

Dimensionamento de uma torre eólica para a estação RAEGE

Trabalho de Projeto para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica, Área de especialização em Construção e Manutenção de
Equipamentos Mecânicos

Autor

António João Chaves Medeiros

Orientadores

João Carlos Antunes Ferreira Mendes

Urbano Manuel Oliveira Ramos

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Coimbra, dezembro de 2018

Dedicatória

Aos meu pais Simão e Graciete

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar o meu especial agradecimento a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram, direta ou indiretamente, para o desenvolvimento do presente trabalho, nomeadamente:

Aos meus orientadores, Professor João Carlos Ferreira Mendes e Professor Urbano Manuel Oliveira Ramos, por toda a partilha de conhecimentos, incentivos, auxílio e atenção demonstradas.

Igualmente presto o meu especial agradecimento ao Governo dos Açores e em especial ao Eng. Luís Santos pela possibilidade que me foi dada de realizar este projeto nas instalações do RAEGE- Rede atlântica de estações geodésica e espaciais.

Agradeço profundamente à minha família por todo o apoio, motivação e preocupação dados nesta etapa pois sem a sua ajuda a realização deste trabalho não teria sido possível.

A minha namorada Ana Chaves por todo o carinho, dedicação e paciência durante esta etapa.

A todos os meus colegas e amigos pela camaradagem, amizade e paciência demonstradas durante a realização deste trabalho, bem como durante todo o meu percurso académico.

RESUMO

O presente trabalho, realizado no âmbito da obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, área de especialização em Construção e Manutenção de Equipamentos Mecânicos no Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, e consistiu no estudo e otimização de uma torre eólica para uma estação geodésica fundamental da RAEGE.

Tendo se procedido pela aquisição de dados suficientes para a seleção do aerogerador e dimensionamento da torre adequado as instalações do RAEGE.

No processo de dimensionamento foi realizado um estudo analítico inicial, tendo sido utilizado como referência para um estudo de otimização da estrutura.

Tendo sido realizado o desenho gráfico dos diversos componentes e em seguida realizado o seu estudo a estática com recurso aos elementos finitos utilizando o software “Solidworks”.

Palavras-chave: otimização; torre eólica; elementos finitos.

ABSTRACT

The present work, carried out in the scope of obtaining the degree of Master in Mechanical Engineering, area of specialization in Construction and Maintenance of Mechanical Equipment in the Department of Mechanical Engineering of the Superior Institute of Engineering of Coimbra, consisted in the study and optimization of a wind tower for a fundamental geodetic station of RAEGE.

The acquisition of sufficient data for the selection of the aerogenerator and the size of the appropriate tower has been carried out by the RAEGE facilities. In the sizing process an initial analytical study was carried out, being used as reference for a study of structural optimization.

The graphic design of the various components was carried out and then the static finite element study using Solidworks/Simulation software.

Keywords: optimization; tower; finite element.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	xii
Índice de Figuras do Capítulo 13.....	xvi
ÍNDICE DE QUADROS	xviii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Âmbito do Trabalho.....	1
1.2 Enquadramento Temático	2
1.3 Objetivos e Metodologia do Trabalho	2
2 A Energia Eólica	3
2.1 O que é a energia eólica.....	3
2.2 A enérgica eólica nos Açores.....	4
2.3 Origem das torres eólicas.....	6
2.4 Tipos de torres.....	7
2.4.1 Torre de betão.....	7
2.4.2 Torre híbrida	8
2.4.3 Torre Treliçada	8
2.4.4 Torre de madeira.....	9
2.4.5 Torre tubular em aço.....	10
3 RAEGE.....	11
3.1 Introdução	11
3.2 Localização	13
3.3 Definição de estação geodésica fundamental	14
3.4 Técnicas disponíveis na estação de Santa Maria	14
3.4.1 VLBI.....	15
3.4.2 GNSS	15
3.4.3 Gravimetria.....	16

4	Seleção do Aerogerador	17
4.1	Introdução	17
4.2	Consumos de energia	17
4.3	Dados meteorológicos.....	18
4.4	Aerogerador selecionado	22
4.5	Localização do aerogerador	23
4.5.1	Efeito colina.....	23
5	Dimensionamento da torre	27
5.1	Considerações iniciais de projeto.....	27
5.2	Transporte	27
5.3	Montagem	27
5.4	Ligações entre segmentos	27
5.4.1	Ligações por flange	27
5.4.2	Ligações por atrito	28
5.5	Escolha do tipo de ligação	29
5.6	Projeto da torre.....	30
5.6.1	Estudo dos esforços na estrutura	31
6	Análise estrutural com recurso a elementos finitos.....	37
6.1	Tipo de Análise estrutural.....	37
6.2	Características e Propriedades do Material.....	37
7	Análise estrutural 1 – Flange Topo	39
7.1	Modelação CAD	39
7.1.1	Propriedades físicas	39
7.1.2	Uniões.....	39
7.2	Modelação CAE.....	40
7.2.1	Fixações	40

7.2.2	Contactos entre os conjuntos	40
7.2.3	Solicitações estáticas	41
7.2.4	Dimensionamento da Malha	41
7.2.5	Estudo da Convergência da Malha	42
7.2.6	Resultados da Análise Estática	42
7.2.7	Tensões Equivalentes (Von Mises)	43
7.2.8	Deslocamentos.....	43
7.2.9	Deformações.....	43
7.2.10	Fator de Segurança	44
8	Análise estrutural 1-Modelo otimizado flange topo.....	45
8.1	Modelação CAD	45
8.1.1	Propriedades físicas	45
8.1.2	Uniões.....	45
8.2	Modelação CAE.....	45
8.2.1	Dimensionamento da Malha.....	45
8.2.2	Estudo da Convergência da Malha	46
8.3	Resultados da Análise Estática	47
8.3.1	Tensões Equivalentes (Von Mises)	47
8.3.2	Deslocamentos.....	47
8.3.3	Deformações.....	48
8.3.4	Fator de Segurança	48
8.4	Conclusões da Análise estrutural com recurso a elementos finito 1 – flange do topo 49	
9	Análise estrutural 2 – flange centro.....	51
9.1	Modelação CAD	51
9.1.1	Propriedades físicas	51
9.1.2	Uniões.....	51

