

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**



**FEUP**

**Conceptualização e Análise de um Conjunto Integrado de Projectos para um Parque de Energia**

Nelson Miguel Azevedo Cerejo

VERSÃO PROVISÓRIA

Dissertação realizada no âmbito do  
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores  
Major Energia

Orientador: Prof. Doutor Cláudio Monteiro

Janeiro de 2010



A Dissertação intitulada

“Conceptualização e Análise de um Conjunto Integrado de Projectos para um Parque de Energia”

foi aprovada em provas realizadas em 24 de Fevereiro de 2010

o júri



Presidente Professor Doutor Carlos Manuel Araújo Sá  
Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

  
Professora Doutora Fernanda Oliveira Resende  
Professora Auxiliar do Departamento de Ciências Naturais e Engenharias e Tecnologias da  
Universidade Lusófona do Porto

  
Professor Doutor Cláudio Domingos Martins Monteiro  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projecto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extractos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são correctamente citados.

Nelson Miguel Azevedo Cerejo



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto





# Resumo

Para a construção do Parque de Energia no município de Ponte da Barca, é necessário a implementação de tecnologias inovadoras e apropriadas de conversão de recursos endógenos. Assim torna-se fulcral efectuar um pré-estudo das tecnologias que se vão aplicar no Parque.

Os estudos a efectuar neste trabalho recaem na energia eólica, energia hídrica e recuperação de energia (frenagem regenerativa aplicada numa bicicleta eléctrica).

Relativamente à energia eólica, é efectuado um pré-estudo sobre um aerogerador flutuante para a captação da energia eólica em locais com recursos eólicos escassos. Devido às particularidades, do aerogerador flutuante denominar-se-á de *FIWinG (Floating Wind Generator)*.

No que concerne à energia hídrica realizou-se um dimensionamento para uma central mini-hídrica a ser implementada no Parque de Energia. No estudo relacionado com a energia hídrica, dimensionou-se a turbina hidráulica a aplicar na central. Este dimensionamento é efectuado com base no recurso hídrico existente na proximidade do Parque.

Serão também estudadas formas de recuperação de energia nos sistemas de transporte individual que circulam no Parque de Energia. Este estudo tem como base a frenagem regenerativa, aplicada a uma bicicleta eléctrica. É efectuado um dimensionamento do motor/gerador a aplicar na bicicleta eléctrica, e dos componentes de alimentação/armazenamento de energia, para um determinado percurso no Parque.

**Palavras Chave:** Energia Eólica; Energia Hídrica; FIWinG; Frenagem Regenerativa; Parque de Energia; Ponte da Barca; Recuperação de Energia.



# Abstract

*The “Parque da Energia” (which translates as Energy Park) is a thematic park to be built in Ponte da Barca, Portugal. It aims to implement both innovative technologies and appropriate conversion of endogenous resources, process which leads to the necessity of the pre-project phase of these studies.*

*This thesis has, mainly, studies in wind power, hydro-power, and energy recovery (regenerative braking applied to an electrical bicycle).*

*In the wind power field, it is proposed a concept and calculations of a zeppelin able to generate power, which aims to be located in places where wind is scarce. Due to its particularities it will be called FLWinG (Floating Wind Generator).*

*The study related to the hydro power was a dimensioning of a mini hydroelectric plant, to be also implemented in the Park. The result is the choice of the hydraulic turbine. This dimensioning is based on the water resource available near the Park.*

*Other studies were developed to evaluate the energy recovery by the individual transportation system included in the Park. The basis of this study was the regenerative braking, which will be implemented on the available bicycles. The dimensioning of the motor/generator that the bicycles include is made, as well as the storage of energy, for a specific course inside the Park.*

**Keywords:** Energy Recovery, FIWinG, Hydro Power, Parque da Energia, Ponte da Barca, Regenerative Braking, Wind Power.



# Agradecimentos

Quero agradecer em primeiro lugar à minha namorada Rita, que sempre esteve ao meu lado a apoiar-me, a motivar-me e sempre a “aturar” quando estava stressado.

Um enorme agradecimento à minha Família que me possibilitaram a concretização deste sonho.

Queria agradecer ao colega Luís de Carvalho por todo o tempo perdido no *design* do meu FIWinG, e toda a paciência e disponibilidade prestada.

Não poderia de deixar de agradecer ao meu grande amigo António Dias (Tozé) por todo o apoio prestado durante este curso e neste último semestre.

Não os menos importantes, os companheiros da sala J102, a todos um obrigado, por todas as horas que estivemos a trabalhar, o convívio e toda a ajuda concedida.

Não seria possível a realização desta dissertação sem a empresa Engenheiros Associados, sendo esta a responsável pela concretização do Parque de Energia, a ela um grande agradecimento.

Como não poderia deixar de agradecer, por todos os concelhos sábios, e a orientação indispensável para a concretização desta Dissertação, ao Professor Cláudio Monteiro

Thanks Boss! See you around!



# Índice

<b>Resumo</b> .....	<b>v</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>vii</b>
<b>Agradecimentos</b> .....	<b>ix</b>
<b>Índice</b> .....	<b>xi</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>xv</b>
<b>Lista de tabelas</b> .....	<b>xviii</b>
<b>Abreviaturas e Símbolos</b> .....	<b>xix</b>
<b>Capítulo 1</b> .....	<b>1</b>
<b>Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Motivação .....	2
1.3 Objectivos.....	2
1.4 Estrutura da Dissertação .....	3
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>5</b>
<b>Descrição do Parque de Energia</b> .....	<b>5</b>
2.1 Introdução.....	5
2.2 Descrição Pormenorizada do Parque de Energia .....	8
<b>Capítulo 3</b> .....	<b>13</b>
<b>Estado de Arte</b> .....	<b>13</b>
3.1 Energia Eólica.....	13
3.1.1 Introdução.....	13
3.1.2 Tecnologias de Conversão de Energia a Partir de Recursos Eólicos. ....	14
3.1.2.1 Rotores com Eixo de Rotação Vertical .....	15
a) Rotor Darrieus .....	16
b) Rotor H.....	17
c) Rotor Savonius .....	17
3.1.2.2 Rotores com eixo de Rotação Horizontal .....	17
a) Turbinas Upwind .....	18

b) Turbinas Downwind.....	18
3.1.3 Factores que Influenciam a Velocidade do Vento.....	18
3.1.3.1 Presença de obstáculos.....	19
3.1.3.2 Relevo.....	19
3.1.3.3 Rugosidade do terreno.....	20
3.1.3.4 Altura.....	20
3.1.4 Distribuição de Weibull.....	22
3.1.5 Concentradores.....	23
3.1.6 Difusor.....	24
3.1.7 Turbinas Eólicas Flutuantes no Ar.....	26
3.1.8 Estimativa da Potência Extraída pela Turbina Eólica.....	27
3.2 Mini-Hídrica.....	29
3.2.1 Introdução.....	29
3.2.2 Classificação das Centrais Hidroeléctricas.....	30
3.2.2.1 Potência.....	30
3.2.2.2 Queda.....	30
3.2.3 Composição de uma CMH.....	30
3.2.4 Turbinas Hidráulicas.....	31
3.2.5 Equipamento Eléctrico.....	34
3.2.6 Energia Extraível por uma CMH.....	34
3.3 Recuperação de Energia nos Transportes.....	37
3.3.1 Introdução.....	37
3.3.2 Frenagem Regenerativa.....	38
3.3.2.1 Estimativa da Energia Recuperada Proveniente da Frenagem Regenerativa.....	38
3.3.2.2 Motor/Gerador.....	42
3.3.2.3 Armazenamento de Energia.....	43
<b>Capítulo 4.....</b>	<b>45</b>
<b>Pré-projecto de um “FIWinG”.....</b>	<b>45</b>
4.1 Introdução.....	45
4.2 Dimensionamento do Concentrador e do Difusor.....	46
4.2.1 Concentrador.....	46
4.2.2 Difusor.....	47
4.3 Dimensionamento Aerodinâmico do FIWinG.....	49
4.3.1 Força de Arrasto.....	49
4.3.1.1 Selecção do Coeficiente de Arrasto.....	49
4.3.1.2 Cálculo da Área Frontal.....	50
4.3.1.3 Cálculo da Velocidade Mínima do Vento para Rendimento Máximo da TE.....	54
4.3.1.4 Cálculo da Força de Arrasto.....	55
4.3.2 Impulsão das Asas.....	55
4.4 Cálculo da Energia Produzida pelo FIWinG.....	56
4.5 Comparação Energética entre o FIWinG e um Aero gerador Convencional.....	64
<b>Capítulo 5.....</b>	<b>69</b>
<b>Aproveitamento do Potencial Hídrico no Parque de Energia.....</b>	<b>69</b>
5.1 Introdução.....	69
5.2 Dimensionamento da Turbina Hidráulica a implementar na CMH.....	69
5.2.1 Cálculo da Potência a Instalar nos Equipamentos.....	70

5.3 Cálculo da Energia Anual Produzida pela CMH.....	72
5.4 Cálculo da Potência Necessária para a Bomba Hidráulica dos Lagos .....	74
<b>Capítulo 6 .....</b>	<b>79</b>
<b>Frenagem Regenerativa Aplicada a uma Bicicleta .....</b>	<b>79</b>
6.1 Introdução.....	79
6.2 Cálculo da Potência do Motor/Gerador .....	79
6.3 Cálculo da Energia absorvida pelo Motor Durante o Percurso.....	80
6.4 Cálculo da Energia Recuperada pela Frenagem Regenerativa .....	83
<b>Capítulo 7 .....</b>	<b>91</b>
<b>Conclusões e Trabalhos Futuros .....</b>	<b>91</b>
7.1 Conclusões Gerais.....	91
7.2 Trabalhos Futuros.....	92
<b>Anexo A .....</b>	<b>95</b>
Diagrama de <i>Moody</i> .....	95
<b>Referências .....</b>	<b>97</b>



# Lista de figuras

Figura 1: Vista aérea do Distrito onde se encontra o Parque de Energia .....	5
Figura 2: Vista aérea da freguesia de Entre-Ambos-os-Rios.....	6
Figura 3: Planta do Parque de Energia [1] .....	7
Figura 4: Fórum das Energias [1].....	8
Figura 5: Casas modulares do Parque de Energia [1].....	10
Figura 6: Evolução das turbinas eólicas [3] .....	14
Figura 7: Variação do coeficiente de potência para vários tipos de TE, com a variação da velocidade do vento (adaptando de [5]) .....	15
Figura 8: Tipo de rotor de eixo vertical [5] .....	16
Figura 9: Turbinas <i>upwind</i> e <i>downwind</i> [7] .....	18
Figura 10: Variação da velocidade do vento com a presença de uma colina[10].....	19
Figura 11: Variação da velocidade do vento com diferentes rugosidades [10] .....	20
Figura 12: Variação da velocidade do vento com a altura [11].....	21
Figura 13: Variação da curva de distribuição de Weibull ( $f(V_{vent})$ ) em função do factor de forma (k) para $c=1$ (adaptado de [13]) .....	23
Figura 14: Variação da velocidade do vento num concentrador [15].....	24
Figura 15: Na figura a) Escoamento num difusor com um pequeno ângulo de abertura; figura b) Difusor com ângulo de abertura maior e a separação instantânea da cama limite [16]. .....	25
Figura 16: Variação da velocidade dentro de um difusor[9] .....	25
Figura 17: <i>MAGENN AIR ROTOR SYSTEM</i> [17] .....	26
Figura 18: Tubo de Betz [12] .....	28
Figura 19: Potencial hídrico não aproveitar VS Dependência energética externa [adaptado de23] .....	29
Figura 20: Constituição geral de uma CMH [26] .....	31
Figura 21: Turbina <i>Pelton</i> [29] .....	32
Figura 22: Turbina <i>Francis</i> [28].....	32

Figura 23: Turbina <i>Kaplan</i> [30] .....	32
Figura 24: Tipo de turbina em função da queda e do caudal [28] .....	33
Figura 25: Rendimento das turbinas em função da percentagem do caudal nominal [31] .....	33
Figura 26: Curva duração de caudais [37] .....	36
Figura 27: Emissões Globais de CO <sub>2</sub> (adaptado de [38]) .....	37
Figura 28: Consumo de Energia final por Sector (adaptado de [39]) .....	37
Figura 29: Forças aplicadas a um veículo (adaptado de [42]) .....	39
Figura 30: Valores de coeficiente de arrasto para alguns objectos (adaptado de [43]) .....	40
Figura 31: Constituição geral do FIWinG .....	46
Figura 32: Potência em cada local do FIWinG .....	48
Figura 33: Coeficiente de arrasto para varias formas de objecto (adaptado de [43]) .....	50
Figura 34: Constituição do FIWinG.....	53
Figura 35: Gráfico da altura do FIWinG em função da velocidade a 10 m.....	54
Figura 36: Diagrama com o método utilizado para o cálculo da energia produzida pelo FIWinG .....	57
Figura 37: Valores da função de Weibull para a velocidade de vento a 10 m .....	58
Figura 38: Forças aplicadas ao FIWinG; a) caso de velocidade do vento nula; b) caso em que velocidade do vento diferente de zero .....	59
Figura 39: Velocidade na turbina do FIWinG em relação a velocidade de referência a 10 m..	61
Figura 40: Diagrama com o método utilizado para o cálculo da energia produzida pela TE num aerogerador .....	64
Figura 41: Energia anula produzida pela TE do FIWinG e pela TE do AG .....	66
Figura 42: Valores da energia produzida pelo FIWinG e pelo AG para diferentes valores de velocidade média do vento a 10 metros .....	67
Figura 43: Demonstração da bacia hidrográfica para a mini-hídrica e da conduta forçada. ...	70
Figura 44: Curva de caudal classificado .....	73
Figura 45: Diagrama com o método utilizado para calcular a potência da bomba dos lagos ..	74
Figura 46: Percurso seleccionado .....	80
Figura 47: Valores da potência absorvida pelo motor em instante do percurso.....	81
Figura 48: Tempo necessário de funcionamento do motor para percorrer o percurso .....	82
Figura 49: Valor da energia necessária pelo motor para percorrer o percurso .....	83
Figura 50: Forças aplicadas a bicicleta eléctrica durante a descida .....	84

Figura 51: Cálculo da potência da frenagem regenerativa .....	85
Figura 52: Tempo de frenagem regenerativa para a distância percorrida pela BE. ....	86
Figura 53: Cálculo da energia recuperada pela frenagem regenerativa no percurso.....	86
Figura 54: Armazenamento da energia proveniente da frenagem regenerativa.....	88
Figura 55: Diagrama de funcionamento dos componentes da BE.....	89
Figura 56: Diagrama de Moody (adaptado de [63]) .....	95

# Lista de tabelas

Tabela 1: Valores de rugosidade para diferentes tipos de terreno [12] .....	22
Tabela 2: Valores de K para Portugal (adaptado de [14]) .....	23
Tabela 3: Classificação das CMH em relação a potência .....	30
Tabela 4: Classificação das centrais mini-hídricas quanto à altura de queda [24] .....	30
Tabela 5: Peso dos componentes que constituem o FIWinG .....	51
Tabela 6: Valores da força de arrasto no FIWinG e no tubo .....	55
Tabela 7: Valor da força de sustentação de cada asa no FIWinG.....	56
Tabela 8: Valores da força de arrasto total e da impulsão total .....	60
Tabela 9: Valores da força de tensão no cabo, ângulo entre o cabo e o solo, da altura a que fica o FIWinG e a altura a que deveria de ficar o FIWinG .....	60
Tabela 10: Cálculo dos valores da velocidade na TE .....	61
Tabela 11: Cálculo da energia anual produzida pela TE .....	62
Tabela 12: Cálculo da energia anual produzida pela TE do aerogerador .....	65
Tabela 13: Cálculo do tempo total de duração de cada caudal .....	71
Tabela 14: Valores obtidos dos parâmetros da equação dos caudais classificados .....	72
Tabela 15: Valores dos tempos para os caudais máximos e mínimos.....	73

# Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

AG	Aerogerador
BE	Bicicleta eléctrica
CMH	Centrais mini-hídricas
FIWinG	<i>Floating Wind Generator</i>
MARS	<i>Magenn air rotor system</i>
PE	Parque de Energia
SCs	Supercondensadores
TE	Turbina eólica
TH	Turbina hidráulica

Lista de símbolos

$\Delta H_{\text{agtrans}}$	Varição de altura desde o rio ao início dos lagos
$\Delta p_{\text{re}}$	Diferença de pressão ou perda de carga
$\Delta x$	Percurso de cada etapa
$a$	Aceleração do veículo
$A$	Ampere
$A_{\text{asa}}$	Área inferior da base da asa
$A_{\text{b}}$	Área da bacia hidrográfica
$A_{\text{entc}}$	Área de entrada do concentrador
$A_{\text{entf}}$	Área da entrada do FIWinG
$A_{\text{fr}}$	Área frontal do FIWinG
$A_{\text{frt}}$	Área frontal onde vai embater o vento
$A_{\text{said dif}}$	Área de saída do difusor
$A_{\text{saidc}}$	Área de saída do concentrador
$A_{\text{tb}}$	Área do tubo
$A_{\text{tubag}}$	Área da tubulação que transporta a água
$A_{\text{tubar}}$	Área do tubo que transporta o ar comprimido
$A_{\text{tur}}$	Área varrida pelas pás da turbina eólica
$A_{\text{v}}$	Área atravessada pelo vento

$A_{vent1}$	Área 1
$A_{vent2}$	Área 2
$C$	Factor de escala
$C_{ap}$	Capacidade de armazenamento
$C_D$	Coeficiente de arrasto
$C_l$	Coeficiente de sustentação
$Coef_{valv}$	Coeficiente das válvulas
$C_p$	Coeficiente de potência da turbina eólica
$D_{iam}^2$	Diâmetro frontal do FIWinG
$d_{con}$	Diâmetro concentrados
$d_{tub}$	Diâmetro da tubagem que transporta o ar comprimido
$d_{tubag}$	Diâmetro do tubo que transporta a água
$E_a$	Energia anual produzida pela turbina
$E_{aCMH}$	Energia anual produzida pela CMH
$E_{AG}$	Energia produzida pelo aerogerador
$E_{arm}$	Energia armazenada
$E_c$	Energia cinética
$E_f$	Energia anual produzida pelo FIWinG
$E_{ger}$	Energia produzida pelo gerador
$E_{motor}$	Energia gasta pelo motor
$E_{per}$	Energia total no percurso
$E_{rec}$	Energia recuperada durante o percurso
$E_{TE}$	Energia anual produzida pela turbina eólica
$F$	Faraday
$f(V_{vent})$	Função densidade de probabilidade de Weibull
$F_{ac}$	Força de aceleração do veículo eléctrica
$f_{a_{tub}}$	Força de atrito da tubagem
$F_f$	Força de atrito
$F_{moto}$	Força do motor
$F_{mov}$	Força do movimento, ou força da aceleração
$f_r$	Coeficiente de atrito
$F_w$	Força de arrasto do vento
$F_{wt}$	Força de arrasto total
$g$	Aceleração da gravidade
$H$	Altura pretendida
$h$	Hora
$H_{encf}$	Altura onde se encontra o FIWinG
$H_{man}$	Altura manométrica
$H_q$	Queda da queda de água
$H_r$	Altura de referência
$I_p$	Impulsão
$I_t$	Impulsão total
$J$	Joule

k	Factor de forma
Kg	Quilograma
kg/m <sup>3</sup>	Quilograma por metro cúbico
km/h	Quilómetro por hora
km <sup>2</sup>	Quilómetro Quadrado
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatts-hora
L	Força de sustentação
L <sub>cab</sub>	Comprimento do cabo
l <sub>tub</sub>	Comprimento do tubo de ar comprimido
l <sub>tubag</sub>	Comprimento da tubagem
M	Massa do veículo
m	Metro
m/s	Metro por segundo
m/s <sup>2</sup>	Metro por segundo quadrado
m <sup>2</sup>	Metro Quadrado
m <sup>3</sup> /s	Metro Cúbico por segundo
mm	Milímetro
MW	Megawatt
N	Newton
N/m <sup>2</sup>	Newton por metro quadrado
P <sub>água</sub>	Potência disponível pela água
P <sub>bomblag</sub>	Potência da bomba dos lagos
P <sub>comp</sub>	Potência do compressor
P <sub>e</sub>	Potência que o motor necessita para movimentar um veículo
P <sub>ent f</sub>	Potência do vento na entrada do FIWinG
P <sub>eq</sub>	Potência a instalar nos equipamentos
Perd <sub>tub</sub>	Perdas no tubo do ar comprimido
p <sub>locais</sub>	Perdas locais
Pluv	Pluviosidade que atinge uma região durante um ano
P <sub>re</sub>	Pressão do ar
P <sub>reg</sub>	Potência adquirida na frenagem regenerativa
P <sub>said f</sub>	Potência do vento na saída do FIWinG
P <sub>t</sub>	Potência mecânica disponível pela turbina
p <sub>transag</sub>	Perdas de transporte da água
P <sub>v</sub>	Potência média disponível pelo vento
Q	Caudal de cheias
Q <sub>ar</sub>	Caudal do ar comprimido
Q <sub>artub</sub>	Caudal do ar que passa no tubo
Q <sub>bom</sub>	Caudal da bomba
Q <sub>carc</sub>	Caudal calculado ao longo do tempo
Q <sub>carg</sub>	Carga do dispositivo de armazenamento
Q <sub>ins</sub>	Caudal instalado
Q <sub>max</sub>	Caudal máximo turbinado
Q <sub>med</sub>	Caudal médio anual da água
Q <sub>min</sub>	caudal mínimo turbinado

