idraulico-marittimi, progettuali ed energetici.

Tale progetto attualmente è il solo ad essere stato proposto in Sicilia, per cui dalla sua valutazione è possibile capire quale potrebbe essere il futuro di questa tecnologia nella nostra Regione.



## BIBLIOGRAFIA

- L'energia eolica offshore – ENEA (Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente)
- G. M.De Pratti, G.Lo Bianco, F. P. Vivoli, Energia dal vento – La fonte, la tecnologia, lo stato dell'arte
- Paul Breeze : The future of global offshore wind power – Business Insights
- Gareth P. Harrison, A. Robin Wallace: Climate sensitivity of marine energy
- W. Musial S. Butterfield:Future for Offshore Wind Energy – 2004
- Energia eolica: Aspetti Normativi, energetici, tecnologici ed ambientali – materiale tecnico-informativo ricevuto al Seminario del 5/5/2006 promosso dal dipartimento del DREAM (Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali) della facoltà di Ingegneria dell'Università di Palermo
- Le potenzialità dell'energia eolica offshore e delle energie marine progetto “Nostrum” – materiale tecnico-informativo ricevuto al Seminario dell'11/5/2006 promosso dall'ENEA e tenutosi a Catania
- Integrazione fra energia eolica offshore e itticoltura: il progetto “Mar de Trafalgar” – XXX° Convegno di idraulica e Costruzioni idrauliche – IDRA 2006
- Erosione indotta da onde e correnti di marea attorno a pali di grande diametro – IDRA 2006
- Atlante Eolico dell'Italia –CESI
- Loris Montanari: “Geologia Sicula: Un intreccio tra rocce e storia” – Agenzia Regionale per la Protezione dell'ambiente – Sicilia
- A. daina, F. La Mendola, G. Lombardo, A. Brucculeri, F. Daina: “Piano di Gestione delle coste della provincia di Agrigento e studi preliminari relativi al recupero ambientale delle aree di Licata, San leone, Porto Empedocle, Sciacca ed Eraclea Minoa” – Provincia Regionale di Agrigento – Assessorato Territorio Ambiente

## BIBLIOGRAFIA ELETTRONICA

- <http://www.windpower.org>
- <http://www.vestas.com>
- <http://www.natwindpower.org>
- <http://www.periodici.caspur.it>
- <http://www.idra2006.it/index1.htm>
- <http://www.enea.it>
- <http://www.enelgreenpower.it>
- <http://www.regionesicilia.it>