9.2	Modelação CAE.....	51
9.2.1	Fixações	51
9.2.2	Contactos entre os conjuntos	52
9.2.3	Solicitações estáticas	52
9.2.4	Dimensionamento da Malha.....	53
9.2.5	Estudo da Convergência da Malha	53
9.3	Resultados da Análise Estática	54
9.3.1	Tensões Equivalentes (Von Mises)	54
9.3.2	Deslocamentos.....	54
9.3.3	Deformações.....	55
9.3.4	Fator de Segurança	55
10	Análise estrutural 2- Modelo otimizado flange centro.....	57
10.1	Modelação CAD	57
10.1.1	Propriedades Físicas	57
10.1.2	Uniões.....	57
10.2	Modelação CAE.....	57
10.2.1	Dimensionamento da Malha.....	57
10.2.2	Estudo da Convergência da Malha	58
10.3	Resultados da Análise Estática	59
10.3.1	Tensões Equivalentes (Von Mises)	59
10.3.2	Deslocamentos.....	59
10.3.3	Deformações.....	60
10.3.4	Fator de Segurança	60
10.4	Conclusões da análise estrutural 2 – flange centro	61
11	Análise estrutural 3- flange encastramento	63
11.1	Modelação CAD	63

11.1.1	Propriedades físicas	63
11.2	Modelação CAE.....	63
11.2.1	Fixações	63
11.2.2	Solicitações estáticas	64
11.2.3	Dimensionamento da Malha.....	64
11.2.4	Estudo da Convergência da Malha	65
11.3	Resultados da Análise Estática	65
11.3.1	Tensões Equivalentes (Von Mises)	65
11.3.2	Deslocamentos.....	66
11.3.3	Deformações.....	66
11.3.4	Fator de Segurança	66
12	Análise estrutural 3- Modelo otimizado flange encastramento.....	69
12.1	Modelação CAD	69
12.1.1	Propriedades Físicas	69
12.2	Modelação CAE.....	69
12.2.1	Dimensionamento da Malha.....	69
12.2.2	Estudo da Convergência da Malha	70
12.3	Resultados da Análise Estática	71
12.3.1	Tensões Equivalentes (Von Mises)	71
12.3.2	Deslocamentos.....	72
12.3.3	Deformações.....	72
12.4	Conclusões dos Estudos 3 – flange encastramento.....	73
13	Análise estrutural 4- estrutura completa.....	75
13.1	Modelação CAD	75
13.2	Modelação CAE.....	75
13.2.1	Fixações	75

13.2.2	Contactos entre os conjuntos	76
13.2.3	Solicitações estáticas	76
13.2.4	Dimensionamento da Malha.....	76
13.2.5	Estudo da Convergência da Malha	77
13.3	Resultados da Análise Estática	78
13.3.1	Tensões Equivalentes (Von Mises)	78
13.3.2	Deslocamentos.....	78
13.3.3	Deformações.....	79
13.3.4	Fator de Segurança	79
14	CONCLUSÃO	81
15	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
	84	
	ANEXOS	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Índice de Figuras do Capítulo 2

Figura 2.1- Circulação de ar no globo terrestre.....	3
Figura 2.2- Parque eólico do Figueiral	4
Figura 2.3- Parque eólico Serra do Cume.....	5
Figura 2.4- Fontes de onde provem a energia elétrica da ilha de Santa Maria	6
Figura 2.5- Moinho de vento antigo, Ilha de Santa Maria (google)	6
Figura 2.6- Torre eólica em betão	7
Figura 2.7- Torre eólica híbrida	8
Figura 2.8- torre eólica treliçada	9
Figura 2.9-torre eólica de madeira	10
Figura 2.10-torre tubular em aço	10

Índice de Figuras do Capítulo 3

Figura 3.1- A terra é um sistema dinâmico em constante mudança	11
Figura 3.2- Localização geográfica da Rede Atlântica de Estações Geodinâmicas e Espaciais	11
Figura 3.3- Estação de Yebes em Espanha	12
Figura 3.4- Terrenos onde iram ser construídas as estações das Canárias e das flores	12
Figura 3.5- Montagem do Radiotelescópio na estação de Santa Maria.....	12
Figura 3.6- Rede mundial VGOS (VLBI Geodetic Observing System)	13
Figura 3.7- Placas tectónicas dos Açores.....	13
Figura 3.8- técnicas utilizadas numa estação fundamental.....	14
Figura 3.9- sismógrafo da estação de Santa Maria.....	14
Figura 3.10- Radio telescópio da estação de Santa Maria	15
Figura 3.11- Técnica do VLBI	15
Figura 3.12- Antenas GPS da estação de Santa Maria	16
Figura 3.13- Gravímetro da estação de santa maria e geoide da terra.....	16

Índice de Figuras do Capítulo 4

Figura 4.1-Grafico dos consumos de energia na estação do RAEGE	17
Figura 4.2- Estação metrológica da Ilha de Santa Maria	18

Figura 4.3-Pressão atmosférica media ao nível da estação.....	18
Figura 4.4-pressão atmosférica média ao nível médio do mar	19
Figura 4.5-Variação de temperatura ao longo do ano	19
Figura 4.6-Humidade relativa máxima e mínima.....	19
Figura 4.7-Intensidade máxima instantânea do vento (rajada)	20
Figura 4.8-Intensidade média do vento	20
Figura 4.9-Direção do vento	21
Figura 4.10-Quantidade de precipitação	21
Figura 4.11-Aerogerador Nordtank 150 – 150kW	22
Figura 4.12-curvas de potência do aerogerador Nordtank 150 – 150kW.....	22
Figura 4.13-localização da estação do RAEGE na ilha de Santa Maria.....	23
Figura 4.14-Raio de proteção eletromagnética da estação	23
Figura 4.15- Efeito colina	24
Figura 4.16- impossibilidades de instalação do aerogerador no campo de visão do rádio telescópio	24
Figura 4.17-Instalação adequada do radio telescópio.....	25
Figura 4.18- Segunda forma de garantir que não ocorra interferências nas observações devido ao radiotelescópio	25
Figura 4.19-Melhor local para a instalação do aerogerador	26