$Q_{\text{mod}}$	Caudal modular
$Re$	Número de Reynolds
$R_n$	Reacção normal
$s$	Segundos
$T$	Força de tensão no cabo
$t_{\text{caud}}$	Tempo do caudal
$t_{\text{fcmh}}$	Tempo de funcionamento da central mini hídrica durante o ano
$t_{\text{pet}}$	Tempo que a bicicleta demora a percorrer a etapa
$t_{\text{Qmax}}$	Tempo do caudal máximo
$t_{\text{Qmin}}$	Tempo do caudal mínimo
$U$	Tensão eléctrica
$V_{\text{agtub}}$	Velocidade da água no interior da tubulação
$V_{\text{eli}}$	Volume de hélio que terá de ter o FIWinG
$V_{\text{vent entc}}$	Velocidade do vento na entrada do concentrador
$V_m$	Velocidade media do vento
$V_{\text{ref}}$	Velocidade de referência do vento
$V_{\text{tb}}$	Velocidade do ar dentro do tubo
$V_{\text{veic}}$	Velocidade do veículo
$V_{\text{vent entf}}$	Velocidade do vento na entrada do FIWinG
$V_{\text{vent Max}}$	Velocidade máxima do vento admissível para a turbina eólica produzir
$V_{\text{vent saidc}}$	Velocidade do vento na saída do concentrador
$V_{\text{vent}}$	Velocidade do vento
$V_{\text{vent(H)}}$	Velocidade do vento na altura pretendida
$V_{\text{vent(Hr)}}$	Velocidade do vento na altura de referência
$V_{\text{vent0}}$	Velocidade mínima do vento para a qual a turbina eólica comesse a produzir
$V_{\text{vent1}}$	Velocidade média do vento em 1
$V_{\text{vent2}}$	Velocidade média do vento em 2
$W$	Watt
$W/\text{kg}$	Watt por quilograma
$Wh$	Watt-hora
$Wh/\text{kg}$	Watt-hora por quilograma
$Wh/\text{m}^3$	Watt-hora por metro cúbico
$Ws$	Watt-segundo
$Z_0$	Comprimento de rugosidade no local
$\alpha$	Parâmetro associado a rugosidade
$\beta$	Ângulo de inclinação do plano
$\gamma_{\text{ag}}$	Peso específico da água
$\mu_{\text{ag}}$	Viscosidade dinâmica da água
$\xi$	Rugosidade do tubo que transporta a água dos rios aos lagos
$\rho_{\text{ag}}$	Massa especificada água
$\rho_{\text{ar}}$	Massa especificado ar
$\rho_{\text{fl}}$	Diferença de densidade dos fluidos
$\Phi$	Ângulo entre o solo e o cabo do FIWinG
$\eta_{\text{arm}}$	Rendimento do sistema de armazenamento de energia
$\eta_{\text{bomb}}$	Rendimento da bomba
$\eta_{\text{compr}}$	Rendimento do compressor

$\eta_{\text{con}}$	Rendimento do concentrador
$\eta_{\text{cont}}$	Rendimento de circuito de controlo
$\eta_{\text{dif}}$	Rendimento do difusor
$\eta_{\text{G}}$	Rendimento do gerador
$\eta_{\text{reg}}$	Rendimento da travagem regenerativa
$\eta_{\text{SCs}}$	Rendimento do supercondensador
$\eta_{\text{TH}}$	Rendimento da turbina hidráulica
$\eta_{\text{tr}}$	Rendimento da transmissão da força do motor para a roda



# Capítulo 1

## Introdução

Nesta dissertação será realizado um trabalho sobre a análise de vários conceitos inovadores de tecnologias energéticas, nomeadamente energia eólica, energia hídrica e recuperação de energia, a implementar num Parque de Energia.

### 1.1 Enquadramento

Está previsto a implementação de um Parque de Energia no município da Ponte da Barca, o qual terá uma área de 150 hectares. Este constituirá um espaço com objectivos de interpretação e demonstração de tecnologias energéticas, associado a um espaço lúdico e hoteleiro.

A eficiência energética e a preservação do meio ambiente são questões de elevado interesse na nossa sociedade, devido as alterações climáticas que se têm verificado nos últimos anos.

O Parque de Energia terá o objectivo, de sensibilizar os cidadãos para a importância que a eficiência energética e a sustentabilidade ambiental têm para o nosso presente e futuro.

Essa sensibilização será efectuada sobre a forma educativa e formativa. Assim todos os edifícios que constituirão o Parque de Energia vão ter aplicadas técnicas activas e passivas relacionadas com a eficiência energética, térmica e sustentabilidade ambiental. O Parque é constituído por vários edifícios onde serão demonstradas técnicas inovadoras de conversão da energia de recursos endógenos. As tecnologias de conversão da energia a aplicar no Parque são energia eólica, solar e hídrica, tendo também implementado recuperação de energia nos transportes.

Existe assim um interesse em pesquisar tecnologias inovadoras com características próprias para a aplicação no Parque de Energia.

Uma das energias a demonstrar no Parque é a energia eólica, que efectua a conversão da energia cinética do vento em energia mecânica. É importante ter em consideração que este Parque não se encontra no local ideal para a aplicação desta tecnologia, porque está situado junto ao rio (entre montanhas), onde a velocidade média do vento é baixa. Irá ser necessário a implementação de uma tecnologia inovadora, para locais com velocidades do vento baixas.

Relativamente ao aproveitamento de energia hídrica, constata-se que o Parque de Energia situa-se num local com boas condições para o aproveitamento hídrico, devido as linhas de água que existem na proximidade, sendo esta energia a que contribui em maior parte para a sustentabilidade do Parque.

No interior do Parque, a mobilidade será restrita a veículos com motores eléctricos, de tracção humana ou deslocação por gravidade. Como um dos objectivos deste Parque de Energia é a eficiência energética, vai ser aplicado a recuperação de energia nos transportes, nomeadamente nos veículos eléctricos. O método que se vai utilizar é a frenagem regenerativa, conseguindo-se assim uma maior eficiência do veículo, pois este irá recuperar parte da energia consumida durante o seu movimento.

Existem outras tecnologias importantes de aproveitamento dos recursos renováveis, que poderiam ser aplicadas no Parque, nomeadamente o recurso solar, que não será abordado nesta dissertação.

### 1.2 Motivação

A razão que despertou o interesse pela realização desta dissertação reside no facto, de até ao momento não existir um Parque de Energia com a finalidade do Parque a implementar no município de Ponte da Barca. Assim a motivação principal é efectuar um trabalho de pesquisa sobre novas e inovadoras tecnologias energéticas a implementar no mesmo.

Para aplicar as tecnologias no Parque é necessário que estas tenham características próprias, que se possam adaptar aos recursos existentes no Parque.

Até ao momento, somente se desenvolveu tecnologias energéticas para se aplicarem nos locais com melhores recursos para as mesmas.

Assim foi necessário efectuar uma pesquisa de tecnologias inovadoras e criativas com características adequadas para a sua implementação no parque, para depois se efectuar um pré-estudo, sobre o dimensionamento dessas tecnologias de forma a se adaptarem melhor aos recursos existentes no Parque, e sobre a sua produção energética.

Esse pré-estudo é fundamental para a empresa responsável pela implementação do Parque de Energia, para que possa aceitar ou rejeitar as tecnologias estudadas.

### 1.3 Objectivos

Esta dissertação, tem como principal objectivo efectuar um pré-estudo de tecnologias de conversão de energia a aplicar no Parque.

Detalhadamente os objectivos relacionados com:

#### Energia Eólica são:

- Pré-estudo aerodinâmico do balão de hélio;
- Dimensionamento do concentrador de ar presente no balão de hélio;
- Dimensionamento do difusor que existirá no balão de hélio;
- Balanço energético.

#### Energia Hídrica são:

- Dimensionamento da turbina hidráulica a aplicar na central mini-hídrica;

- Balanço energético da central mini-hídrica.

#### Recuperação de Energia:

- Dimensionamento do motor/gerador a aplicar na bicicleta eléctrica;
- Dimensionamento do dispositivo de armazenamento e de alimentação da bicicleta eléctrica;
- Balanço energético de um percurso efectuado pela bicicleta eléctrica.

## **1.4 Estrutura da Dissertação**

Esta Dissertação de Mestrado encontra-se dividida em 7 capítulos. No primeiro capítulo é efectuada a introdução a este trabalho, o interesse por este tema, o seu enquadramento e os objectivos.

No capítulo 2 é realizada uma descrição pormenorizada do Parque de Energia, onde se descreve o objectivo e função de cada infra-estrutura presente no Parque.

No capítulo 3 é apresentado o estado de arte da energia eólica, hídrica e da recuperação de energia, onde se ilustram as equações a utilizar para calcular a energia que cada uma das tecnologias produz.

No capítulo 4 é executado um pré-estudo da tecnologia de captação da energia eólica a aplicar no Parque. Neste capítulo é efectuado um dimensionamento para que se possa estimar a energia anual produzida por essa tecnologia.

O estudo efectuado a energia hídrica para implementar no Parque é efectuado no capítulo 5, onde se efectua a escolha do tipo da turbina hidráulica e a potência a instalar. É também calculada uma bomba hidráulica para transportar a água do rio Lima até à cota mais elevada dos lagos, para que se possa manter uma cota mínima nestes.

No capítulo 6 é exposto um estudo sobre recuperação de energia numa bicicleta eléctrica. Neste será realizado o cálculo da energia que o motor vai consumir num determinado percurso, e a energia que se pode recuperar nesse mesmo percurso a partir frenagem regenerativa.

Por último, o capítulo 7 apresenta as conclusões mais importantes do trabalho desenvolvido, e expõem-se alguns trabalhos futuros a ser desenvolvidos para a concretização das tecnologias estudadas.



# Capítulo 2

## Descrição do Parque de Energia

### 2.1 Introdução

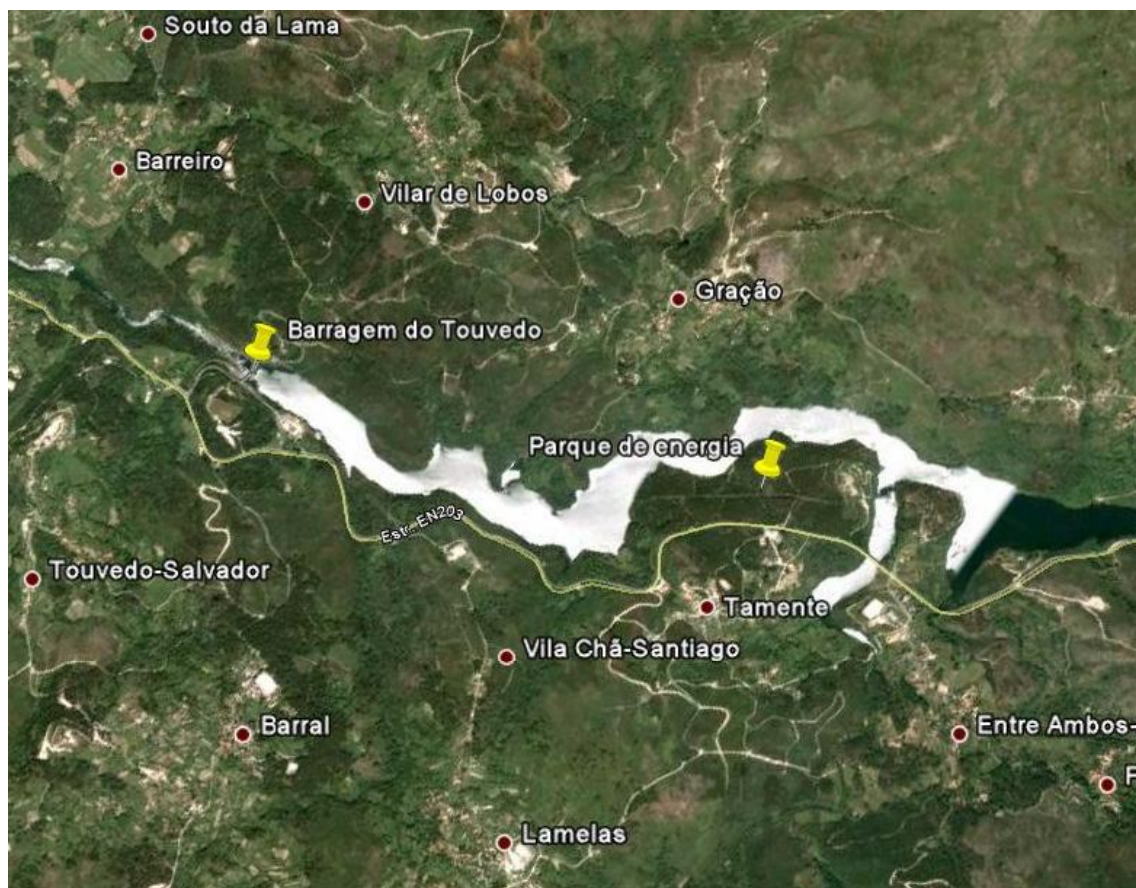
O Parque da Energia (PE), vai ser desenvolvido em São Miguel de Entre-Ambos-os-Rios, no concelho de Ponte da Barca, distrito de Viana do Castelo.

Na figura seguinte está ilustrada uma vista aérea do distrito onde se vai construir o Parque de energia.



**Figura 1:** Vista aérea do Distrito onde se encontra o Parque de Energia

Na figura seguinte está um zoom da Figura 1 onde se pode ver em pormenor as localidades mais próximas do Parque de Energia.



**Figura 2:** Vista aérea da freguesia de Entre-Ambos-os-Rios

A relação do território de Ponte da Barca com a energia foi considerada no Plano Estratégico de Desenvolvimento Municipal, como um factor relevante e distintivo de inquestionável interesse para o desenvolvimento sustentado do Município e para a promoção de Ponte da Barca, numa lógica que vai para além do marketing territorial, mas que também tem essa dimensão em torno da marca “Território de Energia Limpa”. É neste contexto que nasce a ideia de implementar um parque de energia nesta região.

O empreendimento é de carácter turístico, e pretende, além disso, ser uma referência no campo da eficiência energética e inovar pelo carácter educativo, que proporciona, aos seus utilizadores, a consciencialização da importância da gestão de energia nas actividades quotidianas. Este deverá ser uma referência das melhores e mais eficientes práticas para a sustentabilidade ambiental, visto ser a preservação do ambiente e a eficiência energética um dos temas da actualidade em todo o mundo tendo um crescente interesse ao longo dos anos.

Como um dos principais objectivos do parque é a sensibilização e a educação ambiental, assim este será constituído por edifícios nos quais irão ser implementadas técnicas passivas e activas relacionadas com a eficiência no domínio da energia, conforto térmico e da sustentabilidade ambiental.

Na Figura 3 está ilustrado as futuras infra-estruturas do PE.



Figura 3: Planta do Parque de Energia [1]

## 2.2 Descrição Pormenorizada do Parque de Energia

Neste subcapítulo é efectuada uma descrição pormenorizada de cada ponto da planta do Parque de Energia.

### Fórum das Energias

O PE incluirá no seu seio o Fórum das Energias, edifício de grande dimensão (4500 m<sup>2</sup> de área) que assume um papel de irreverência tanto do ponto de vista estético como do tecnológico. Este será um edifício de concepção arquitectónica invulgar, que terá uma configuração de uma grande nave ou hangar<sup>1</sup>.

Será instalado no PE um Museu das Energias (incluído no Fórum), indispensável para um parque temático do género. No interior desta instalação encontra-se a evolução das diferentes formas de energia, o que foi tido em conta na concepção do exterior do edifício. Desta forma, o Fórum inclui, na sua fachada, uma pequena central com capacidade de produção de calor (solar térmica) bem como de energia eléctrica (fotovoltaica), sendo o próprio edifício uma espécie de peça do Museu. Com o intuito de dinamizar o Parque, haverá um espaço cuja função será a promoção de novas tecnologias por parte de empresas que queiram apresentar os seus protótipos e produtos em comercialização. Haverá, ao dispor das mesmas, um centro de congressos.



**Figura 4:** Fórum das Energias [1]

---

<sup>1</sup> Está a ser elaborado este semestre uma dissertação sobre este tema denominada Avaliação de Sustentabilidade em Edifícios com Arquitecturas Polimórficas.

### Academia das Energias

Será fundada a Academia das Energias, com a perspectiva de tornar o empreendimento numa unidade de Investigação e Desenvolvimento (I&D), e com possibilidade de encontros da comunidade científica nacional e internacional, promovendo colóquios nesta área da Ciência. Poderão também existir acções de formação, de promoção e difusão de conhecimento associado à eficiência energética e às energias endógenas.

### Hotel

Em termos logísticos, existem duas zonas distintas. Junto ao rio será instalado um Hotel-Spa com capacidade de 40 quartos. O tema central deste hotel é a água, tanto devido à sua localização, como à sua vocação. O Hotel d'Água terá a classificação de 4 estrelas, e será vocacionado para famílias.

### Posto Náutico

Esta infra-estrutura tem como objectivo apoiar a logística das diversas actividades de lazer, desportivas e de aventura, associadas à água e montanha.

Estão previstos edifícios temáticos espalhados pelo Parque, nomeadamente a Casa da Água e a Casa do Vento.

### Casa do Vento

A casa do Vento terá como função sensibilizar os visitantes para os aspectos da evolução da energia eólica, o seu crescente desenvolvimento e a sua importância no panorama energético nacional e europeu. No interior será possível para o visitante saber, em tempo real, os valores de produção energética de recurso eólico, a nível nacional.

Serão implementadas, no exterior, diferentes tipos de pequenas turbinas eólicas, nomeadamente turbinas de eixo vertical e turbinas de eixo horizontal.

O projecto prevê a implementação de um aerogerador flutuante de hélio, o qual será recolhido no piso superior quando se verificar perigo no seu funcionamento devido a elevadas velocidades de vento ou tempestades atmosféricas.

### Casa da Água

A casa da água contempla todas as potencialidades relacionadas com a água para aproveitamento energético, tanto nas tecnologias relacionadas com as ondas, como a das marés. Esta casa ficará situada no centro de um dos lagos existentes no Parque de Energia. As tecnologias serão implementadas de modo a que o utilizador possa observar o processo de conversão de energia cinética em energia mecânica, e posteriormente em energia eléctrica.

### Ponte pedonal

Será instalada uma ponte sobre o Rio Lima, que permitirá a travessia pedonal e em bicicleta para a margem oposta do rio, onde haverá um percurso de grande interesse paisagístico.

### Monocarril

Um monocarril é um veículo que se desloca por gravidade, sobre um carril desde a cota mais elevada do Parque até à cota do rio. Este possuirá na parte superior um sistema

fotovoltaico que tem como finalidade produzir energia a qual será armazenada em baterias, para que estas possam alimentar o motor eléctrico do monocarril, para que este se possa deslocar desde a cota do rio até à cota mais elevada.

Prevê-se um percurso de 3765 m que abrange os pontos mais importantes do Parque, pretendendo dar, ao utilizador, uma percepção global do Parque e do vale do Rio Lima. O monocarril efectua várias paragens ao longo do Parque.

### Lagos

Serão criados lagos artificiais em vários pontos do Parque. A sua criação tem em primeira instância uma finalidade estética, permitindo por outro lado, a implementação de um mini-rafting, e também de criar o suporte para experiências demonstrativas de tecnologias com base em energia hídrica.

### Central Mini-Hídrica

Esta central está instalada na Casa da Água, referida anteriormente e tem como finalidade a produção de energia, para que o Parque seja o mais sustentável possível, do ponto de vista energético.

### Praça das Energias

Na Praça das Energias, com área prevista de 7000 m<sup>2</sup>, haverá a possibilidade de realizar eventos sociais e culturais. A sua localização está ainda por definir.