Índice de Figuras do Capítulo 5

Figura 5.1- falge interna e flange externa	28
Figura 5.2- formas de fabricar flanges.....	28
Figura 5.3-ligação por atrito de segmentos.....	28
Figura 5.4-manutenção ao aerogerador Aerogerador Nordtank 150.....	29
Figura 5.5- raio de alcance da plataforma elevatória 1250AJP	30
Figura 5.6-processo de fabrico da estrutura(calandragem e soldadura)	30
Figura 5.7-exboço das forças aplicadas na estrutura	31
Figura 5.8-Area de incidência do vento.....	31
Figura 5.9-area do cubo do aerogerador	32
Figura 5.10- Açoens no encastramento da torre.....	33
Figura 5.11-tenções no encastramento	34

Figura 5.12-encurvadura na estrutura da torre	35
---	----

Índice de Figuras do Capítulo 7

Figura 7.1-Modelo inicial da flange do topo.	39
Figura 7.2-Fixações utilizadas no modelo da flange do topo.	40
Figura 7.3- Contactos utilizadas no modelo da flange do topo.....	40
Figura 7.4- Solicitações estáticas no modelo da flange do topo	41
Figura 7.5- Representação da malha de 56.85 mm no modelo da flange do topo.	42
Figura 7.6- Convergência de malha no da flange do topo.....	42
Figura 7.7- Tensões equivalente no modelo da flange do topo.	43
Figura 7.8- Deslocamentos utilizados no modelo da flange do topo.	43
Figura 7.9-Deformações no modelo da flange do topo.	44
Figura 7.10-Fator de Segurança no modelo da flange do topo.	44

Índice de Figuras do Capítulo 8

Figura 8.1- Modelo otimizado da flange do topo.....	45
Figura 8.2-Representação da malha de 35 mm modelo otimizado da flange do topo.	46
Figura 8.3-Convergência de malha modelo do otimizado da flange do topo.	47
Figura 8.4-Tensões equivalentes do modelo otimizado da flange do topo.	47
Figura 8.5- Deslocamentos do modelo otimizado da flange do topo.....	48
Figura 8.6-Deformações modelo do modelo otimizado da flange do topo.	48
Figura 8.7-Fator de segurança do modelo otimizado da flange do topo.	48

Índice de Figuras do Capítulo 9

Figura 9.1-Modelo da flange do centro inicial.....	51
Figura 9.2- Fixações utilizadas no modelo da flange do centro inicial.	52
Figura 9.3-Contactos entre os conjuntos do modelo da flange do centro inicial.	52
Figura 9.4- Solicitações estáticas no modelo da flange do centro inicial.	52
Figura 9.5- Representação da malha utilizada no modelo da flange do centro inicial.....	53
Figura 9.6- convergencia da malha do modelo da flange do centro inicial.....	54
Figura 9.7- Tensões equivalentes do modelo da flange do centro inicial.....	54
Figura 9.8- Deslocamentos do modelo da flange do centro inicial.	55
Figura 9.9-Deformações modelo da flange do centro inicial.....	55

Figura 9.10- Fator de segurança modelo da flange do centro inicial.	55
--	----

Índice de Figuras do Capítulo 10

Figura 10.1-Modelo da flange do centro otimizada.	57
Figura 10.2- Representação da malha de 40 mm no modelo da flange do centro otimizada.	58
Figura 10.3- Estudo da convergência no modelo da flange do centro otimizada.	59
Figura 10.4-Tensões equivalentes no modelo da flange do centro otimizada.	59
Figura 10.5-Deslocamentos no modelo da flange do centro otimizada.	60
Figura 10.6-Deformações no modelo da flange do centro otimizada.	60
Figura 10.7- Fator de segurança no modelo da flange do centro otimizada.	60

Índice de Figuras do Capítulo 11

Figura 11.1-Modelo inicial da flange do encastramento.	63
Figura 11.2-Fixações do modelo inicial da flange do encastramento.	63
Figura 11.3- Solicitações estáticas do modelo inicial da flange do encastramento.	64
Figura 11.4-Representação da malha de 55 mm no modelo inicial da flange do encastramento	65
Figura 11.5- Convergência de malha do do modelo inicial da flange do encastramento.....	65
Figura 11.6-Tensões equivalentes do modelo inicial da flange do encastramento.....	66
Figura 11.7-Deslocamentos do modelo inicial da flange do encastramento.	66
Figura 11.8- Deformações do modelo inicial da flange do encastramento.	66
Figura 11.9- Fator de segurança do modelo inicial da flange do encastramento.....	67

Índice de Figuras do Capítulo 12

Figura 12.1- Modelo da flange do encastramento otimizada.....	69
Figura 12.2- Representação da malha no modelo da flange do encastramento otimizada.	70
Figura 12.3-Convêrgencia da malha no Modelo da flange do encastramento otimizada.....	71
Figura 12.4- Demonstraçã de que uma parede de 20 mm não é suficiente.	71
Figura 12.5- Tenções equivalentes do modelo da flange do encastramento otimizada.	72
Figura 12.6-Deslocamento modelo da flange do encastramento otimizada.	72
Figura 12.7-Deformações no modelo da flange do encastramento otimizada.....	72
Figura 12.8- Fator de segurança modelo da flange do encastramento otimizada	73

Índice de Figuras do Capítulo 13

Figura 13.1-Modelo da torre completa	75
Figura 13.2-Fixações torre completa	75
Figura 13.3- Contactos torre completa	76
Figura 13.4-Solicitações estáticas torre completa	76
Figura 13.5-malha de 100 mm na torre completa	77
Figura 13.6- Convergencia de malha modelo torre completa.....	78
Figura 13.7-Tensões equivalentes torre completa.....	78
Figura 13.8- Deslocamentos torre completa.	79
Figura 13.9-Deformação Torre completa	79
Figura 13.10-Fator deSegurança torre completa	79

ÍNDICE DE QUADROS

Índice de Quadros do Capítulo 2

Quadro 2.1-Dados parques eólicos dos Açores	4
---	---

Índice de Quadros do Capítulo 6

Quadro 6. 1-Propriedades do material escolhido	37
--	----

Índice de Quadros do Capítulo 7

Quadro 7. 1-Propriedades físicas da malha	39
---	----

Quadro 7. 2-Propriedades da malha	41
---	----

Índice de Quadros do Capítulo 8

Quadro 8.1-Propriedades físicas do modelo otimizado da flange do topo.	45
---	----

Quadro 8.2-Características da malha utilizada no modelo otimizado da flange do topo.	46
---	----

Quadro 8.3-Comparação das propriedades físicas entre os dois modelos da análise estrutural 1.	49
--	----

Quadro 8.4- Resultados obtidos entre os dois modelos análise estrutural 1.	49
---	----

Índice de Quadros do Capítulo 9

Quadro 9.1- Propriedades físicas do modelo da flange do centro inicial	51
--	----

Quadro 9. 2- Características da malha utilizada no modelo da flange do centro inicial	53
---	----

Índice de Quadros do Capítulo 10

Quadro 10.1- Propriedades física modelo da flange do centro otimizada.	57
---	----

Quadro 10.2- Características da malha do modelo da flange do centro otimizada	58
---	----

Quadro 10.3-Comparação das propriedades físicas dos dois modelos do estudo 2.	61
--	----

Quadro 10.4-Comparação dos resultados nos dois modelos do estudo 2.	61
--	----

Índice de Quadros do Capítulo 11

Quadro 11.1- Propriedades físicas do modelo inicial da flange do encastramento.	63
--	----

Quadro 11.2- Características da Malha utilizada do modelo inicial da flange do encastramento	64
--	----

Índice de Quadros do Capítulo 12

Quadro 12.1- Propriedades Físicas do modelo da flange do encastramento otimizada.	69
--	----

Quadro 12.2-Características da Malha utilizada.	70
--	----

Quadro 12.3-Comparação das propriedades físicas dos dois modelos do estudo 3	73
--	----

Quadro 12.4- Comparação dos resultados obtidos no estudo 3	74
--	----

SIMBOLOGIA

Abreviaturas

CAD- Computer-Aided Design

CAE- Computer-Aided Engineering

EGF- Estações Geodésicas Fundamentais

EUREF-Regional Reference Frame Sub-Commission for Europe

GNSS- Global Navigation Satellite System

GRA- Governo Regional dos Açores

IGN- Instituto Geográfico Nacional

IGS-International GNSS Service

REPRAA- Rede Estações Permanentes da Região Autónoma dos Açores

SLR- satellite laser ranging

SRCTE- Secretaria Regional da Ciência, Tecnologia

SLR- satellite laser ranging

VGOS- VLBI Global Observing System

VLBI- Very long baseline interferometry

Letras e símbolos

A-Área (m^2)

ρ – Massa volúmica do fluido (kg/m^3)

m- massa (Kg)

V -Força provocada pela ação do vento (Kn)

P- Força aplicada na vertical sobre a torre(Kn)

σ - Tensão Mpa

1 INTRODUÇÃO

1.1 Âmbito do Trabalho

No âmbito da componente não letiva “Dissertação/Projeto/Estágio”, relativa ao 2º ano do Mestrado em Engenharia Mecânica, área de especialização em Construção e Manutenção de Equipamentos Mecânicos, o aluno propôs-se a realizar um projeto sobre uma temática envolvida no âmbito de trabalho profissional do aluno.

Desta forma, devido a possibilidade futura de vir a ser instalado um aerogerador com a função de abastecer as instalações do RAEGE foi proposto um projeto que envolvesse a seleção de um aerogerador e o dimensionamento da sua torre que fosse capaz de suprir as necessidades energéticas das instalações do RAEGE.

Os principais motivos na escolha desta temática basearam-se na consciência da importância e o peso que as energias renováveis apresentam nos dias de hoje, assim como a sustentabilidade que as mesmas apresentam a longo prazo quando comparadas com os combustíveis fósseis.

Assim sendo, foi realizado um estudo que envolveu a seleção de um aerogerador que correspondesse às necessidades energéticas do local, posteriormente foi realizado um estudo e o dimensionamento estrutural da torre de sustentação do aerogerador para as condições do local, tratando-se assim de um desafio interessante.

1.2 Enquadramento Temático

A preocupação com a preservação do meio ambiente é uma das prioridades dos açorianos, pelo que a adesão a fontes de energia que substituam os combustíveis fósseis são uma contribuição importante para os Açores, para além de prevenir a sustentabilidade das gerações futuras. Por este motivo é extremamente importante haver uma aquisição e uma adesão maior às energias renováveis.

1.3 Objetivos e Metodologia do Trabalho

O presente projeto têm como objetivo analisar as necessidades energéticas da estação geodésica e espacial da ilha de Santa Maria, no sentido de se perceber a possibilidade da instalação de um aerogerador capaz de suprir as necessidades energéticas das instalações.

Pretende-se ainda que seja feito o estudo/dimensionamento da torre eólica capaz de suportar os esforços que este irá sofrer no local.