### Empreendimento de edifícios modulares

Ao longo da colina serão instalados aproximadamente 100 edifícios modulares unifamiliares, para aluguer de média duração. A utilização dos edifícios incluirá um manual de utilização para melhoria do comportamento dos mesmos.



Figura 5: Casas modulares do Parque de Energia [1]

#### Sistema de conta corrente energética

Existirá um cartão para cada utilizador do Parque, no qual será registada a energia dispendida nos processos em que o utilizador se envolve. Deste modo, o utilizador é informado dos valores de energia associados à sua actividade, permitindo assim uma acção de sensibilização.

No final da estadia do utilizador, será efectuado o balanço pela leitura do valor do cartão, atribuindo-se penalizações ou prémios a cada utilizador em função da sua prestação.

Espera-se que a sensibilização para a temática energética esteja presente igualmente nestes locais, nomeadamente alertando para a pegada ecológica de cada componente da refeição.

#### Mobilidade

No Parque de Energia só circularão pequenos veículos como trotinetas patins, skates, veículos eléctricos como por exemplo bicicletas eléctricas, e o já mencionado monocarril.

As bicicletas eléctricas serão constituídas por um motor eléctrico, o qual também pode funcionar como gerador para que se possa efectuar recuperação de energia através de frenagem regenerativa. Estas bicicletas vão ser dimensionadas para o PE nas quais existirá um cartão onde vai ficar registado o balanço energético ao fim de cada utilização. Serão também dotadas de um visor no qual o utilizador poderá consultar a cada instante o balanço energético da energia total gasta e recuperada até ao momento.

Os veículos são colocados num parque de estacionamento subterrâneo, essa deslocação é realizada por um “descensor” de veículos, onde se pretende recuperar energia resultante da descida, com a energia potencial, no acto da descida. Posteriormente, a saída dos veículos do parque dá-se pelo nível inferior.

#### Outros

Os desportos radicais, com forte ligação à Natureza, também farão parte da temática deste PE.

#### Entidades envolvida

Este projecto está a ser desenvolvido com base no protocolo celebrado entre a Câmara Municipal de Ponte da Barca e a Junta de Freguesia de Entre-Ambos-os-Rios, por um lado, e pela empresa Engenheiros Associados - Soares Magalhães & Delgado (EA), pelo outro.

Serão desenvolvidas soluções pela Universidade do Porto, e a Smartwatt, para enriquecimento do projecto com contributos técnicos. Serão também estabelecidos contactos com outras universidades nacionais e estrangeiras para o desenvolvimento do projecto do Parque.

O Parque é, essencialmente, promotor de sensibilização para a questão da Sustentabilidade, com enfoque na temática da energia, seja quando frequentado por utilizadores em actividades de lazer, seja pelas actividades académicas nele previstas.



# Capítulo 3

## Estado de Arte

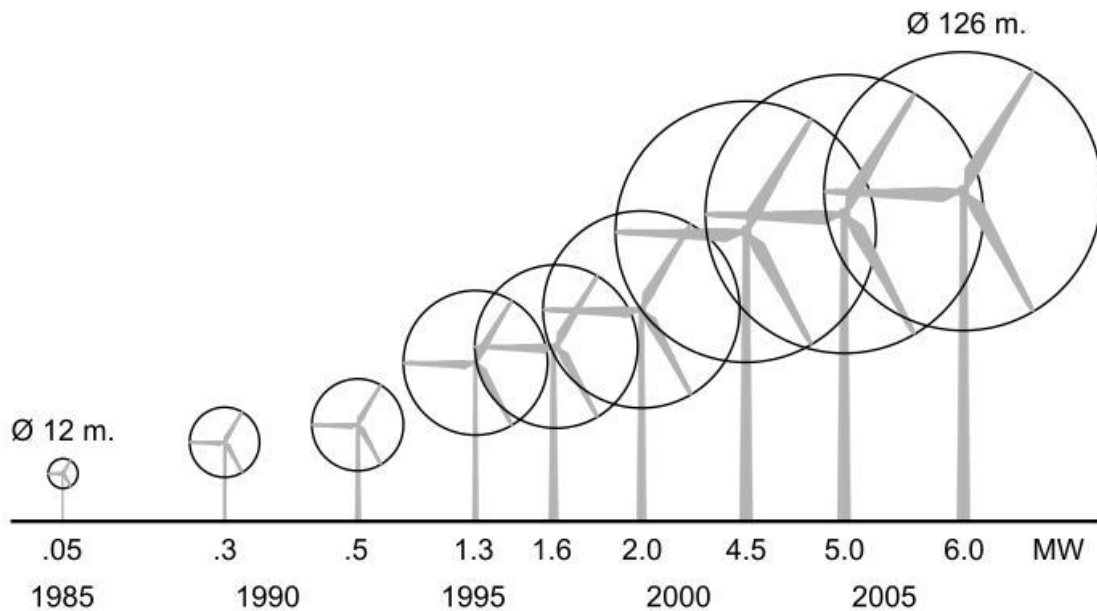
### 3.1 Energia Eólica

#### 3.1.1 Introdução

A utilização da energia eólica como fonte de energia tem um marco presente na história devido a sua longa existência. A primeira descrição de um moinho de vento teve lugar na Pérsia no século X. Estes moinhos eram de eixo vertical utilizados para moagem de grãos [2]. A energia do vento aplicava-se também nos transportes das navegações, isto é, às velas das embarcações que captavam esta energia, logo tal factor foi importante para os descobrimentos.

Com a crise do petróleo em 1973 os EUA e a Europa tiveram que procurar alternativas para reduzir a dependência dos combustíveis fósseis designadamente do petróleo, essas alternativas passaram pelo uso de energias renováveis.

Nos últimos anos houve um grande desenvolvimento relativamente à tecnologia e ao tamanho das turbinas eólicas (TE). Na Figura 6 verifica-se o desenvolvimento das turbinas eólicas.



**Figura 6:** Evolução das turbinas eólicas [3]

O aumento do diâmetro das TE é vantajoso, porque possibilitam o aumento da energia produzida (devido as pás “varrem” uma área maior).

A energia eólica é das energias renováveis, a que teve um maior crescimento nos últimos anos. Esse crescimento pode ser motivado com as metas estabelecidas pela *European Wind Energy Association* (EWEA) de modo a que em 2020, a energia eólica forneça cerca de 12 a 14% do consumo de electricidade na EU (com uma capacidade total instalada de 180GW), e a nível mundial esse mesmo recurso energético possa fornecer 7 a 8% da energia eléctrica consumida[4].

### 3.1.2 Tecnologias de Conversão de Energia a Partir de Recursos Eólicos.

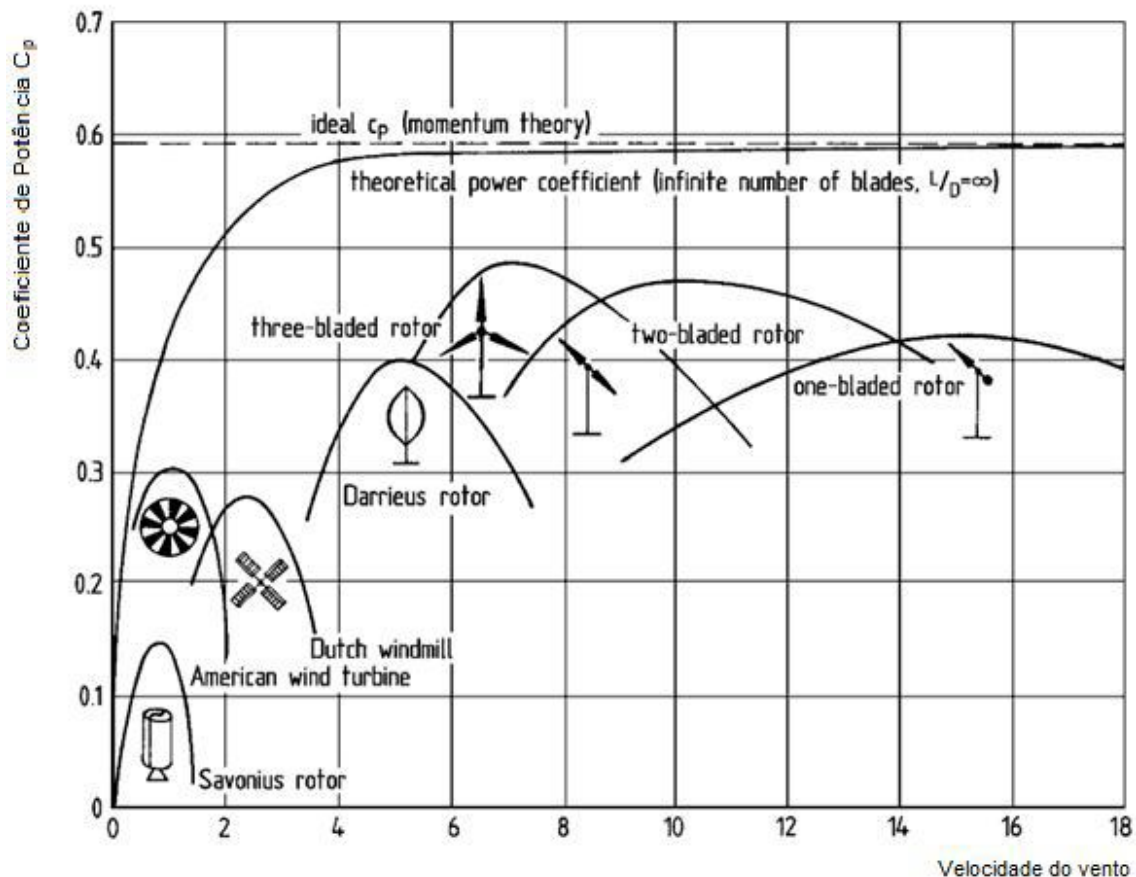
A conversão de energia a partir de recursos eólicos tem como base a transformação da energia cinética do vento em energia mecânica, e por sua vez energia mecânica em energia eléctrica.

Assim sendo, a energia cinética do vento é captada pelas pás que constituem as turbinas eólicas, fazendo com que as mesmas rodem e produzam energia mecânica.

Existem várias formas de converter energia cinética contida no fluxo de ar, em trabalho mecânico. Pode verifica-se essas diferentes formas de conversão em várias patentes existentes e em museus [5].

De todos os projectos construídos verifica-se que a forma mais eficiente de transformar energia cinética do vento em energia mecânica de rotação é a partir do rotor eólico.

Os conversores de energia eólica podem ser classificados consoante o seu projecto de construção e velocidades de funcionamento. A configuração dos rotores varia consoante a velocidade do vento para se obter um rendimento mais elevado como ilustra o Figura 7.



**Figura 7:** Variação do coeficiente de potência para vários tipos de TE, com a variação da velocidade do vento (adaptando de [5])

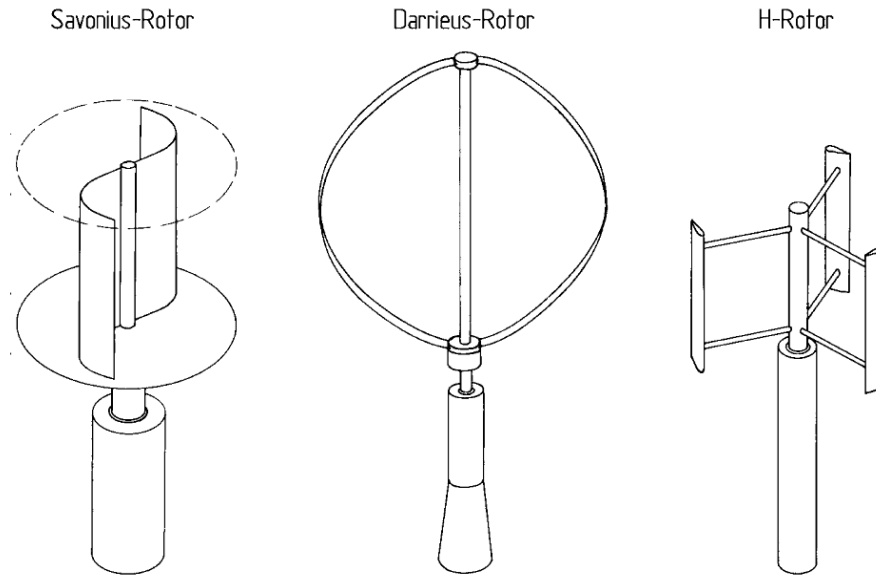
A classificação do rotor que constitui a turbina eólica é efectuada segundo o seu aspecto construtivo e a sua posição do eixo de rotação. Assim faz-se uma distinção entre rotores que tem um eixo de rotação horizontal e rotores com o eixo de rotação vertical.

### 3.1.2.1 Rotores com Eixo de Rotação Vertical

Rotores com eixo de rotação vertical têm um eixo de rotação perpendicular à direcção do vento incidente, logo perpendicular à superfície da terra. As primeiras máquinas eólicas a serem utilizadas pertenciam a esta categoria. Estes rotores podem ser movidos por forças de sustentação (*lift*) e por forças de arrasto (*drag*) [6].

Os três rotores com eixo de rotação vertical mais importantes são:

- Rotor *Darrieus*
- Rotor H
- Rotor *Savonius*



**Figura 8:** Tipo de rotor de eixo vertical [5]

Nos seguintes pontos enunciam-se as vantagens das TE de eixo vertical [7]:

- Pode colocar-se o gerador, a caixa de velocidades e os restantes componentes no solo, sendo desnecessária uma torre para a máquina;
- Não necessita de um mecanismo para ajustar o rotor contra o vento.

Em contrapartida as suas desvantagens [7]:

- O rotor encontra-se perto do chão (visto não necessitar da torre), vai originar o aproveitar do vento a baixas velocidades;
- A eficiência das turbinas de eixo vertical é menor que a eficiência das turbinas de eixo horizontal;
- Não possui arranque automático (por exemplo uma turbina do tipo Darrieus precisa de um “empurrão” antes de iniciar. É um pequeno inconveniente para uma turbina ligada a rede, uma vez que se pode usar o gerador como um motor para iniciar a máquina;
- Carece da utilização de espigas de suporte.

#### a) Rotor *Darrieus*

A única TE de eixo vertical a ser comercializada foi do tipo Darrieus (Figura 8), esta foi inventada pelo engenheiro francês *George Darrieus*, o qual a projectou e a patenteou em 1931. Esta turbina foi fabricada pela empresa *E.U.FloWind* a qual parou a sua produção em 1997 [7].

Estes rotores são movidos pelas forças de “*lift*”. Pode ser constituído por lamina (duas ou três) que são unidas nos extremos ao eixo vertical, quando o rotor começa a rodar as lamina são curvadas pela força centrífuga, adoptando uma forma de uma catenária com o diâmetro aproximadamente igual a distancia entre as pontas [5]. Para que uma TE do tipo *Darrieus* comece a produzir energia eléctrica, é necessário que as lâminas do rotor rodem a uma velocidade maior que a do vento, assim para que as pás comecem a rodar a uma

velocidade superior a velocidade do vento, vai ser necessário que o motor de indução/gerador ou outro motor “ajude” o arranque das pás [8] [9].

### b) Rotor H

Este tipo de rotor é uma variação do rotor *Darrieus*. As lâminas do rotor H ao contrário das lâminas do rotor *Darrieus*, são constituídas em forma de linha recta como demonstrado na Figura 8 [5]. O rotor H pode ter lâminas articuladas, que mudam de ângulo sobre o ciclo de rotação para que facilite o arranque sem necessitar de “ajuda” para este[8].

### c) Rotor *Savonius*

O rotor *Savonius* são muito usados devido a facilidade de construção e baixo custo.

Este tipo de rotor é utilizado essencialmente em bombas de água de pequeno porte, não é adequado para a produção de electricidade porque trabalham a baixas velocidades de vento, e possuem rendimentos baixos. O rotor *Savonius* com uma optimização na constituição aerodinâmica pode atingir um coeficiente de potência na ordem dos 0,25 [5].

## 3.1.2.2 Rotores com eixo de Rotação Horizontal

Rotores com eixo de rotação horizontal tem o eixo de rotação colocado paralelamente à direcção do vento.

Este tipo de rotores podem ser constituídos por:

- Uma pá com um contrapeso;
- Duas pás;
- Três pás;
- Múltiplas pás.

As pás podem ter várias formas e serem constituídas por vários materiais, estes podem ser de madeira, alumínio ou fibra de vidro[6].

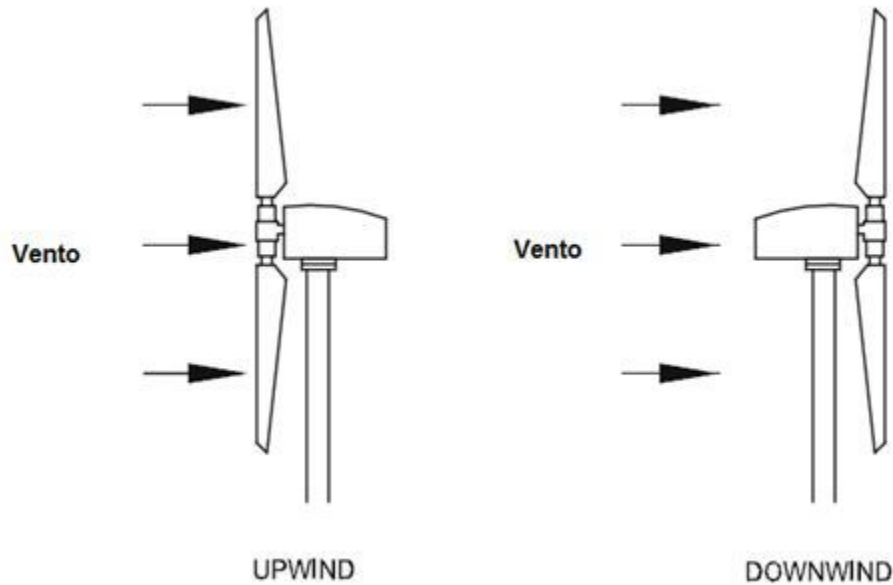
O número de pás que constitui o rotor depende de muitos factores, tal como:

- Velocidade do vento na região onde vai ser implementado;
- Finalidade a que se destina;
- Estrutura de suporte, etc.

Para velocidades de vento elevadas usam-se rotores com uma, duas ou três pás, para velocidades medias de vento usam-se rotores de 3 a 6 pás, e para velocidades de vento baixas usam-se rotores com 6 a 24 pás.

As turbinas de eixo horizontal podem ser classificadas consoante a colocação do rotor em relação á torre, e classificam-se como:

- Turbinas *Upwind*
- Turbinas *Downwind*



**Figura 9:** Turbinas *upwind* e *downwind* [7]

#### a) Turbinas *Upwind*

Neste tipo de TE o vento incide na área de varredura do rotor pela parte frontal da turbina como ilustra a Figura 9.

A principal vantagem é que evita o distúrbio causado pela torre no vento [7].

Como desvantagens, as turbinas *upwind* necessitam de ter um mecanismo para orientar o rotor de frente para o vento. O rotor precisa também de ser colocado a alguma distância da torre [7], isto porque a “sombra” das pás provocam esforços vibratórios na torre [6].

#### b) Turbinas *Downwind*

Nas turbinas *Downwind* o vento incide na área de varredura do rotor por trás da TE. Tem como vantagem teórica de que podem ser constituídas sem um mecanismo de orientação do rotor em relação ao vento, mas esta vantagem só é utilizada nas TE de pequena dimensão, pois para turbinas de grande escala, devido a flexibilidade do rotor, durante as fortes rajadas de vento, as pás das turbinas podem colidir com a torre.

As desvantagens destas configurações é a turbulência causada no vento pela torre, o que faz diminuir a eficiência da turbina. Essa turbulência vai provocar um aumento do ruído, o que pode dificultar a autorização do projecto principalmente quando este se situa perto de povoações [7].

### 3.1.3 Factores que Influenciam a Velocidade do Vento

Os ventos são provocados por diferenças de pressão ao longo da superfície terrestre, isto porque a radiação solar recebida na terra é menor nas zonas polares do que nas zonas equatoriais. Assim a origem do vento provém da radiação solar.

Para o cálculo da potência que uma TE pode produzir é fundamental saber a velocidade do vento, visto a potência variar com a velocidade do vento, como se verifica na equação 3.7. Assim é fundamental saber como varia a velocidade do vento para diferentes locais.

Existem vários factores que influenciam a velocidade do vento, eles são:

- A presença de obstáculos;
- O relevo;
- A variação da altura;
- A rugosidade do terreno.

Os dados sobre estes factores podem ser obtidos por imagens de satélite, cartas militares, mapas digitais, entre outros.

### 3.1.3.1 Presença de obstáculos

Os obstáculos como edifícios, agrupamento de árvores, formações rochosas, impedem a passagem das partículas de ar, causando uma diminuição da sua velocidade. A velocidade será mais afectada, a jusante do obstáculo, onde existe um desenvolvimento da esteira viscosa.

Quando as partículas de ar passam em obstáculos, o seu escoamento é influenciado por diferentes factores como a distância entre os obstáculos, a sua rugosidade, a forma dos obstáculos, etc. Assim a presença de obstáculos apresentam perdas energéticas, devido à perda de velocidade do vento, às mudanças de direcção e à turbulência provocada.

### 3.1.3.2 Relevo

Quando existe um relevo no terreno (montanhas, vales e "gargantas"), dependendo da sua forma, pode verificar-se um aumento da velocidade do vento, e uma mudança de direcção.

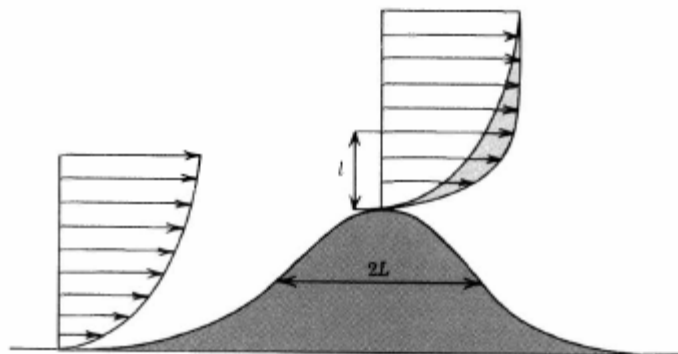


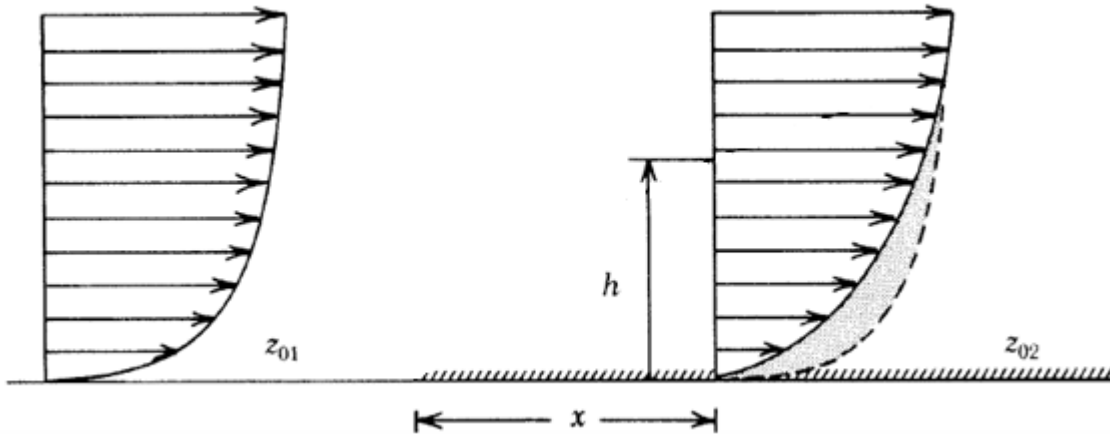
Figura 10: Variação da velocidade do vento com a presença de uma colina[10]

Na Figura 10 está ilustrado a influência de uma colina na velocidade do vento. Observa-se que a mesma quantidade de vento que existe antes da colina, tem que passar numa área menor no topo da mesma, aumentando assim a velocidade do vento.

### 3.1.3.3 Rugosidade do terreno

A rugosidade de um terreno [árvores, vegetação rasteira, arbusto que se encontram a superfície do solo] relaciona-se com a resistência à passagem do vento.

Assim a rugosidade de um determinado sitio, é maior quanto mais densa e mais alta for a constituição dos elementos existentes no terreno.

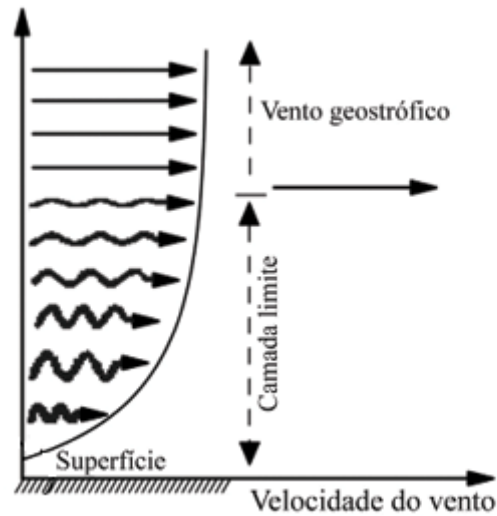


**Figura 11:** Variação da velocidade do vento com diferentes rugosidades [10]

Na Figura 11 pode verificar-se como é afectada a velocidade do vento para diferentes valores de rugosidade ( $Z_0$ ). O valor da rugosidade  $Z_{01}$  é mais baixo que  $Z_{02}$ , e como se pode ver na Figura 11, para a altura  $h$  em  $Z_{02}$  a velocidade do vento é menor que para  $Z_{01}$ . Com o aumento da altura a velocidade do vento aumenta, devido a menor influência da rugosidade do terreno. Assim é fundamental a colocação das TE a uma altura elevada, para a velocidade do vento não ser afectada pela rugosidade.

### 3.1.3.4 Altura

A velocidade do vento varia com a altura. Na figura seguinte pode ter-se uma ideia como varia a velocidade do vento com a altura.



**Figura 12:** Variação da velocidade do vento com a altura [11]

Na energia eólica são utilizados normalmente duas leis para caracterizar a velocidade do vento com a altura, a Lei da Potência e a Lei Logarítmica. A lei da potência é descrita pela equação seguinte [12] .

$$V_{\text{vent}}(H) = V_{\text{vent}}(H_r) \times \left(\frac{H}{H_r}\right)^\alpha \quad (3.1)$$

Onde:

- $V_{\text{vent}}(H)$ - velocidade do vento à altura  $H$  pretendida (m/s);
- $V_{\text{vent}}(H_r)$  -velocidade do vento à altura de referência ( $H_r$ ) (m/s);
- $H$ - altura a que é pretendida a velocidade do vento (m);
- $H_r$  - altura de referência (m);
- $\alpha$  - Parâmetro associado à rugosidade

Sendo:

$$\alpha = \frac{1}{\ln\frac{H}{Z_0}} \quad (3.2)$$

Onde:

- $Z_0$ - comprimento da rugosidade num local (m)

O modelo normalmente utilizado para estimar a velocidade do vento para uma determinada altura, é o modelo da Lei Logarítmica, dada pela expressão seguinte [12]:

$$V_{\text{vent}}(H) = V_{\text{vent}}(H_r) \times \frac{\ln\frac{H}{Z_0}}{\ln\frac{H_r}{Z_0}} \quad (3.3)$$

Existem valores típicos do comprimento da rugosidade para determinados locais. Esses valores estão representados na seguinte tabela:

**Tabela 1:** Valores de rugosidade para diferentes tipos de terreno [13]

<i>Tipo de Terreno</i>	<i>Z0 (metros)</i>
Plano (mar, areia, neve)	0,001 - 0,02
Moderadamente rugoso (ervas curtas, campos de cereal)	0,02-0,3
Rugoso (bosques, bairros)	0,3 -2
Muito rugoso (cidades, edifícios)	2,1

Deve-se ter em conta que tanto a Lei Logarítmica como a Lei da Potência, foram desenvolvidas para terrenos planos e homogêneos. Assim para orografias mais complexas estes modelos estão sujeitos a incertezas.

A Lei da Potência é mais fácil e mais simples que a Lei Logarítmica, isto porque a Lei Logarítmica é um modelo mais complexo onde é considerado que o escoamento na atmosfera é altamente turbulento.

### 3.1.4 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull caracteriza a probabilidade de ocorrência de determinadas velocidades de vento.

A função densidade de probabilidade de Weibull  $f(V_{vent})$  é expressa por [14]:

$$f(V_{vent}) = \frac{k}{c} \times \left(\frac{V_m}{c}\right)^{k-1} \times e^{-\left(\frac{V_m}{c}\right)^k} \quad (3.4)$$

Onde:

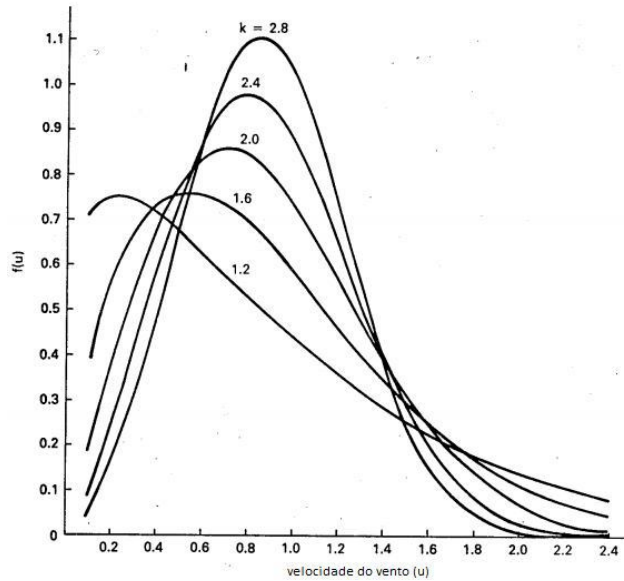
$f(V_{vent})$  - função densidade de probabilidade de Weibull;

$k$  - factor de forma, que é adimensional e indica a forma e a uniformidade da curva de Weibull;

$c$  - factor de escala, relacionado com a velocidade média do vento(m/s);

$V_m$  - velocidade média do vento (m/s)

Na seguinte figura pode verificar-se a influência do factor de forma ( $k$ ) na curva da distribuição de probabilidade.



**Figura 13:** Variação da curva de distribuição de Weibull ( $f(V_{\text{vent}})$ ) em função do factor de forma ( $k$ ) para  $c=1$  (adaptado de [14])

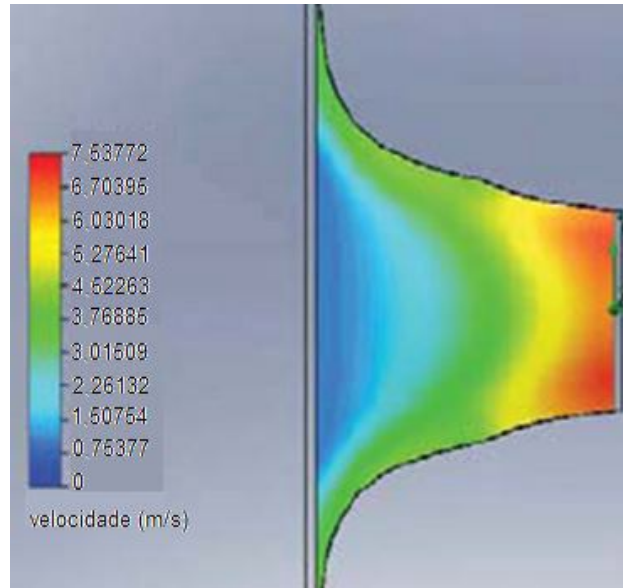
Existem valores tabelados de  $k$ . Na Tabela 2 estão os valores de  $k$  em Portugal para as diferentes alturas.

**Tabela 2:** Valores de  $K$  para Portugal (adaptado de [15])

Altura (m)	$k$
10	1,83
30	2,09
100	2,33

### 3.1.5 Concentradores

Quando se aplica concentradores à frente de uma turbina eólica, estes vão ter a função de aumentar a velocidade do vento. Assim com os concentradores pode aumentar-se a velocidade média do vento com a diminuição da área. Na figura seguinte observa-se a variação da velocidade do vento dentro de um concentrador.



**Figura 14:** Variação da velocidade do vento num concentrador [16]

Como se pode ver na Figura 14 com a diminuição entre a área de entrada e a área de saída do concentrador, vai originar o aumento da velocidade média do vento para que se possa garantir a conservação da massa como mostra a equação 3.5 [17].

$$A_{vent1} \times V_{vent1} = A_{vent2} \times V_{vent2} \quad (3.5)$$

Onde:

$A_{vent1}$  é a área 1 ( $m^2$ );

$V_{vent1}$  é a velocidade média do vento em 1 (m/s);

$A_{vent2}$  é a área 2 ( $m^2$ );

$V_{vent2}$  é a velocidade média do vento em 2 (m/s)

A equação 3.5 é aplicada idealmente, desprezando as perdas no concentrador, o que normalmente não acontece na realidade.

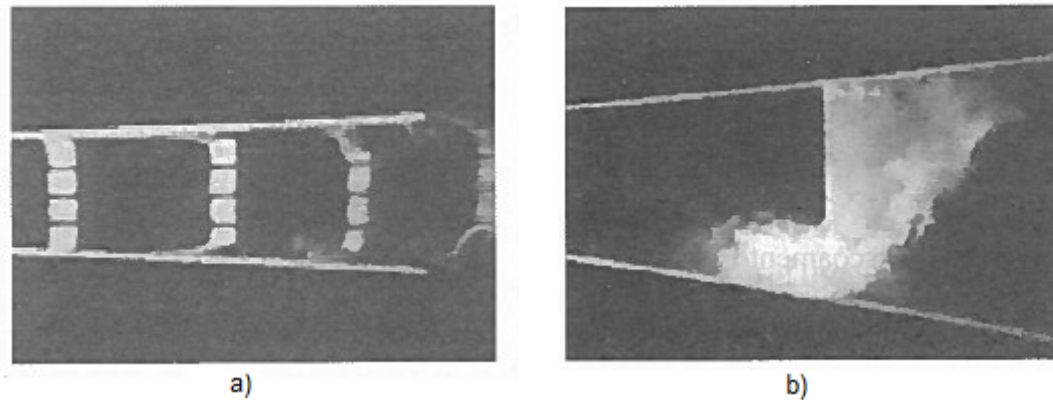
Como se pode ver na Figura 14 o ar à passagem pelo concentrador exerce pressão nas paredes não existindo grandes preocupações em haver uma separação da camada limite do fluido (ar) [17].

### 3.1.6 Difusor

O difusor ao contrário do concentrador vai ter a função de diminuir a velocidade média do vento.

O difusor tem uma área de saída maior que a área de entrada, assim como a equação 3.5 ilustra, esse aumento entre a área de entrada e a área de saída vai fazer com que a velocidade do vento à passagem pelo difusor diminua.

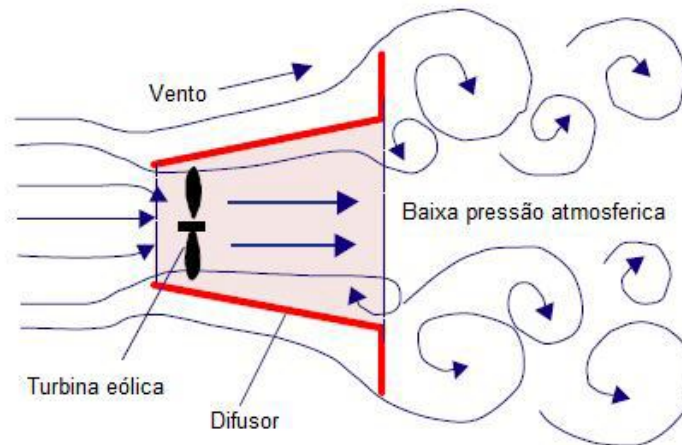
Segundo [17] tem que se ter em atenção a taxa de aumento da área, porque se essa taxa for elevada, isto é, se o ângulo de abertura do difusor for elevado, o vento poderá atingir separações das camadas limites desenvolvendo-se ao longo das paredes sólidas como demonstra a figura seguinte.



**Figura 15:** Na figura a) escoamento num difusor com um pequeno ângulo de abertura; figura b) Difusor com ângulo de abertura maior e a separação instantânea da cama limite [17].

Na Figura 15 a) pode ver-se que a camada limite não se separa e o escoamento processa-se ao longo das paredes sólidas do difusor. Na Figura 15 b) como o ângulo de abertura do difusor é maior, vai haver uma separação numa das paredes do difusor, o que vai dificultar o escoamento do fluido [17].

O difusor também se pode aplicar às TE, isto porque à entrada do difusor verifica-se uma maior velocidade do vento, como ilustra a Figura 16 [9].



**Figura 16:** Variação da velocidade dentro de um difusor[9]

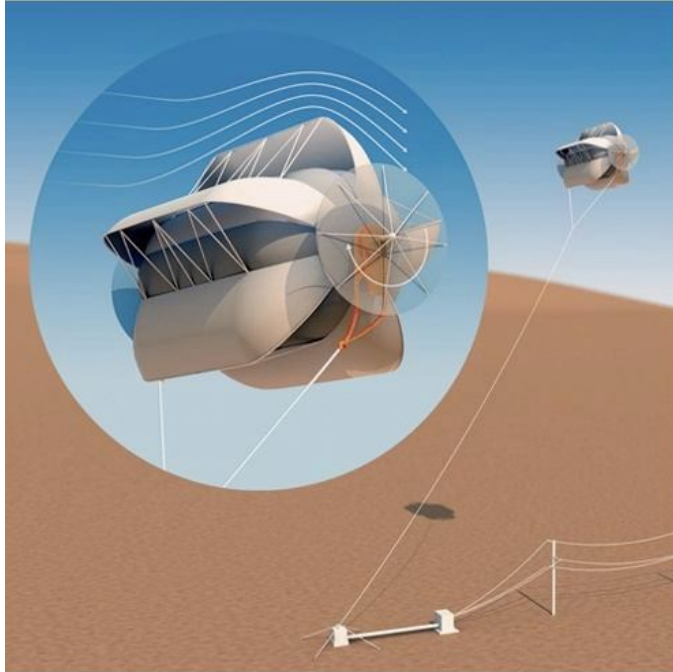
Como se pode ver na Figura 16 o vento aumenta de velocidade na entrada do difusor, mas logo de seguida a velocidade diminui, e na saída do difusor vai haver turbulência do vento, porque a velocidade do vento que sai do difusor é menor que a velocidade do vento no exterior.

### 3.1.7 Turbinas Eólicas Flutuantes no Ar

Existem vários protótipos de sistemas flutuantes de turbinas eólicas. Estes sistemas têm como função aproveitar os ventos a uma maior altitude, visto o vento ter uma maior velocidade e melhor qualidade com o aumento da altura em relação ao solo.

Um dos protótipos mais promissores é o *MAGENN AIR ROTOR SYSTEM (MARS)*. Este protótipo é um balão que capta a velocidade do vento e que gira sobre um eixo fixo.

Na figura seguinte está o desenho do *MAGENN AIR ROTOR SYSTEM*.



**Figura 17:** *MAGENN AIR ROTOR SYSTEM* [18]

O *MARS* é um balão cheio de hélio para se elevar até uma altitude de 300 metros onde vai ficar ancorado.

A captação do vento vai-se fazer pela parte exterior do balão, como se pode observar na Figura 17. Com a captação do vento efectuada pela parte exterior do *MARS*, vai fazer com que o balão rode, fazendo com que o gerador interno funcione. A electricidade gerada pelo *MARS* é transportada para o transformador que se encontra no solo por um cabo de cobre, e em seguida transferida para a rede de energia eléctrica. O balão dependendo das suas dimensões pode gerar potências de 10kW até alguns MW [19].

Como o *MARS* vai-se encontrar a uma altitude de 300 m superior á das turbinas convencionais que no máximo se encontram a 150 m [20]. Como o *MARS* se encontra a alturas superiores as das turbinas convencionais, este vai ter um funcionamento mais constante, devido a captação de ventos com velocidades mais elevadas e mais constantes.

O *MARS* tem as seguintes vantagens em comparação com as turbinas eólicas convencionais:

- Eficiência mais elevada;
- Mais mobilidade, podendo ser colocado mais perto das cargas;
- Produzem electricidade para velocidades do vento entre 2 m/s e 28 m/s;
- Não necessita de torres;
- Manutenção mais fácil, sendo efectuada no solo sempre que necessário.

Desvantagens do sistema *MARS* em relação as turbinas eólicas convencionais:

- Instabilidade a Flutuar;
- Deslocação da sua posição pretendida;
- Volume necessário para flutuar.

### 3.1.8 Estimativa da Energia Extraída pela Turbina Eólica.

A energia obtida pelas TE é a energia cinética extraída ao vento. Esta energia cinética pode ser calculada pela seguinte expressão [12]:

$$E_c = \frac{1}{2} \times \rho_{ar} \times V_{vent}^2 \quad (3.6)$$

Onde:

$E_c$  - energia cinética (J);

$\rho_{ar}$  - massa especificado ar 1,2 (Kg/m<sup>3</sup>);

$V_{vent}$  - é a velocidade do vento (m/s).