Deste modo, admite-se os seguintes pontos e tópicos para a realização do trabalho, por ordem de evolução do mesmo, tendo em conta o principal objetivo do projeto:

- Aquisição dos dados metrológicos referentes ao local;
- Analisar os atuais consumos de energia da estação;
- Estudar analiticamente os esforços que serão empregues na estrutura;
- Desenho da estrutura e dos seus componentes num software de CAD;
- Estudo com elementos finitos da estrutura.

2 A Energia Eólica

2.1 O que é a energia eólica

A Energia eólica provém da radiação solar, devido ao facto de a terra apresentar uma forma esférica, a radiação solar incide na sua superfície de forma desigual, onde as regiões dos polos recebem menos radiação e as zonas junto ao equador recebem maior quantidade de radiação. Através deste aquecimento desigual há a formação de um gradiente de temperaturas do equador aos polos e consequentemente o aparecimento de um gradiente de pressão dos polos ao equador. Dado que o ar quente tem tendência a subir e o ar frio a descer por ser mais denso, o ar mais quente sobe até a atmosfera mais alta do equador e move-se para os polos enquanto o ar dos polos desce para a região do equador.

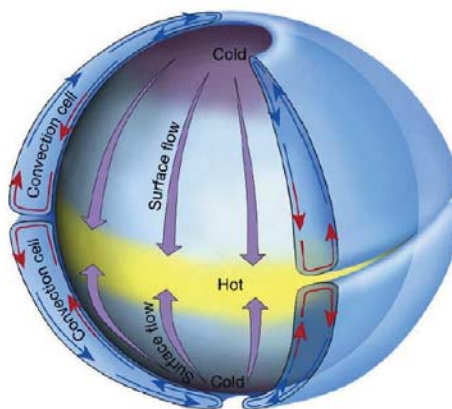


Figura 2.1- Circulação de ar no globo terrestre

Dado que o vento é uma forma de energia cinética, esta pode ser captada e transformada em outros tipos de energia dependendo da finalidade desejada.

Para além destes fatores, existem outros que influenciam na formação dos ventos desde o facto da superfície terrestre ser coberta por materiais que apresentam diferentes características de absorção e reflexão de radiação solar (água, mineral, orgânico), assim como o facto da terra não ser constituída por uma superfície com formas uniformes dado que é formada por montanhas, planícies e vales entre outros que provocam um aquecimento desigual nestas regiões.

O facto da própria terra não se encontrar na posição perpendicular e rodar sobre si própria também afeta a direção e velocidade dos ventos.

Assim sendo, pode-se concluir que o vento é uma forma de energia cinética e que esta pode ser captada e transformada em outros tipos de energia dependendo da finalidade desejada.

2.2 A energética eólica nos Açores

Em 1988 deu-se início à produção de energia elétrica através de energia eólica nos Açores. No seu começo instalou-se um parque eólico na Ilha de Santa Maria e foi esta a primeira tentativa de produção de energia eólica na região. O parque eólico instalado na zona do Figueiral era constituído por 9 geradores de 30 kW.



Figura 2.2- Parque eólico do Figueiral

Devido ao sucesso que este apresentou, levou à instalação de outros parques eólicos nas restantes ilhas, como pode ser visto no quadro 1. As instalações estão sob a supervisão do grupo EDA – Eletricidade dos Açores, empresa responsável pela produção e distribuição de energia elétrica no arquipélago dos Açores.

Quadro 2.1-Dados parques eólicos dos Açores

Nome	Localização	Potência total MW	Nº turbinas	Potencia nominal kw	Fornecedor	Modelo	Ligação à rede
Serra do Cume	Terceira	4,5	5	900	Enercon	E-44	2008
Pico	Pico	1,8	6	300	Enercon	E30	2005
Lomba dos frades	Faial	1,8	6	300	Enercon	E30	2002
Figueiral	Santa Maria	0,9	3	300	Enercon	E30	2002
Boca da verdade	Flores	0,6	2	300	Enercon	E30	2002

Serra branca (ampliação)	Graciosa	0,6	2	300	Enercon	E30	2002
Pico da urze(2ª ampliação)	São Jorge	0,6	2	300	Enercon	E30	2002
Santa Maria (desativação)	Santa Maria	-0,27	-9	30	Aeroman	E30	2001
Pico da urze(ampliação)	São Jorge	0,15	1	150	Nordtank	14/30	1994
Serra branca	Graciosa	0,2	2	100	Nordtank	NTK150	1992
Pico da urze	São Jorge	0,40	4	100	Nordtank	NTK150	1991
Santa Maria	Santa Maria	0,27	9	30	Aeroman	14/30	1988

Através do quadro 1 pode concluir-se que já existe uma vasta experiência no que diz respeito à energia eólica na região assim como, da sua eficácia nas ilhas dos Açores.

Um exemplo que pode ser dado da eficácia da energia eólica nas ilhas que é o facto de em 2010 o parque eólico da Serra do Cume, na ilha Terceira ter sido considerado o que produziu mais energia a nível mundial neste ano entre os parques eólicos que possuem aerogeradores do tipo E44.



Figura 2.3- Parque eólico Serra do Cume

Apesar de todos os esforços que têm sido feitos ainda existe uma dependência muito grande dos combustíveis fósseis, como pode ser constatado essa dependência no gráfico da figura 2.4.

Pode verificar-se que o total da energia elétrica produzida na ilha de Santa Maria foi de 21,3 GWh no ano de 2016. Cerca de 88% da energia provém de combustíveis provenientes da central térmica, enquanto que os restantes 12% foram produzidos pelo parque eólico. Assim, e tendo em conta o potencial que os Açores possuem para a implementação de energias renováveis, poderá ser que no futuro se consiga que a produção de energia elétrica seja 100 % proveniente de fontes renováveis.