Então pode demonstrar-se que a potência disponível pelo vento, que passa por uma secção transversal ao fluxo de ar é dada por [12] :

$$P_V = \frac{1}{2} \times \rho_{ar} \times A_V \times V_{vent}^3 \quad (3.7)$$

Onde:

$P_V$  - potência média do vento (W)

$\rho_{ar}$  - massa especificado ar 1,2 (Kg/m<sup>3</sup>)

$A_V$  - área atravessada pelo vento (m<sup>2</sup>)

Quanto maior for a energia cinética extraída do vento pelas pás do rotor, menor será a velocidade do vento quando deixa a TE. Para extrair toda a energia disponível pelo vento, o ar teria que sair da turbina com uma velocidade nula, ou seja o ar não poderia abandonar a turbina. Assim sendo a TE não pode extrair toda a potência do vento.

A lei de *Betz* diz que independentemente da configuração das pás do rotor, só se pode converter no máximo 59,25% da energia cinética em energia mecânica ao utilizar uma TE [21]. Na Figura 18 é ilustrado o tubo de *Betz* onde a velocidade do vento  $V_1$  (antes de passar pelas pás do rotor) é maior que a velocidade do vento  $V_2$  (depois de passar as pás do rotor).



**Figura 18:** Tubo de Betz [13]

Assim para se calcular qual a potência mecânica disponível no veio da turbina é necessário acrescentar o coeficiente  $C_p$  à potência disponível pelo vento. Como são as pás que retiram a energia ao vento, a área de passagem do vento para o cálculo da potência mecânica disponível no veio da turbina pelo vento vai ser a área varrida pelas pás da turbina [22].

$$P_t = \frac{1}{2} \times \rho_{ar} \times C_p \times A_{tur} \times V_{vent}^3 \quad (3.8)$$

Onde:

$P_t$  - potência mecânica disponível pela turbina eólica (W)

$A_{tur}$  - área varrida pelas pás da turbina eólica ( $m^2$ )

$C_p$  - coeficiente de potência da TE.

O coeficiente de potência  $C_p$  é o rendimento efectivo da conversão numa TE, que depende da velocidade do vento e é dado por [22]:

$$C_p = \frac{P_t}{P_v} \quad (3.9)$$

Onde  $P_v$  potência disponível pelo vento e  $P_t$  é a potência mecânica disponível no veio da turbina eólica.

A estimativa da energia produzida durante um ano pode ser calculada pela seguinte expressão [22]:

$$E_a = 8760 \times \int_{V_{vento}}^{V_{vent}^{max}} f(V_{vent}) \times P_t(V_{vent}) \times d(V_{vent}) \quad (3.10)$$

Onde:

$E_a$  - é a energia anual produzida pela turbina (Wh);

8760 - é o numero de horas durante um ano;

$V_{vento}$  - é a velocidade mínima do vento para a qual a TE começa a produzir, ou seja, a velocidade *Cut-in* (m/s);

$V_{\text{vent max}}$  - é a velocidade máxima do vento admissível pela TE, ou seja a velocidade *cut-out* (m/s)

## 3.2 Mini-Hídrica

### 3.2.1 Introdução

Portugal depende muito de recursos energéticos importados, sobretudo de petróleo bruto, carvão e gás natural, que atinge cerca de 85% da energia primária que consome. Como Portugal não tem reservas de combustível fósseis, os recursos renováveis resumem-se basicamente a energia hídrica e eólica [23].

Os aproveitamentos hidroelétricos têm:

- Capacidade de armazenamento de energia;
- Uma elevada fiabilidade e disponibilidade;
- Uma grande flexibilidade de exploração,

Os aproveitamentos hídricos assumem assim uma importância relevante na exploração do sistema elétrico nacional.

Da União Europeia, Portugal é um dos países com um maior potencial hídrico por explorar como se pode observar na Figura 19.

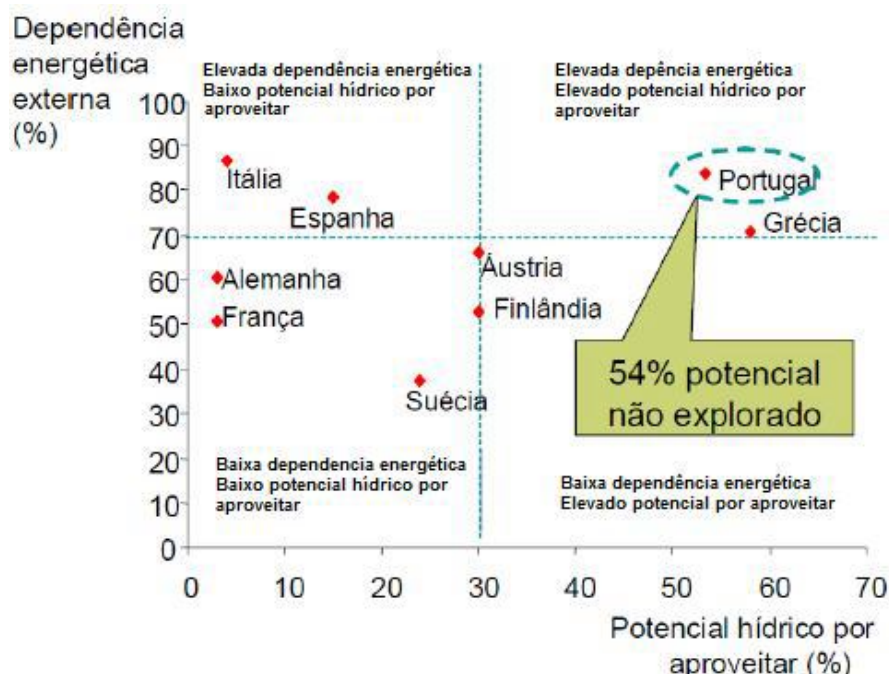


Figura 19: Potencial hídrico não aproveitar VS Dependência energética externa [24]

Na Figura 19 é possível verificar que a Alemanha e a França, são os países da Europa que melhor exploram os recursos hídricos. Portugal é o segundo país que pior aproveita os recursos hídricos existentes.

### 3.2.2 Classificação das Centrais Hidroeléctricas

#### 3.2.2.1 Potência

As Centrais hidroeléctricas podem ser designadas de pequenas centrais hidroeléctricas ou grandes centrais hidroeléctricas, consoante a sua potência instalada. As centrais com potência superior a 10 MW são chamadas de grandes centrais hidroeléctricas, as centrais com potência inferior ou igual a 10 MW designam-se por centrais mini-hídricas (CMH), classificadas na Tabela 3 sendo está a classificação recomendada pela União Internacional de Produtores e distribuidores de Energia Eléctrica (UNIPEDA).

**Tabela 3:** Classificação das CMH em relação a potência

<i>Designação</i>	<i>P<sub>instalada</sub> (MW)</i>
Pequena Central hidroeléctrica	< 10
Mini central hidroeléctrica	< 2
Micro central hidroeléctrica	< 0,5

#### 3.2.2.2 Queda

Um dos factores importantes das CMH é a altura da queda de água, pois esta altura está relacionada directamente com a quantidade de energia que pode ser aproveitada num recurso hidroeléctrico. A queda da água pode ser classificada em três categorias [25]:

**Tabela 4:** Classificação das centrais mini-hídricas quanto à altura de queda [25]

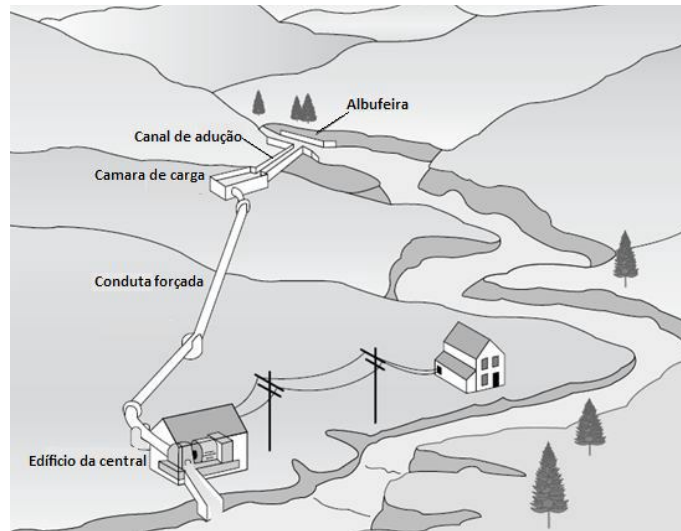
<i>Designação</i>	<i>H<sub>u</sub>(m)</i>
Queda Baixa	2-30
Queda Média	30-100
Queda Alta	>100

### 3.2.3 Composição de uma CMH

Segundo [26-27] uma CMH é constituída essencialmente por:

- Albufeira,
- Canal de adução,
- Câmara de carga,
- Conduto forçada,
- Edifício da central.

Na Figura 20 está ilustrado a constituição de uma CMH. Mas é de notar que os elementos referidos da constituição de uma CMH, são para centrais em regime de exploração a fio de água.



**Figura 20:** Constituição geral de uma CMH [27]

### 3.2.4 Turbinas Hidráulicas

O principal equipamento mecânico no edifício da central mini-hídrica é a turbina hidráulica (TH) [28]. A TH é responsável pela transformação de energia potencial e cinética associada à água, que de uma forma artificial se faz chegar à central, em energia mecânica de rotação.

A TH tem uma parcela muito significativa do custo de uma CMH, em geral pode chegar a 50% do investimento total, logo a sua selecção deve ser cuidadosa [26].

O tamanho da turbina é determinado essencialmente pela quantidade de água disponível, mas também é influenciado pela localização do rotor da turbina (emerso ou submerso) relativamente ao nível de água do aproveitamento.

Em função da queda útil, da quantidade de água disponível e da duração do caudal, é possível seleccionar a TH que melhor se adequa ao aproveitamento hidroeléctrico existente, (como se pode observar na Figura 24).

Existem vários tipos de turbinas hidráulicas, para satisfazerem os diferentes tipos de, alturas e caudais, podendo-se dividir em dois grandes grupos:

- Turbinas de acção
- Turbinas de reacção

As turbinas de acção utilizam a velocidade do fluxo de água para provocar o movimento de rotação nas turbinas. Este tipo de turbinas são utilizadas para locais onde haja altas quedas e pequenos caudais, tendo rendimentos na ordem dos 70% a 90% [29].

As turbinas *Pelton*, são turbinas de acção, constituídas por um disco circular, que leva montado na periferia uns copos ou conchas, nas quais vai incidir tangencialmente, um jacto de água, dirigido pelos injectores distribuídos uniformemente na periferia da roda, permitindo a conversão da energia cinética contida no jacto de água em energia mecânica de rotação.



**Figura 21:** Turbina *Pelton*[30]

As turbinas de reacção funcionam imersas em água, ou seja a diferença de pressão provocada pela água entre o interior e o exterior da turbina origina o seu movimento.

Normalmente este tipo de turbina é aplicado para baixas e médias quedas, com rendimentos inferiores ao das turbinas de acção.

As turbinas *Francis* e *Kaplan* são das turbinas de reacção as mais utilizadas.

As turbinas *Francis* caracterizam-se por terem uma roda formada por uma coroa de alhetas fixas, as quais constituem canais hidráulicos que recebem a água e a orientam para a saída do rotor numa direcção axial. Estas turbinas são adequadas para funcionarem em condições de queda e caudal médios.

As turbinas *Kaplan*, são turbinas adaptadas para quedas baixas e caudais elevados. Estas turbinas são reguladas a partir da acção do distribuidor e com a ajuda da variação do ângulo de ataque das pás do rotor, o que lhe permite uma grande variedade de regulação [28].

Nas figuras seguintes estão ilustradas a turbina *Francis* e *Kaplan*



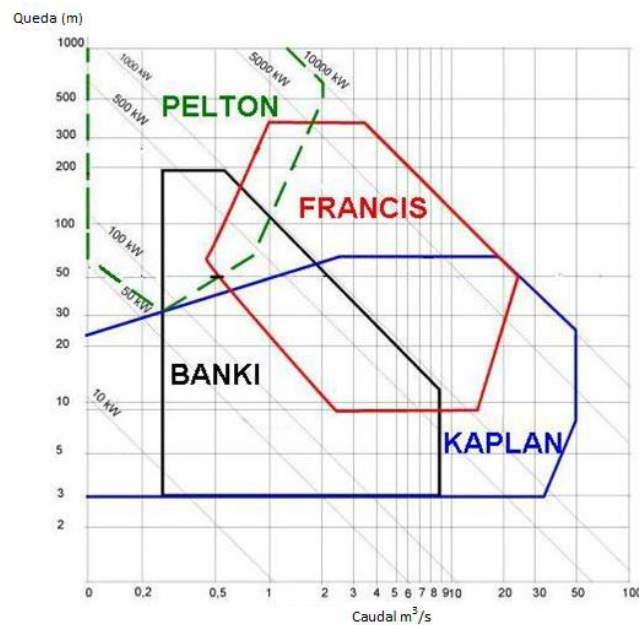
**Figura 22:** Turbina *Francis* [29]



**Figura 23:** Turbina *Kaplan* [31]

Existem já diagramas dados pelos fabricantes, onde se pode ver um resumo do que foi exposto anteriormente sobre turbinas hidráulicas, estes diagramas mostram quais as turbinas

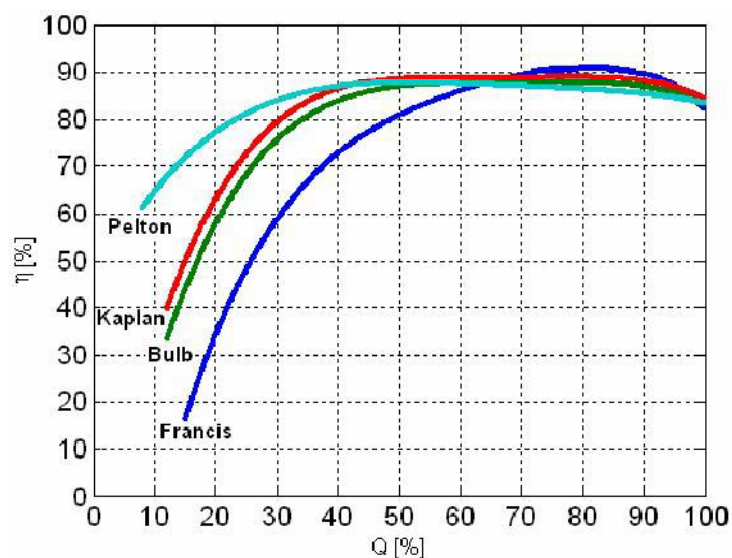
que se devem utilizar para diferentes valores de quedas e de caudais, como se pode observar na seguinte figura.



**Figura 24:** Tipo de turbina em função da queda e do caudal [29]

As turbinas *Pelton* são usadas para quedas mais elevadas e caudais mais baixos, as turbinas *Kaplan* para caudais elevados e quedas baixas, e as turbinas *Francis* para caudais e quedas intermédias.

Na Figura 25 pode ver-se os rendimentos das várias turbinas em função do seu caudal nominal.



**Figura 25:** Rendimento das turbinas em função da percentagem do caudal nominal [32]

Como se pode observar pela Figura 25, as turbinas hidráulicas têm rendimentos elevados quando funcionam para caudais nominais. Quando o caudal aumenta ou diminui em relação ao caudal nominal, o rendimento da turbina baixa. Pode ver-se que as turbinas

*Kaplan* trabalham eficazmente a partir dos 40% do caudal nominal, e as turbinas *Francis* são as que necessitam de um caudal mais próximo do nominal para terem um rendimento mais próximo do rendimento máximo.

### 3.2.5 Equipamento Eléctrico.

Existem vários equipamentos eléctricos na casa da central, mas o mais importante é o gerador eléctrico.

O gerador eléctrico está acoplado ao veio da TH, e tem a função de converter a energia de mecânica de rotação em energia eléctrica. No passado utilizavam-se geradores de corrente contínua, mas actualmente utilizam-se geradores de corrente alternada. Podem-se escolher dois tipos de geradores:

- Gerador Síncrono
- Gerador Assíncrono (ou gerador de indução)

A selecção dos geradores a acoplar na TH depende das características das turbinas, nomeadamente do valor da velocidade nominal, da constante de inércia, do tipo de regulação e do rendimento.

Os geradores assíncronos têm as seguintes vantagens em comparação com os geradores síncronos [33]:

- São uma máquina robusta e de pouca manutenção;
- Possui um sistema de controlo básico, visto ter um funcionamento simples;
- Tem um baixo custo de manutenção e de instalação;
- A sincronização com a rede é automática;

As suas desvantagens comparativamente aos geradores síncronos são [33]:

- Não consegue produzir energia reactiva para a rede, precisando de consumir a energia reactiva para o estabelecimento do campo magnético;
- Não é possível controlar a amplitude da força electromotriz gerada, sem alterar a velocidade de accionamento.

Segundo [34], no caso de geradores assíncronos ligados a rede de média ou tensão superior, a potência de cada gerador assíncrono não pode ser superior 5 MVA.

Existe um sistema de baterias ligado ao gerador de indução, para poderem armazenar o excesso de energia nas horas de vazio, e compensar a falta de energia nas horas de ponta [35].

### 3.2.6 Energia Extraível por uma CMH

Para saber se é rentável a construção de uma CMH num determinado local, é necessário saber qual a Energia eléctrica que se pode extrair do caudal existente do rio.

No cálculo da energia eléctrica é necessário calcular em primeiro lugar a potência. Para calcular qual a potência que uma CMH pode extrair de uma massa de água, é necessário saber qual a potência disponível dessa massa de água.

Assim a potência disponível que se pode obter de uma massa de água é dada por [26]:

$$P_{\text{água}} = \rho_{\text{ag}} \times g \times Q_{\text{med}} \times H_q \quad (3.11)$$

Onde:

$P_{\text{água}}$  - Potência disponível pela água (W);  
 $\rho_{\text{ag}}$  - massa especificada água 1000 (kg/m<sup>3</sup>);  
 $Q_{\text{med}}$  - caudal médio anual da água (m<sup>3</sup>/s);  
 $H_q$  - Altura da queda de água (m);  
 $g$  - aceleração da gravidade 9,81 (m/s<sup>2</sup>).

O cálculo da potência eléctrica extraível de um curso de água, reporta-nos ao uso dos diferentes tipos de rendimento (rendimento da turbina e rendimento do gerador). O rendimento da TH relaciona-se com a transformação da energia cinética da água em energia de rotação, e o rendimento do gerador relaciona-se com a conversão da energia de rotação da turbina em energia eléctrica. Assim para calcular a potência a instalar nos equipamentos (potência extraível da água) têm que se relacionar os rendimentos da TH e do gerador [26].

$$P_{\text{eq}} = 9,81 \times \eta_{\text{TH}} \times \eta_{\text{G}} \times Q_{\text{med}} \times H_q \quad (3.12)$$

Onde:

$P_{\text{eq}}$  - Potência a instalar nos equipamentos (kW);  
 $\eta_{\text{G}}$  - rendimento do gerador (%);  
 $\eta_{\text{TH}}$  - rendimento da turbina hidráulica (%);

O rendimento do sistema nas CMH está compreendido entre 60% a 80% [36].

O caudal é a variável que mais influencia a potência extraível de uma CMH, porque é a que sofre uma maior variação ao longo do tempo.

Segundo [37] pode determinar-se o caudal fluente num rio a partir da pluviosidade e da área da bacia, com a seguinte expressão:

$$Q_{\text{med}} = \text{Pluv} \times \frac{A_b}{31536000} \quad (3.13)$$

Onde:

Pluv - pluviosidade que atinge uma região durante um ano (m/ano)  
 $A_b$  - Área da bacia (m<sup>2</sup>)  
 31536000 - é o numero de segundos num ano.

Existem várias designações para o caudal de um determinado curso de água.

Chama-se:

- Caudal modular ao caudal médio anual durante vários anos.
- Caudal ecológico ao caudal que terá de ser mantido num curso de água sem ser turbinável, devido a razões ambientais e ecológicas
- Caudal instalado ou caudal máximo turbinável, é o caudal garantido durante 20% a 30% do ano. É este caudal que é usado para dimensionar os equipamentos a

implementar numa CMH. Normalmente costuma ser superior ao caudal modular (que é o caudal garantido durante 15% a 20% do ano) [38].