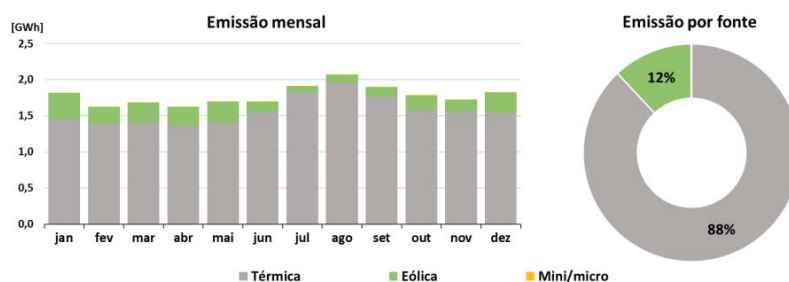


Figura 2.4- Fontes de onde provem a energia elétrica da ilha de Santa Maria

2.3 Origem das torres eólicas

A utilização do vento como fonte de energia já é utilizada há muito tempo, tendo sido a fonte essencial na época dos descobrimentos na movimentação das embarcações. Já no séc. XVII a.C., os babilónios usaram moinhos de vento em projetos de irrigação. Mais tarde, inventores Persas trouxeram inovações e novos conceitos e, no séc. VII, geógrafos árabes relataram a existência de moinhos de vento semelhantes às modernas portas giratórias. Estes moinhos de eixo vertical ainda existiam em países como o Afeganistão em 1980, estimando-se que teriam uma potência de 75 hp e conseguiriam moer uma tonelada de trigo em 24h.

Os moinhos de vento europeus datam do séc. XII. Os sistemas originais tinham de ser alinhados manualmente com o vento, mas rapidamente surgiram inovações e o moinho de vento Europeu sofreu um grande desenvolvimento e prosperou: no fim do séc. XIX existiam mais de 30000 moinhos de vento na Europa, usados principalmente para a moagem de grão e o bombeamento de água.



Figura 2.5- Moinho de vento antigo, Ilha de Santa Maria (google)

Estes caíram em desuso devido ao avanço da tecnologia e o aparecimento motor a vapor seguido do desenvolvimento do motor térmico e posteriormente a expansão da eletrificação.

Tendo parecido que seria o fim da energia eólica, na década de 60, este conceito ressurgiu e foi finalmente aceite no início da década de 90. Tendo sido varias as razões responsáveis por esta transformação, como a crescente necessidade de energia, a compreensão do limite de utilização de combustíveis fósseis e os seus efeitos adversos no ambiente.

2.4 Tipos de torres

Atualmente as torres eólicas são fabricadas em diversos materiais e formas.

Assim, encontramos torres eólicas construídas em betão, estruturas treliçadas, tubulares em aço, madeira e até combinação de materiais.

2.4.1 Torre de betão

O uso de betão na construção de torres eólicas tem uma longa tradição principalmente na Dinamarca. O betão apresenta algumas vantagens neste tipo de aplicações dado que com este é possível construir-se torres muito altas sem que isso seja associado a problemas de transporte insolúveis, atualmente também é possível reduzir o tempo de construção destas torres devido a utilização de peças pré-fabricadas ou de poderem ser betonadas no local.

Estas apresentam a mesma vantagem das torres em aço, e de serem 100% recicláveis e por esse motivo melhor em termos ambientais.



Figura 2.6- Torre eólica em betão

2.4.2 Torre híbrida

Cada vez mais é possível ver a combinação de dois ou mais materiais em projetos de engenharia, esta combinação também se verifica nas torres eólicas utilizando-se o aço e o betão, o betão na parte inferior e aço na parte superior.

Esta combinação permite explorar as propriedades que cada um dos materiais possui conduzindo a soluções promissoras para grandes alturas, para além de possuir vantagem a nível da montagem pelas mesmas propriedades que já foram referidas anteriormente para as torres de betão.

Os custos de material para uma torre híbrida de grandes dimensões também são menores quando comparado com uma construída apenas em aço.



Figura 2.7- Torre eólica híbrida

2.4.3 Torre Treliçada

A estrutura treliçada de aço é uma tecnologia que já é bastante conhecida e amplamente utilizada na construção de uma série de torres, como para linhas de transmissão de energia, estas chegaram a ser utilizadas para apoiar as turbinas eólicas no início da sua exploração, para produção de energia eólica.

No início da utilização de energia eólica para fins comerciais, as torres treliçadas foram amplamente utilizadas com pequenas turbinas. Recentemente, o interesse em torres treliçadas foi reacendido, particularmente na conexão com grandes turbinas com uma altura de 100m ou superior.

As vantagens das torres treliçadas são:

- Desenho e detalhamento simples;
- Tem um bom comportamento dinâmico (ideal para turbinas eólicas);

- Facilidade no transporte (secções fáceis de transportar quando comparadas com estruturas tubulares);

As principais desvantagens deste tipo de estruturas é o facto de demorarem tempo para serem montadas no local, devido a possuírem muitas ligações e de necessitarem de uma manutenção mais demorada do que os outros modelos.



Figura 2.8- torre eólica treliçada

2.4.4 Torre de madeira

Já há várias décadas que a madeira tem sido utilizada na a construção das pás de turbinas, mas só recentemente é que este material foi implementado na construção de torres eólicas. A utilização de madeira numa estrutura que precisa de ser estável e que garanta a segurança pode parecer estranho, mas esta apresenta propriedades mecânicas favoráveis a este tipo de aplicação uma vez que esta é resistente a fadiga e a encurvadura, para além de ser um material económico e leve o que facilita o transporte. O seu processo de fabricação e montagem é feito através da ligação de painéis de madeira laminados que posteriormente são ligados entre si o que permite que sejam transportando em contentores de 12 metros. No local estes são montados numa torre oca e ortogonal. O primeiro modelo construído possuía 100 metros, uma escada, um elevador, possuindo no topo uma turbina Vensys 77.



Figura 2.9-torre eólica de madeira

2.4.5 Torre tubular em aço

Nos dias que correm as torres tubulares em aço são o modelo mais utilizado na instalação de aerogeradores comerciais.

Isto deve-se ao facto de serem fáceis de transportar e possuírem uma montagem rápida no local.