Por fim a energia anual produzida por uma CMH pode calcular-se pela seguinte expressão [26]:

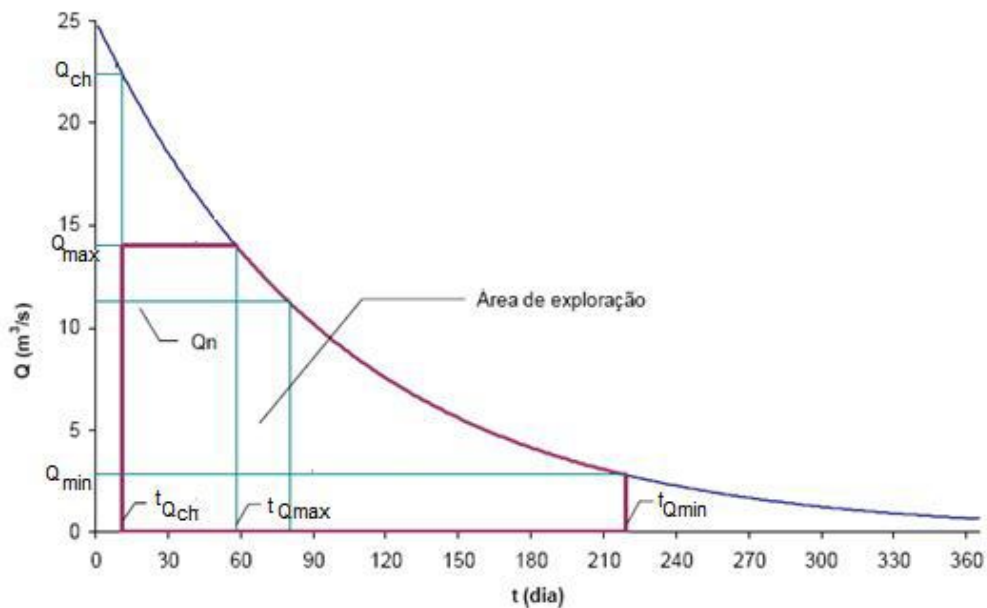
$$E_{aCMH} = \sum_{t_{fCMH}} 9,81 \times \eta_G \times \eta_{TH} \times Q_{med} \times H \quad (3.14)$$

Onde:

$E_{aCMH}$  - é a energia anual produzida pela CMH (kWh);

$t_{fCMH}$  - é o tempo de funcionamento da CMH durante um ano (h)

O caudal não é constante ao longo do tempo, podendo ser caracterizado pela curva de duração dos caudais. O tempo de funcionamento da turbina é dado a partir da curva de duração de caudais. Esse tempo vai ser o tempo entre o caudal de cheias ( $Q_{ch}$ ) e o caudal mínimo ( $Q_{min}$ ) turbinável pela turbina.



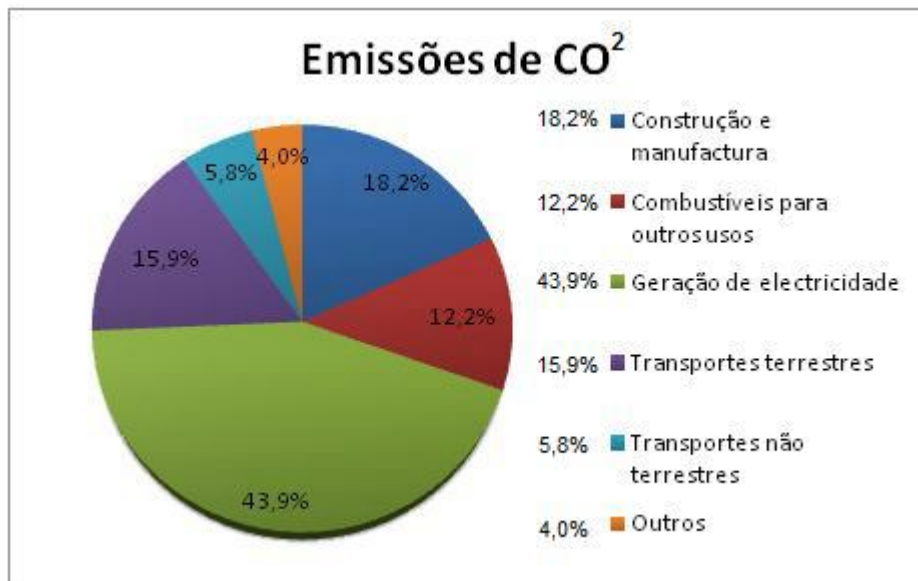
**Figura 26:** Curva duração de caudais [38]

Na Figura 26 está ilustrada a curva de duração de caudais, onde está representada a roxo a área onde a turbina hidráulica se encontra a funcionar.

## 3.3 Recuperação de Energia nos Transportes

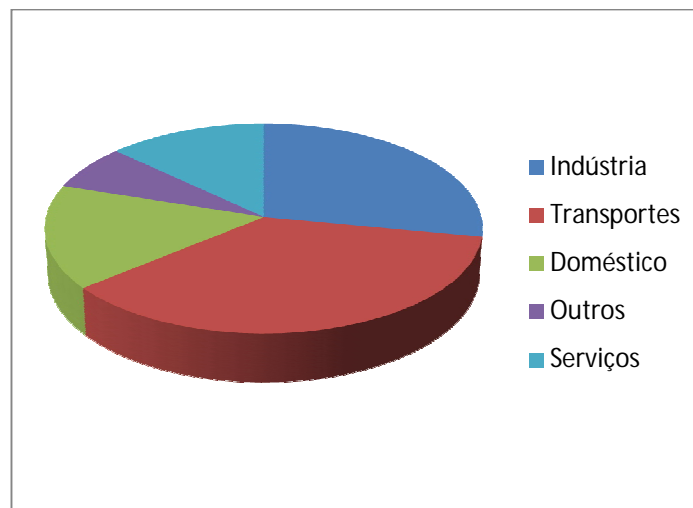
### 3.3.1 Introdução

Os problemas relacionados com as emissões de poluentes e com o consumo energético é uma das maiores preocupações a nível mundial. O sector dos transportes é um dos grandes emissores de CO<sub>2</sub>, sendo responsável por aproximadamente 22% das emissões totais de CO<sub>2</sub>, como se pode ver na Figura 27.



**Figura 27:** Emissões Globais de CO<sub>2</sub> (adaptado de [39])

Esses gases são provenientes da combustão no processo da produção de energia. Como se ilustra a Figura 28, o sector dos transportes é o que têm um maior consumo de energia.



**Figura 28:** Consumo de Energia final por Sector (adaptado de [40])

Dentro do sector dos transportes, aquele que mais polui é o terrestre. Uma das formas de minimizar a poluição provocada pelos transportes, é minimizando o consumo<sup>2</sup>. Com a recuperação de energia pode obter-se consumos mais baixos, e assim minimizar a poluição provocada pelos transportes.

Há várias maneiras de recuperação de energia, uma delas é a frenagem regenerativa.

### **3.3.2 Frenagem Regenerativa**

A frenagem regenerativa é uma travagem que converte a energia cinética retirada ao veículo durante a travagem e converte em energia eléctrica. Para fazer essa conversão de energia cinética em energia eléctrica, é utilizado um gerador.

Assim sempre que um veículo trave pode aplicar-se a frenagem regenerativa aumentando a sua eficiência energética.

Segundo [41] em áreas urbanas típicas, a energia recuperada na travagem pode chegar a mais de 34% da energia absorvida em tracção.

Normalmente a frenagem regenerativa é aplicada em veículos eléctricos, os quais são dotados de motores/geradores. A energia recuperada na frenagem regenerativa, é armazenada para posteriormente ser utilizada na aceleração do veículo, e assim aumentar a eficiência e a autonomia do mesmo.

A energia recuperada pela frenagem regenerativa depende da [42]:

- Capacidade e eficiência do motor/gerador, que funciona como gerador durante a desaceleração e como motor durante a aceleração do veículo;
- Capacidade e eficiência do circuito de controlo de potência;
- Armazenamento de energia.

Com a utilização exclusiva de baterias não é possível recuperar toda a energia resultante da frenagem regenerativa, porque esta tem uma limitação na potência máxima de carga. Como tal adicionando um banco de supercondensadores ultrapassa-se o problema anterior recuperando-se assim mais energia através da frenagem regenerativa.

#### **3.3.2.1 Estimativa da Energia Recuperada Proveniente da Frenagem Regenerativa**

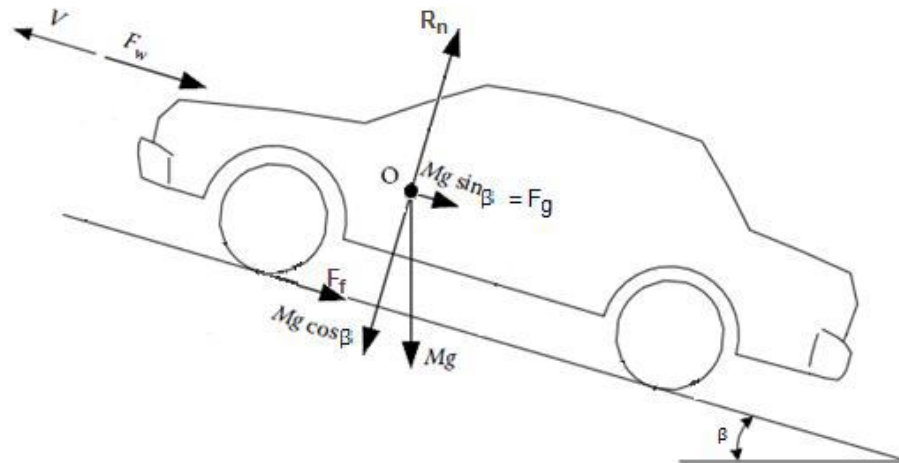
Para ser possível estimar o valor da energia recuperada pela frenagem regenerativa, é necessário em primeiro lugar dimensionar o motor/gerador para o veículo eléctrico.

Para dimensionar o motor eléctrico a colocar num veículo tem que se identificar quais as forças que estão aplicadas a esse veículo.

Na figura seguinte é possível observar as forças que estão aplicadas a um veículo.

---

<sup>2</sup> Quanto menor for a combustão, menor é a emissão dos gases poluentes, para o mesmo sistema.



**Figura 29:** Forças aplicadas a um veículo (adaptado de [43])

O motor eléctrico para que possa movimentar o veículo tem que ter uma força superior ao somatório da:

- Força de arrasto do vento
- Força de atrito
- Força resistente

A força de arrasto devido ao vento, é a força que a velocidade do vento, exerce sobre o veículo, contrária ao movimento. Essa força pode ser calculada pela seguinte expressão [43]:

$$F_w = \frac{1}{2} \times \rho_{ar} \times A_{frt} \times C_D \times V_{vent}^2 \quad (3.15)$$

Onde:

$F_w$  - força de arrasto do vento (N);


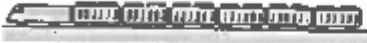





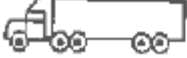
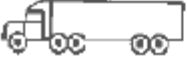
$\rho_{ar}$  - massa especificado ar 1,2 (kg/m<sup>3</sup>);

$A_{frt}$  - é a área frontal onde vai embater o vento (m<sup>2</sup>);

$C_D$  - é o coeficiente de arrasto;

$V_{vent}$  - é a velocidade do vento (m/s).

Na figura seguinte pode verificar-se o valor do coeficiente de arrasto para algumas configurações de veículos:

Corpo	Area de referência	$C_D$
	Area frontal	1,4
	Area frontal	1,8
Bicicleta		
	Area frontal	1,1
	Area frontal	0,88
	Area frontal	0,5
	Area frontal	0,12
	Area frontal	0,96
	Area frontal	0,76
	Area frontal	0,7

**Figura 30:** Valores de coeficiente de arrasto para alguns objectos (adaptado de[44])

A força de atrito pode ser calculada pela seguinte expressão [43]:

$$F_f = -f_r \times R_n \quad (3.16)$$

Onde:

$F_f$  - é a força de atrito (N);

$f_r$  - é o coeficiente de atrito;

$R_n$  - é a reacção normal (N).

Como [43]:

$$R_n = -M \times g \times \cos(\beta) \quad (3.17)$$

Onde:

$M$  - é a massa do veículo (kg);

$g$  - é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );  
 $\beta$  - é o ângulo de inclinação do plano (graus).

Substituindo a equação 3.17 na equação 3.16 obtêm-se:

$$F_f = f_r \times M \times g \times \cos(\beta) \quad (3.18)$$

A força resistente é dada pela seguinte expressão [43]:

$$F_g = M \times g \times \sin(\beta) \quad (3.19)$$

Onde  $F_g$  representa a força resistente (N).

A força necessária para um veículo se movimentar a uma determinada aceleração é:

$$F_{\text{mov}} = M \times a \quad (3.20)$$

Onde:

$F_{\text{mov}}$  - é a força do movimento, ou força da aceleração (N);

$a$  - é a aceleração do veículo ( $m/s^2$ ).

Para o veículo se mover, a força do motor terá que ser igual as forças aplicadas ao corpo do veículo, mais a força de aceleração pretendida no veículo como mostra a equação seguinte [43]:

$$F_{\text{motor}} = M \times a + F_w + F_f + F_g \quad (3.21)$$

Onde  $F_{\text{motor}}$  é a força do motor (N).

Segundo [43] a potência necessária para deslocar um veículo é dada por:

$$P_e = \frac{V_{\text{veic}}}{\eta_t} \times (F_f + F_w + F_g + M \times a) \quad (3.22)$$

Onde:

$P_e$  é a potência que o motor necessita para movimentar um veículo (W);

$V_{\text{veic}}$  é a velocidade do veículo (m/s);

$\eta_t$  é o rendimento da transmissão da força do motor para a roda (%).

Assim a potência que um motor eléctrico necessita para fazer movimentar um veículo com uma aceleração  $a$  numa subida com uma inclinação  $\beta$  é:

$$P_{\text{motor}} = \frac{V_{\text{veic}}}{\eta_t} \times \left( f_r \times M \times g \times \cos(\beta) + \frac{1}{2} \times \rho \times A \times C_D \times V_{\text{vent}}^2 + M \times g \times \sin(\beta) + M \times a \right) \quad (3.23)$$

Para calcular a potência que se pode recuperar na travagem regenerativa é necessário conhecer a eficiência do:

- Gerador
- Circuito de controlo
- Armazenamento de energia (ex: bateria)

O valor da potência adquirida na frenagem regenerativa ( $P_{reg}$ ) é expressa por [45]:

$$P_{reg} = \eta_{reg} \times M \times a \times V_{veic} \quad (3.24)$$

Onde  $\eta_{reg}$  é o rendimento da travagem regenerativa dado por:

$$\eta_{reg} = \eta_G \times \eta_{cont} \times \eta_{arm} \quad (3.25)$$

Sendo:

$\eta_{reg}$  - representa o rendimento da travagem regenerativa (%);

$\eta_G$  - representa o rendimento do gerador (%);

$\eta_{cont}$  - representa o rendimento de circuito de controlo(%);

$\eta_{arm}$  - representa o rendimento do sistema de armazenamento de energia (%).

Assim a energia recuperada durante um percurso vai ser:

$$E_{rec} = \int P_{reg} \times dt_{reg} \quad (3.26)$$

Onde:

$E_{rec}$  - é a energia recuperada durante o percurso (Wh);

Pode também calcular-se a energia gasta pelo motor num percurso:

$$E_{motor} = \int P_{motor} \times dt_{motor} \quad (3.27)$$

Sendo  $E_{motor}$  a energia gasta pelo motor (Wh).

### 3.3.2.2 Motor/Gerador

O motor/gerador é o equipamento fundamental de um veículo eléctrico, visto ser este componente que produz a força necessária para o veículo se movimentar, podendo na travagem recuperar energia.

Um motor eléctrico com função tracção deverá de ter os seguintes requisitos [46] [47]:

- Grande fiabilidade;
- Baixo custo;
- Estrutura simples e compacta;
- Elevada potência instantânea;
- Baixa velocidade para o arranque;

- Suportar todas condições adversas de funcionamento em estrada e caminhos tal como poeiras, humidade, elevadas temperaturas;
- Operar com velocidades variáveis,
- Binário elevado para velocidades baixas para que possa arrancar em subidas.

Quando o veículo necessita de tracção para se movimentar, isto é, necessita de uma força para poder vencer as forças de, atrito, resistiva e de arrasto do vento, o motor/gerador funciona como motor para desenvolver a potência necessária para que o veículo se possa movimentar. O motor fornece a força às rodas a partir de uma transmissão, que normalmente tem um rendimento elevado, na ordem dos 90% [43].

Quando o gerador do motor/gerador funciona, isto quer dizer que se está a efectuar uma travagem. O gerador vai ter a função de aplicar uma força oposta ao movimento do veículo, que vai fazer com que esse veículo diminua ou mantenha a velocidade. Essa força aplicada ao veículo ao longo do tempo, é a energia que se vai recuperar e armazenar. O rendimento do motor/gerador usualmente ronda os 85% para potências na ordem do kW [43].

### 3.3.2.3 Armazenamento de Energia

O armazenamento da energia da frenagem regenerativa em transportes pode ser efectuado em baterias ou em supercondensadores.

As baterias são dispositivos electroquímicos, com o objectivo de armazenar energia química para posteriormente a converter em energia eléctrica. Estas quando estão a carregar recebem energia eléctrica e convertem em energia química, e quando estão a descarregar, ou seja, a alimentar uma carga neste caso o motor eléctrico, as baterias convertem a energia química em energia eléctrica. O seu grande inconveniente é a sua corrente de carga estar muito limitada[45].

As baterias para aplicar nos veículos eléctricos devem ter [48]:

- Uma energia específica (Wh/kg) elevada, ou seja grande capacidade de armazenamento e leve;
- Elevada densidade de energia (Wh/m<sup>3</sup>), isto é, deve ter uma grande capacidade de armazenamento relativamente ao seu tamanho,
- Baixo tempo de recarga,
- Potência específica elevada (W/kg) ou seja uma grande potência para o seu peso;
- Um ciclo de vida longo com a capacidade de se poder carregar e descarregar muitas vezes sem perda de eficiência.

Devido às limitações das baterias, os supercondensadores são usados para o armazenamento de energia, e também se utilizam para complementarem as baterias quando o motor necessita de maior corrente, contribuindo assim para uma maior vida das baterias.

Os supercondensadores (SCs) comparados com as baterias têm um ciclo de vida maior, são mais eficientes na carga e na descarga, mas tem um baixo valor de energia específica (Wh/kg) o que comparado com as baterias traduz-se num maior volume.

Os SCs são adequados para aplicações que envolvem uma alta potência de pico, com curta duração [49]. Estes podem ter uma eficiência superior a 95% [50], e como envolvem uma alta potência de pico tanto na descarga como na carga, torna-os indicados para aplicar

no armazenamento da recuperação de energia, e a complementação da alimentação dos motores eléctricos [49].

# Capítulo 4

## Pré-projecto de um “FIWinG”

### 4.1 Introdução

Um dos objectivos desta dissertação é efectuar um pré-projecto de sistemas de conversão de energia baseados em novas tecnologias, para se poderem aplicar no Parque de Energia (PE).

No local onde vai ser implementado o Parque de Energia existem escassos recursos eólicos. Assim neste capítulo será efectuando um dimensionamento e uma estimativa da energia anual produzida por uma inovadora tecnologia. Esta nova tecnologia foi uma ideia criada nesta dissertação, a qual vai ser adequada para locais onde a velocidade média do vento seja baixa.

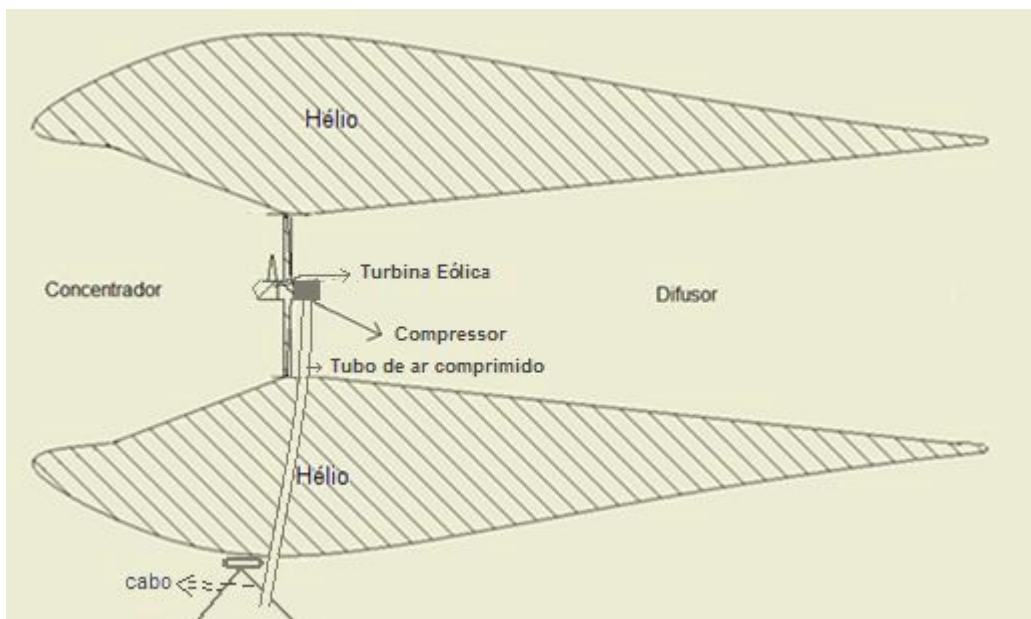
Neste capítulo foi dimensionada os principais componentes desta nova tecnologia da qual se denomino de FIWinG (*Floating Wind Generator*).