Quando as torres apresentam alturas até 20 m estas podem ser construídas numa única peça que depois é ligada à fundação no local.

Quando existe a necessidade de instalar torres de maiores dimensões até 100 m de altura estas são fabricadas em várias secções para que seja possível o seu transporte.

Outras vantagens que podem ser citadas das torres tubulares são:

- São fáceis de instalar e possuem um baixo custo de manutenção;
- Tem boa rigidez de torção;
- Devido a ter uma secção transversal circular apresenta a mesma rigidez de flexão em todas as direcções;
- É uma estrutura relativamente leve.



Figura 2.10-torre tubular em aço

3 RAEGE

3.1 Introdução

A terra é um sistema dinâmico que se encontra permanentemente em mudança e evolução, sendo assim é importante e necessário estudá-la tanto do ponto de vista da geodesia (estuda a forma e medida da superfície terrestre) como da geofísica (explica fenómenos dinâmicos como terremotos e vulcões).

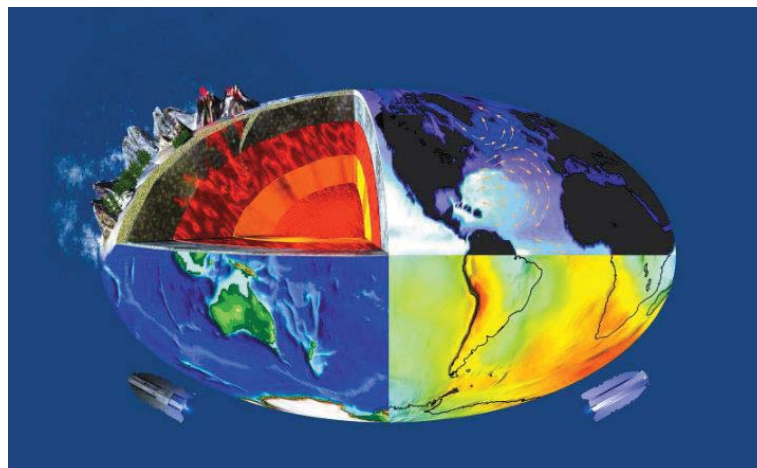


Figura 3.1- A terra é um sistema dinâmico em constante mudança

Com intuito de suprimir essa necessidade, em dezembro de 2008 deu-se início à cooperação entre a Direção Geral do Instituto Geográfico Nacional de Espanha (IGN), do Ministério do Fomento, e o Governo Regional dos Açores (GRA), através da Secretaria Regional da Ciência, Tecnologia e Equipamentos (SRCTE), com a assinatura de um Protocolo com vista à implementação de uma Rede Atlântica de Estações Geodinâmicas e Espaciais (RAEGE), destinada à realização de estudos na área de astronomia, geodesia, geofísica e das correspondentes aplicações de serviço público.



Figura 3.2- Localização geográfica da Rede Atlântica de Estações Geodinâmicas e Espaciais

Assim, foi prevista a instalação de três Estações Geodésicas Fundamentais (EGF). Duas nos Açores, uma na Ilha de Santa Maria (pertencente ao IGN e ao GRA), outra na ilha das Flores (pertencente ao GRA) e uma nas Canárias (pertencente ao IGN). Apesar desta parceria só ter surgido em 2008, a estação de Yebes (Guadalajara), Figura 3, que faz parte da rede RAEGE, já tem uma vasta experiência tendo sido fundada a 4 de dezembro de 1987.



Figura 3.3- Estação de Yebes em Espanha

Atualmente as estações das Flores e das Canárias ainda não tiveram o seu início de construção, que se julga que seja para breve.

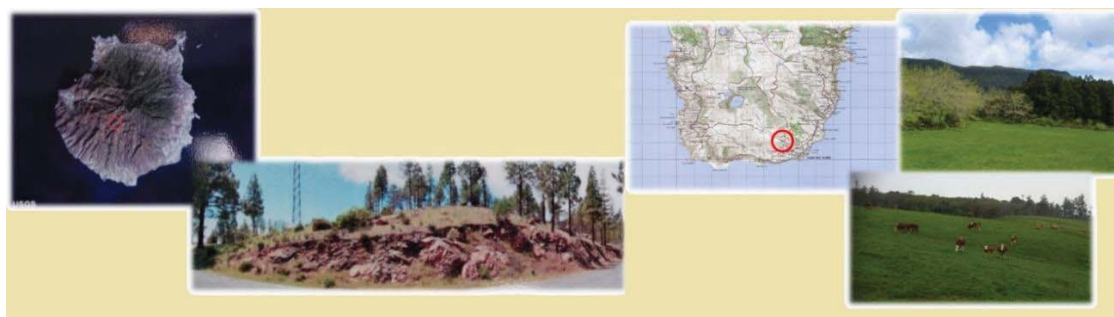


Figura 3.4- Terrenos onde iram ser construídas as estações das Canárias e das flores

Relativamente a estação de Santa Maria esta já se encontra em funcionamento e foi inaugurada a 20 de maio de 2013.



Figura 3.5- Montagem do Radiotelescópio na estação de Santa Maria

3.2 Localização

Os Açores sempre foram uma referência em várias áreas devido a sua posição estratégica, posição essa que veio a revelar-se uma vez mais um ponto a favor para a instalação das duas estações geodésicas fundamentais nesta região. A primeira vantagem a destacar é o facto de se localizarem no meio do oceano Atlântico, local onde não existem estações deste género uma vez que para tal é necessário que exista terra. Como se pode verificar na figura as estações dos Açores e das Canárias são as únicas na região do oceano atlântico destacando-se que os Açores se encontram quase no meio do planeta o que lhe dá uma boa posição para trabalhar com as demais estações pelo mundo, uma vez que a maioria se encontra no hemisfério norte.