Os principais componentes do FIWinG dimensionados neste capítulo são o concentrador, o difusor, a turbina eólica, o compressor de ar e o volume de hélio que vai ser necessário para elevar o FIWinG.

Com esta nova tecnologia, obtêm-se um aumento da velocidade do vento devido a um concentrador, e pela alteração da altura do FIWinG.

Este FIWinG vai ser constituído por um balão de hélio para que possa flutuar. A força de arrasto provocado pelo vento vai alterar a posição do FIWinG, este será dotado de duas assas, as quais vão ter a função de estabilização e dar impulsão ao FIWinG para que se mantenha a altura desejada.

Na figura seguinte está ilustrada os principais componentes do *Floating Wind Generator*.



**Figura 31:** Constituição geral do FIWinG

Um dos conceitos importantes do FIWinG é a minimização do peso. Para tal foi colocado um concentrador o qual vai ter uma área de entrada grande e uma área de saída mais pequena, essa diferença entre as áreas vai originar o aumento da velocidade do vento, e também que a turbina eólica aplicada na saída do concentrador tenha uma dimensão mais pequena logo um peso menor.

A turbina eólica a ser implementada vai ser constituída por duas pás, sendo este o tipo de turbina que melhor se adapta a velocidades do vento mais elevadas como podemos observar na Figura 7.

No final deste capítulo é efectuada uma comparação entre a energia produzida pelo FIWinG e a energia produzida por um aerogerador comum.

O FIWinG ficará recolhido na casa do vento quando for necessário (para manutenção ou quando as condições meteorológicas não permitirem o seu funcionamento).

## 4.2 Dimensionamento do Concentrador e do Difusor

Como a velocidade do vento na região onde se vai situar o PE tem velocidades médias de vento de 2,3 m/s [15], será uma boa opção colocar no FIWinG um concentrador antes da TE. Esse concentrador terá a função de aumentar a velocidade do vento para valores mais elevados onde se possam ter melhores rendimentos da turbina eólica. O difusor é colocado a seguir à turbina com o objectivo de diminuir a velocidade do vento, para que saia do FIWinG a uma velocidade próxima da velocidade do vento no exterior, diminuindo assim as perdas devido a turbulência que são provocadas pelo contacto de ventos a diferentes velocidades.

### 4.2.1 Concentrador

Como já descrito no capítulo 3 nomeadamente em 3.1.5 os concentradores não levantam muitos problemas quanto ao ângulo de abertura, isto porque o vento se concentra em volta das paredes do concentrador. A melhor qualidade de vento verifica-se para ângulos

de abertura de 40° a 50° [51]. O ângulo escolhido para o concentrador está relacionado com o volume de hélio necessário para elevar o FIWinG. O ângulo de abertura do difusor vai ser de 42°, no subcapítulo 4.3.1.2 é explicado o porque de o ângulo de abertura do concentrador ser de 42°.

A potência a seleccionar para a turbina eólica a implementar no FIWinG deverá de ser pequena (ordem de unidades de kW), para não ser muito pesada. Assim foi escolhido uma turbina eólica com uma potência de 3,2 kW, a qual tem um diâmetro das pás aproximadamente de 3 m [52].

Os rendimentos dos concentradores situam-se entre os 90 a 99% [53]. Considerou-se o pior caso para o rendimento do concentrador, tendo-se assim seleccionado um rendimento de 90%.

Adoptou-se um diâmetro de entrada de 6 m para poder se obter uma concentração de 3,6, sendo esta a concentração que se pretende visto a velocidade média do vento no local de implementação do Parque e para que o FIWinG não tivesse uma dimensão muito maior do que a que se obteve no subcapítulo 4.3.1.2. O diâmetro de saída do concentrador deve ser igual ao da turbina eólica logo de 3 m. A equação 3.5 relaciona as áreas de entrada e saída e as suas respectivas velocidades, contudo foi colocado o rendimento do difusor, para contabilizar-se as suas perdas.

$$A_{entc} \times V_{vent\ entc} \times \eta_{con} = A_{saidc} \times V_{vent\ saidc} \quad (4.1)$$

Onde:

$A_{entc}$  - é a área de entrada do concentrador ( $m^2$ );

$V_{vent\ entc}$  - é a velocidade do vento na entrada do concentrador (m/s);

$\eta_{con}$  - é o rendimento do concentrador (%);

$A_{saidc}$  - é a área de saída do concentrador ( $m^2$ );

$V_{vent\ saidc}$  - é a velocidade do vento na saída do concentrador (m/s).

Sendo:

$$A_{entc} = \frac{\pi \times d_{con}^2}{4} \quad (4.2)$$

Onde  $d_{con}$  - diâmetro do concentrador (m)

A velocidade do vento à saída do concentrador pode ser calculada pela expressão seguinte, visto ser ter adoptado uma concentração de 3,6:

$$V_{vent\ said} = 3,6 \times V_{vent\ ent} \quad (4.3)$$

Assim a velocidade resultante da concentração vai ser de 3,6 vezes a velocidade de entrada.

## 4.2.2 Difusor

Como já referido no ponto 3.1.6 do capítulo 3, para o dimensionamento do difusor vai ser necessário ter em conta o ângulo de abertura, para que não haja separação da camada limite. Segundo [17] para ângulos totais de abertura até 15° não existe separação da camada limite. O ângulo de abertura para o difusor vai ser de 12°. A escolha deste ângulo encontra-se explicado no subcapítulo 4.3.1.2.

Os difusores têm rendimentos que variam entre 90% e os 99% [53].

Para o dimensionamento do difusor, a área de entrada do difusor será igual a área de saída do concentrador, como se pode ver na figura seguinte.

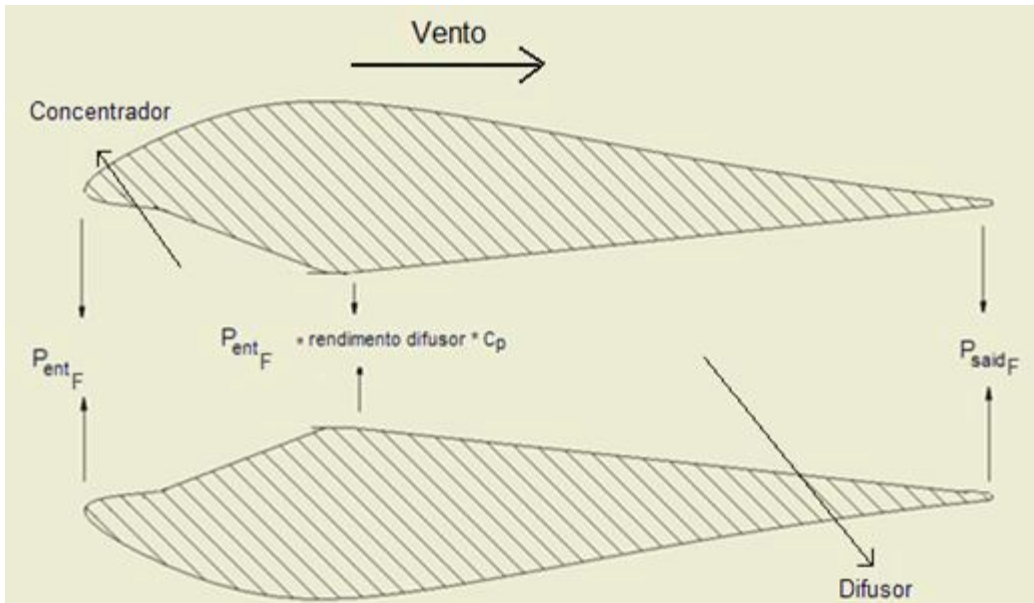


Figura 32: Potência em cada local do FIWinG

É necessário calcular a área de saída do difusor necessária para que a velocidade do vento na saída do FIWinG, seja igual à velocidade do vento no exterior, para tal pode usar-se a relação entre as potências dentro do FIWinG. Assim pela Figura 32 pode retirar-se:

$$P_{said\ f} = (P_{ent\ f} - P_{ent\ f} \times \eta_{con} \times C_p) \times \eta_{dif} \quad (4.4)$$

Onde:

$P_{said\ f}$  - é a potência do vento na saída do FIWinG (W);

$P_{ent\ f}$  - é a potência do vento na entrada do FIWinG (W);

$\eta_{dif}$  - é o rendimento do difusor (%).

$P_{ent\ f} \times \eta_{con} \times C_p$  é a potência mecânica disponível pela TE, ou seja a potência que a TE retira ao vento.

Substituindo a equação 3.7 na equação 4.4 obtêm-se:

$$\frac{1}{2} \times \rho_{ar} \times A_{said\ dif} \times V_{vent\ enf}^3 = \left( \frac{1}{2} \times \rho_{ar} \times A_{ent\ f} \times V_{vent\ f}^3 - P_t \right) \times \eta_{dif} \quad (4.5)$$

Onde:

$A_{said\ dif}$  - é a área de saída do difusor (m<sup>2</sup>);

$V_{\text{vent entf}}$  - é a velocidade do vento na entrada do FIWinG (m/s);

$A_{\text{entf}}$  - é a área da entrada do FIWinG (m<sup>2</sup>);

Como o objectivo é que a velocidade do vento na entrada do FIWinG seja igual à velocidade na saída do FIWinG, então  $V_{\text{vent entf}}$  tem o mesmo valor que  $V_{\text{ventf}}$ .

Da equação 4.5 para as várias velocidades do vento a entrada do FIWinG compreendidas entre 0,3 m/s e 7 m/s (visto ser estas as velocidades que correspondem a velocidades de vento na turbina eólica entre os 1 m/s e os 25 m/s, sendo que as turbinas hidráulicas funcionam entre esta gama de velocidades de vento[13]) obteve-se um diâmetro de saída com o valor de 5,7 m.

## 4.3 Dimensionamento Aerodinâmico do FIWinG

O dimensionamento aerodinâmico consiste em dimensionar o tamanho do FIWinG (para que possa ter o volume de hélio necessário para o colocar o FIWinG a flutuar e que dê alguma sustentabilidade ao sistema, isto é, ter uma impulsão extra para contrariar a força de arrasto), seleccionar a forma do FIWinG (minimizar a força de arrasto), dimensionar os estabilizadores (asas, para dar mais sustentabilidade e estabilidade ao FIWinG).

Assim o dimensionamento aerodinâmico é essencial para que o FIWinG possa flutuar e manter-se à altura desejada.

### 4.3.1 Força de Arrasto

A força de arrasto deve ser minimizada, para isso, têm que se tentar minimizar o coeficiente de arrasto, a área frontal onde vai embater o vento e a velocidade do vento na entrada do FIWinG (tendo sempre em conta que a velocidade do vento na turbina eólica deve estar o mais próximo de 16 m/s (velocidade onde a turbina eólica tem o maior rendimento [13] para que a turbina esteja a funcionar com o seu rendimento máximo)).

#### 4.3.1.1 Selecção do Coeficiente de Arrasto

O coeficiente de arrasto pode ser diminuído em função da forma do corpo. Na Figura 33 é possível verificar vários valores de coeficientes de arrasto para diferentes formas.





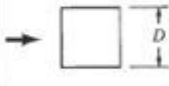
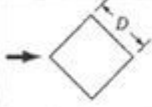
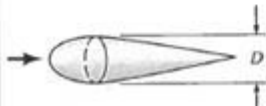
Corpo	Area de referência	Coefficiente de arrasto	Numero de Reynolds										
	$A = \frac{\pi}{4} D^2$	→ 1.17 ← 0.42	$Re > 10^4$										
	$A = \frac{\pi}{4} D^2$	→ 1.42 ← 0.38	$Re > 10^4$										
	$A = \frac{\pi}{4} D^2$	1.1	$Re > 10^3$										
	$A = \frac{\pi}{4} D^2$	<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>\theta</math>, degrees</th> <th><math>C_D</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10</td> <td>0.30</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>0.55</td> </tr> <tr> <td>60</td> <td>0.80</td> </tr> <tr> <td>90</td> <td>1.15</td> </tr> </tbody> </table>	$\theta$ , degrees	$C_D$	10	0.30	30	0.55	60	0.80	90	1.15	$Re > 10^4$
$\theta$ , degrees	$C_D$												
10	0.30												
30	0.55												
60	0.80												
90	1.15												
	$A = D^2$	1.05	$Re > 10^4$										
	$A = D^2$	0.80	$Re > 10^4$										
	$A = \frac{\pi}{4} D^2$	0.04	$Re > 10^5$										

Figura 33: Coeficiente de arrasto para varias formas de objecto (adaptado de [44])

Assim como se pode verificar na Figura 33 a forma que tem um menor coeficiente de arrasto, é a forma de um Zeppelin (ultima forma), o qual tem um coeficiente de arrasto de 0,04, sendo esta a forma adoptada para o FIWinG.

### 4.3.1.2 Cálculo da Área Frontal

A área frontal está relacionada com a área de entrada do concentrador (que se considerou ser de 6 m) e com o volume de hélio necessário para colocar o FIWinG a flutuar. O volume de hélio vai estar directamente relacionado com o peso da estrutura do FIWinG e da impulsão pretendida para que o FIWinG possa flutuar e subir.

Para o cálculo do peso total da estrutura do FIWinG é necessário saber o peso de cada componente.

Dimensiona-se o diâmetro do tubo para ser possível saber qual o seu peso.

No cálculo do diâmetro do tubo para o transporte de ar comprimido usa-se a seguinte expressão [44].

$$Q_{ar} = A_{tb} \times V_{tb} \quad (4.6)$$

Onde:

$Q_{ar}$  - é o caudal do ar comprimido ( $m^3/s$ );

$A_{tb}$  - é a área do tubo ( $m^2$ );

$V_{tb}$  - é a velocidade do ar dentro do tubo ( $m/s$ ).

Sendo [54]:

$$P_{comp} = Q_a \times P_{re} \quad (4.7)$$

Onde:

$P_{comp}$  - a potência do compressor (W);

$P_{re}$  - a pressão do ar ( $N/m^2$ ).

Com a potência de 3,2 kW para o compressor e assumindo uma pressão de 800  $kN/m^2$  (8 bar, assumiu-se este valor porque é a pressão que se encontra no mercado para compressores com potência de 3,2 kW), obteve-se um caudal de ar de 0,0025  $m^3/s$ .

Considerando-se a velocidade do ar no interior do tubo é de 5  $m/s$  (sendo esta normalmente utilizada para este cálculo) obtêm-se um tubo com um diâmetro de 25 mm, sendo que o diâmetro que existe no mercado logo a seguir é de 40 mm, sendo este diâmetro (40mm) o utilizado para os cálculos.

**Tabela 5:** Peso dos componentes que constituem o FIWinG

<b>Componentes do FIWinG</b>	<b>Peso (kg)</b>
Turbina eólica [51]	4
Compressor de ar	1,5
Tubo que transporta o ar Comprimido (100 m) [54]	60
Cabo responsável por prender o FIWinG (100 m) [55]	1,4
Tecido que constitui o FIWinG (770) [56]	269,5
Estrutura onde vai ser fixo o tecido e a TE	100
Peso Total	436,4

O peso do compressor foi estimado, isto porque nos catálogos a especificação do peso, é dada em conjunto com toda a estrutura (armadura, motor, etc).

O tecido para construir um balão de hélio segundo [55] deverá ser de PVC ou Poliuretano. Neste caso irá ser o poliuretano porque é mais leve a sua área vai ser calculada posteriormente.

Foram efectuados dois testes no Autodesk Inventor Professional 2010 para uma estrutura de 20 kg e para uma estrutura de 60 kg, ambas não suportaram a suposta pressão efectuada pelo vento, assumiu-se assim que a estrutura onde vai ser fixo o tecido do FIWinG necessita de pesar 100 kg. Não foi possível efectuar mais testes devido ao tempo que cada

um demora, cerca de 4 horas, só para um teste, sendo necessário efectuar testes em todas as áreas críticas.

O peso da TE, compressor e estrutura para o tecido são pesos constantes, já os pesos do tubo que transporta o ar comprimido e o cabo que prende o FIWinG são pesos que variam com a altura a que se encontra o FIWinG.

O cabo utilizado para segurar o FIWinG é o cabo de aço do tipo AF<sup>3</sup> que será dimensionado posteriormente.

O compressor terá que ter uma potência compatível com a TE (3,2 kW).

Para saber qual o volume de hélio que teria de ter o FIWinG para poder flutuar foi necessário multiplicar o peso do cabo e do tubo por 100, visto ser a altura máxima que se admitiu para o FIWinG. Obtendo-se assim um peso de 60 kg para o tubo e um peso de 1,4 kg para o cabo.

Para calcular o peso do tecido foi preciso saber qual o volume de hélio necessário que o FIWinG terá de ter, para se poder saber qual a área do tecido.

Para calcular o volume de hélio necessário para elevar o FIWinG é necessário saber qual a impulsão do hélio por metro quadrado. Essa impulsão pode ser calculada pela seguinte expressão [56]:

$$I_p = g \times \rho_{fl} \times V_{eli} \quad (4.8)$$

Onde:

$I_p$  - é a impulsão (N);

$g$  - é a aceleração da gravidade (-9,81 m/s<sup>2</sup>);

$\rho_{fl}$  - é a diferença de densidade dos fluidos (1,0215 kg/m<sup>3</sup>);

$V_{eli}$  - é o volume de hélio que terá de ter o FIWinG (m<sup>3</sup>).

Com a equação 4.8 calcula-se que 1 m<sup>3</sup> de hélio tem uma impulsão de 10,02 N.

Desenhou-se no Autodesk Inventor Professional 2010 o formato do FIWinG, com a forma de um zeppelin.

Por várias tentativas, foi-se ajustando, o ângulo de abertura do difusor e do concentrador, o comprimento do FIWinG e o diâmetro frontal, (sendo estes os responsáveis pela alteração do volume de hélio) para se obter o volume de hélio necessário para elevar o FIWinG.

É de salientar que cada vez que se alterou o volume de hélio para se obter um volume ideal, altera-se a área do tecido. Variando a área do tecido varia-se o peso do tecido do FIWinG. Com a variação do peso do tecido varia-se o peso total. Após as várias tentativas em erro obteve-se:

Ângulo de abertura do concentrador: 42°;

Ângulo de abertura do difusor: 12°;

Diâmetro frontal do FIWinG: 9,6 m;

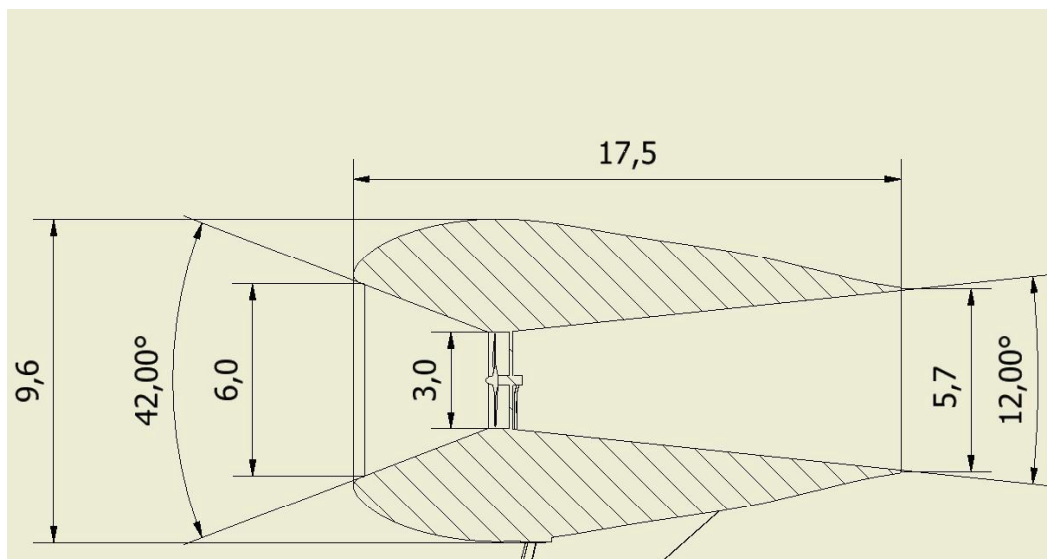
Área do tecido: 770 m<sup>2</sup>;

Volume de hélio: 622 m<sup>3</sup>;

---

<sup>3</sup> Cabo de aço com alma de fibra.