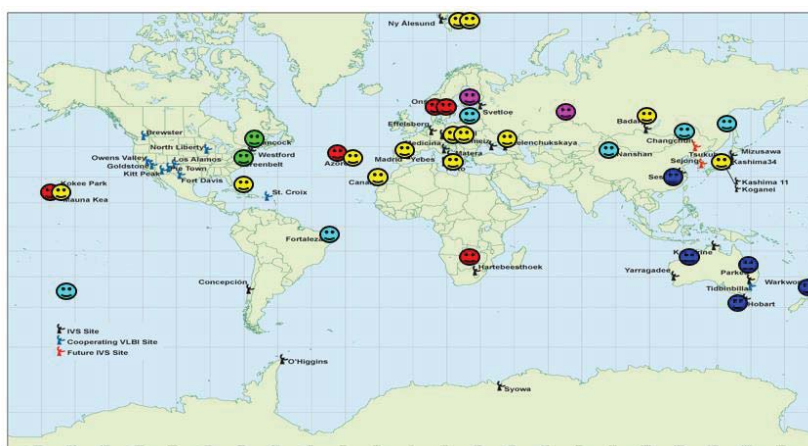


Figura 3.6- Rede mundial VGOS (VLBI Geodetic Observing System)

Outra das vantagens, especialmente para este tipo de estações, prende-se com o facto de numa região relativamente próxima é possível encontrar três tipos de placas tectónicas diferentes.

A estação de Yebes fica assente na placa euroasiática, a estação das Flores na placa Norte Americana e estação de Santa Maria e das Canárias na placa Africana.



Figura 3.7- Placas tectónicas dos Açores

3.3 Definição de estação geodésica fundamental

Para que uma estação possa ser considerada uma estação fundamental esta tem de apresentar pelo menos 3 das seguintes técnicas de observação:

- VLBI (Very long baseline Interferometry);
- GNSS (global Navigation System);
- Gravimetria;
- SLR(Satelite Laser Ranging).

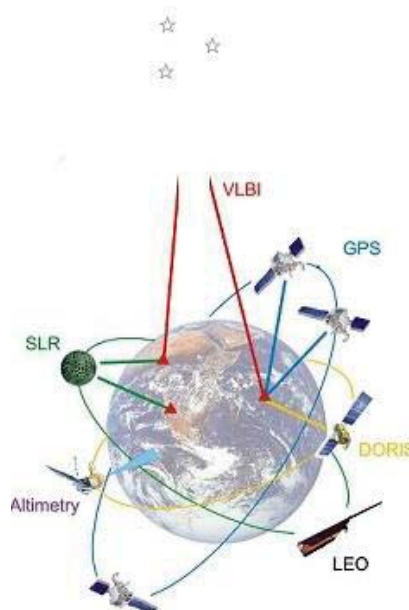


Figura 3.8- técnicas utilizadas numa estação fundamental

3.4 Técnicas disponíveis na estação de Santa Maria

Uma vez que o projeto desta tese se irá desenrolar, tendo como base as instalações da estação da Ilha de Santa Maria, é importante dar a conhecer as técnicas aplicadas na mesma.

Das técnicas acima referidas apenas a SLR não é aplicada, por não ser viável na região devida a existência frequente de nuvens.

Para além destas três técnicas referidas acima, ainda possui uma estação metrológica essencial para este tipo de técnicas e um sismógrafo que se encontra inserido.

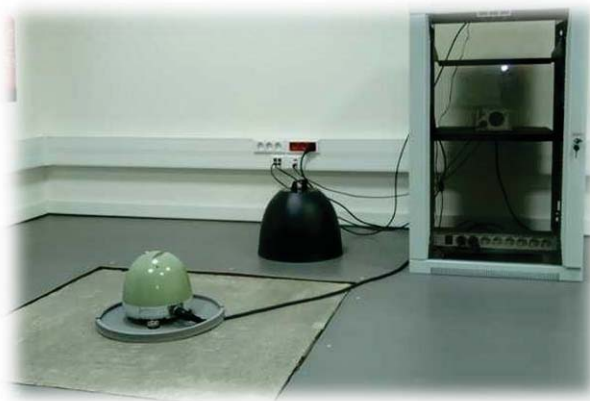


Figura 3 9- sismógrafo da estação de Santa Maria

3.4.1 VLBI

A técnica mais importante e que mais se destaca na estação é a de VLBI devido a necessidade de um radiotelescópio.



Figura 3.10- Radio telescópio da estação de Santa Maria

O VLBI consiste num tipo de interferometria que utiliza um sinal de uma fonte de rádio astronomia como um quasar, que é coletado através de vários radiotelescópios na terra. Podendo assim ser calculada a distância entre os radiotelescópios através da diferença de tempo entre as chegadas do sinal de rádio em diferentes telescópios.

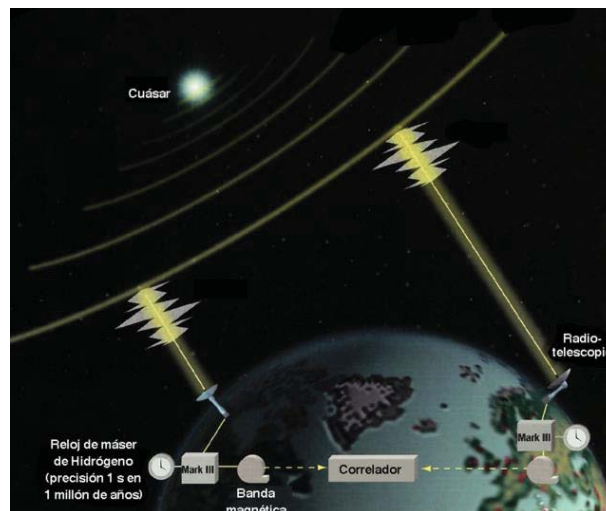


Figura 3.11- Técnica do VLBI

3.4.2 GNSS

O GNSS (Global Navigation Satellite System) é o termo que normalmente é utilizado para identificar o sistema de navegação por satélite, este permite a localização geográfica de um