Na figura seguinte está ilustrado as dimensões dos vários componentes do FIWinG, após o ajuste do volume.



**Figura 34:** Constituição do FIWinG.

Todos os valores na Figura 34, excepto os ângulos, estão em metros. Pode verificar-se que o FIWinG tem uma dimensão bastante considerável, isto com os seus 17,5 m de comprimento e um diâmetro frontal de 9,6 m. Foi preciso todo este tamanho para conseguir o volume de hélio necessário para colocar o FIWinG a flutuar.

A área frontal pode ser determinada pela seguinte equação:

$$A_{fr} = \frac{\pi}{4} \times D_{iam}^2 \quad (4.9)$$

Onde:

$A_{fr}$  - é a área frontal do FIWinG ( $m^2$ );

$D_{iam}^2$  - é o diâmetro frontal do FIWinG (m)

Substituindo-se o valor do diâmetro frontal na equação 4.9 obteve-se uma área de 72,38  $m^2$ .

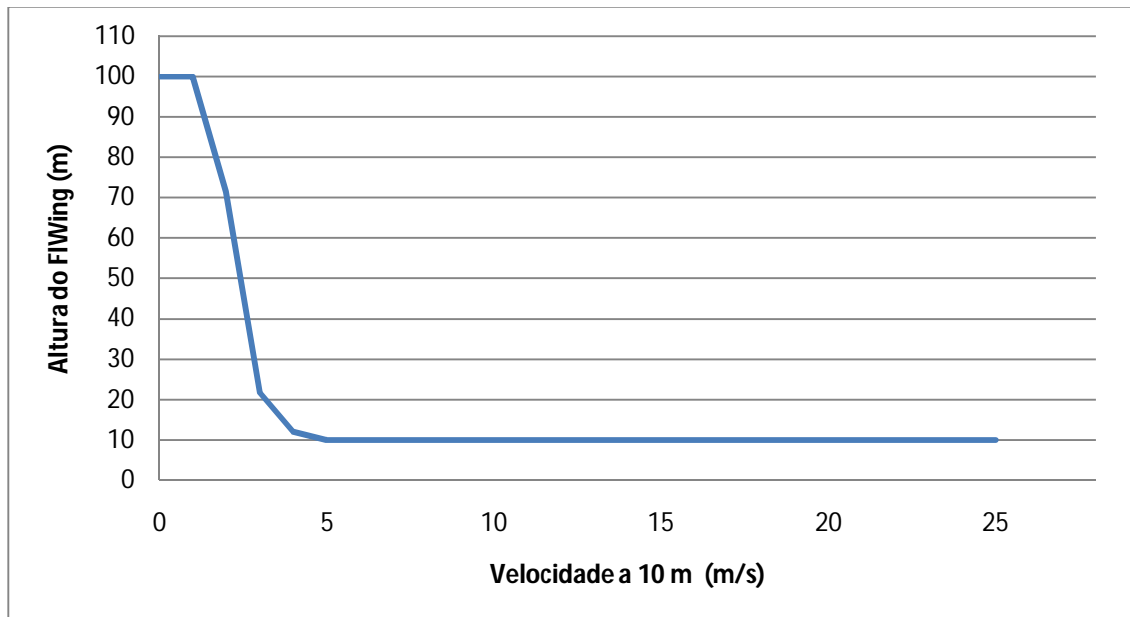
Como o volume de hélio é de 622  $m^3$ , então a impulsão total no FIWinG devido ao hélio é de 6232,44 N. O peso total do FIWinG é de aproximadamente 4275,6 N (436 kg), assim verifica-se que o volume de hélio existente no FIWinG é suficiente para o elevar, a diferença entre o peso e a impulsão do volume de hélio dá uma impulsão que vai ajudar a contrariar a força de arrasto, fornecendo mais sustentabilidade ao FIWinG.

### 4.3.1.3 Cálculo da Velocidade Mínima do Vento para Rendimento Máximo da TE

Vai-se tentar diminuir ao máximo possível a velocidade do vento na entrada do FIWinG para minimizar a força de arrasto. Para diminuir a velocidade do vento, tem que se ter em atenção a velocidade pretendida para o rendimento máximo da TE. A velocidade mínima necessária para se ter a eficiência máxima na TE ronda os 16 m/s. Assumindo este valor vai-se calcular a velocidade mínima do vento que deverá estar na entrada do FIWinG. Essa velocidade pode ser calculada pela equação 4.3 substituindo as respectivas áreas e velocidade, obtêm-se uma velocidade de 4,44 m/s na entrada do FIWinG.

Com essa velocidade de vento na entrada do FIWinG a TE funciona com rendimento máximo. Mas não é possível ter sempre essa velocidade, porque quando o vento tem velocidades muito lentas ou muito elevadas não se é capaz de obter essa velocidade para as alturas de 10 m a 100 m visto serem estas as alturas onde se considerou que o FIWinG vai estar a flutuar.

Mas pela modificação da altura do FIWinG poder-se-á ajustar a velocidade do FIWinG para o valor mais próximo possível da velocidade desejada. Com a equação 3.3 é possível calcular a altura a que o FIWinG deverá estar para que tenha a velocidade óptima na turbina, para as possíveis velocidades de vento a 10 m (velocidade de referencia). Essa altura estará limitada sempre a um valor máximo de 100 m e a um valor mínimo de 10 m. No gráfico seguinte temos as várias alturas do FIWinG para diferentes velocidades de vento a 10 m.



**Figura 35:** Gráfico da altura do FIWinG em função da velocidade a 10 m

Pode-se observar pela Figura 35, que para velocidades do vento a 10 m baixas o FIWinG deve-se de encontrar a flutuar na sua altura máxima (100 m), pode-se também observar que para velocidades do vento superiores a 5 m/s o FIWinG vai-se encontrar na sua altura mínima ou seja junto ao solo.

### 4.3.1.4 Cálculo da Força de Arrasto

Com os valores do coeficiente de arrasto, da área frontal do FIWinG (área onde vai embater o vento), e a velocidade do vento é possível determinar o valor da força de arrasto.

Utilizando a equação 3.15 é possível determinar a força de arrasto.

Na tabela seguinte é possível verificar os vários valores da força de arrasto para as diferentes velocidades do vento, tanto para o FIWinG como para o tubo que transporta o ar comprimido.

**Tabela 6** Valores da força de arrasto no FIWinG e no tubo

Cd FIWinG	0,04	Velocidade entrada FIWinG (m/s)	Altura do FIWinG dentro dos limites (m)	Força de arrasto (N)	Fw tubo (N)
Diametro frontal FIWinG (m)	9,60	2,43	100,00	10,26	0,19
Cd tubo	0,42	4,44	71,50	34,31	0,45
Diametro tubo (m)	0,04	4,44	21,70	34,31	0,14
par (kg/m <sup>3</sup> )	1,20	4,44	11,96	34,31	0,07
		5	10	43,43	0,08

Para o tubo a área onde vai embater o vento vai variar para as diferentes alturas onde se vai encontrar o FIWinG. Essa área será calculada pela expressão seguinte:

$$A_{tubar} = \frac{\pi \times d_{tub}^2}{4} \times l_{tub} \quad (4.10)$$

Onde:  $A_{tubar}$  - é a área do tubo que transporta o ar comprimido (m<sup>2</sup>).

Como se pode ver quanto maior a velocidade do vento maior vai ser a força de arrasto. Mas quando o FIWinG estiver a 10 m vai estar fixo a uma estrutura.

### 4.3.2 Impulsão das Asas

Devido a força de arrasto a altura do FIWinG pode variar, assim vai ser necessitar calcular a impulsão que as asas a implementar no FIWinG devem de dar para que este não se desloque da altura pretendida.

Pela equação seguinte é possível calcular a força da sustentação<sup>4</sup> das asas no FIWinG [57].

$$L = \frac{1}{2} \times C_l \times \rho_{ar} \times A_{asa} V_{vent}^2 \quad (4.11)$$

Onde:

L- é a força de sustentação (N);

$C_l$  - é o coeficiente de sustentação;

$\rho_{ar}$  - é a massa especificado ar (kg/m<sup>3</sup>);

$A_{asa}$  - Área inferior da base da asa (m<sup>2</sup>);

$V_{vent}$  - Velocidade do vento (m/s).

<sup>4</sup> Força de sustentação é provocada pela passagem do ar numa asa. Essa força vai fazer com que a asa seja impulsionada.

O valor do coeficiente de sustentação é um dado que varia com o ângulo de ataque da asa e do formato da asa. Com o programa *Foil Sim II* disponível pela NASA para um ângulo de ataque com 5 graus (sendo este o que por defeito se encontra no *Foil Sim II* e caso fosse muito elevado o ângulo de ataque provocaria muita força de arrasto na asa) obtêm-se um coeficiente de sustentação de 0,6. Optou-se para a asa uma área da base inferior de 16 m. Assim utilizando a equação 4.11 obtiveram-se os seguintes valores:

**Tabela 7:** Valore da força de sustentação de cada asa no FIWinG

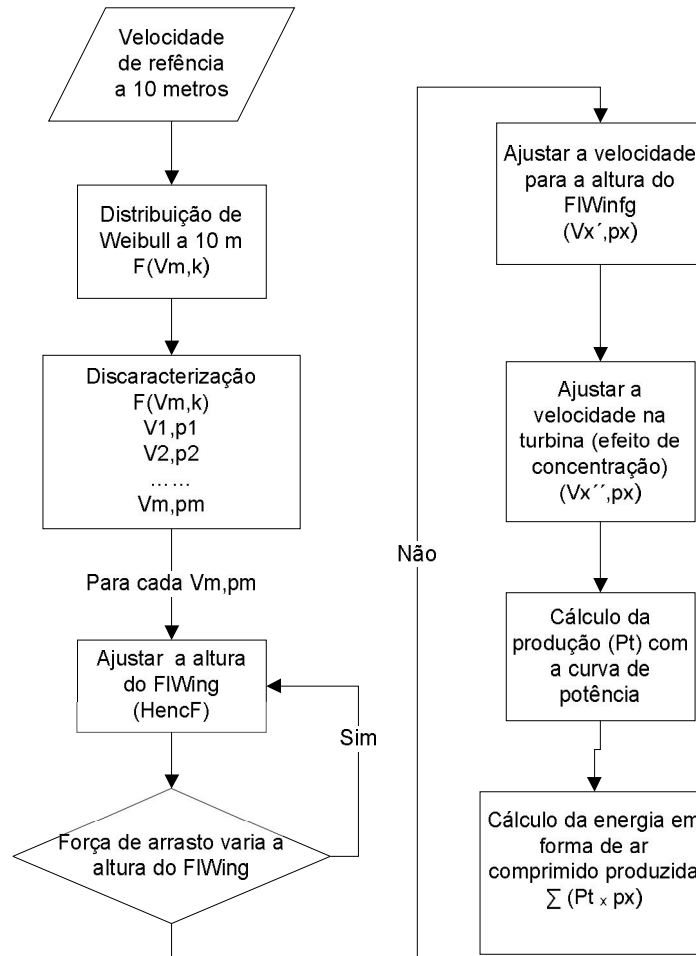
par (kg/m <sup>3</sup> )	1,20	Velocidade entrada FIWing (m/s)	Altura do FIWing dentro dos limites (m)	L de cada asa (N)
Cl asa	0,60	2,43	100,00	34,03
Area inferior de cada asa (m <sup>2</sup> )	16,00	4,44	71,50	113,78
		4,44	21,70	113,78
		4,44	11,96	113,78
		5	10	144,00

Tal como a força de arrasto, a força de sustentação também não tem importância quando o FIWinG fica a altura de 10 m, visto nessa situação ele ficar fixo a casa onde fica recolhido quando não tem condições meteorológicas para funcionar.

#### 4.4 Cálculo da Energia Produzida pelo FIWinG

A funcionalidade do FIWinG é a produção de energia. Essa energia vai ser produzida pela TE a partir da energia cinética do vento convertendo-a em energia mecânica. Por sua vez o compressor vai transformar a energia mecânica da turbina em energia na forma de ar comprimido. O ar comprimido vai ser transportado para o solo onde vai ficar armazenada para uso posterior.

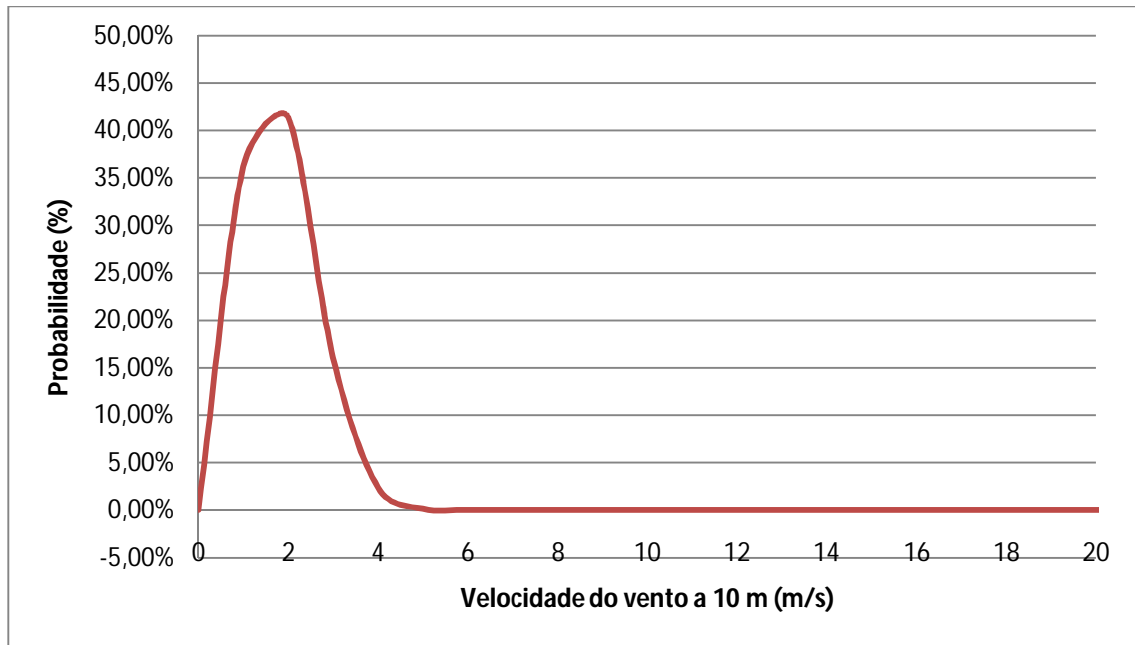
Na figura seguinte pode ver-se o método em diagrama utilizado para calcular o valor da energia anual em forma de ar comprimido produzida pelo FIWinG.



**Figura 36:** Diagrama com o método utilizado para o cálculo da energia produzida pelo FIWinG

Em seguida é explicado em pormenor o método para calcular a energia anual produzida em forma de ar comprimido pelo FIWinG com as respectivas equações.

O primeiro passo é aplicar a equação de Weibull equação 3.4 para uma velocidade de referência (a 10 m de altura), calculando a velocidade que se vai encontrar a 100 m. Na equação de Weibull foi utilizado o valor de  $k = 2,3$  (sendo este o valor para a altura a 100 m) como se pode observar na Tabela 2 (que aconselha este valor para Portugal), e uma velocidade média de 2 m/s. Na figura seguinte estão os valores obtidos para  $f(V_{vent})$ .



**Figura 37:** Valores da função de Weibull para a velocidade de vento a 10 m

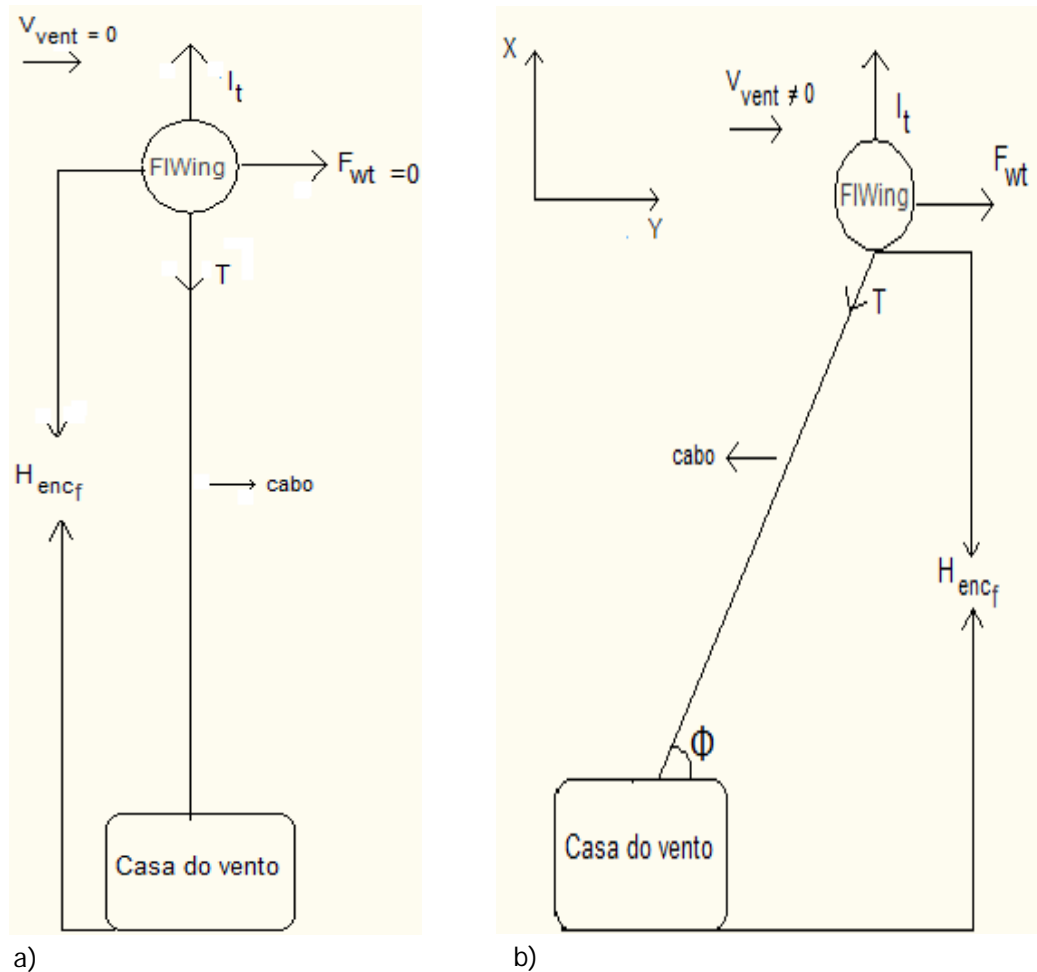
Na Figura 37 está ilustrada para uma velocidade média de vento de 2 m/s a probabilidade que pode surgir uma determinada velocidade de vento, pode verificar-se que tem mais probabilidade existir velocidades de vento entre 0,5 m/s e os 5 m/s.

Em seguida é necessário saber a altura a que deverá de estar o FIWinG para ter uma velocidade do vento na turbina o mais próximo da velocidade mínima óptima. Esse cálculo já foi efectuada neste capítulo num ponto anterior nomeadamente no ponto 4.3.1.3, esses valores podem-se observar na Figura 35.

Com os valores da altura a que se deve encontrar o FIWinG, vai ser necessário saber se a força de arrasto no FIWinG, altera a sua posição.

Para calcular a posição real do FIWinG, é necessário efectuar um esquema das forças que estão aplicadas ao mesmo.

Na figura seguinte verifica-se esse esquema de forças.



**Figura 38:** Forças aplicadas ao FIWinG; a) caso de velocidade do vento nula; b) caso em que velocidade do vento diferente de zero

Onde:

$T$  - é a força de tensão no cabo (N);

$I_t$  - é a impulsão total (ou seja a impulsão do hélio menos o peso do FIWinG mais a força de sustentação das asas) (N);

$F_{wt}$  - é a força de arrasto total (ou seja força de arrasto no tubo e no FIWinG (não entra a do cabo porque vai ficar acoplado atrás do tubo)) (N);

$H_{encf}$  - é a altura onde se encontra o FIWinG (m);

$L_{cab}$  - é o comprimento do cabo (m)

$\Phi$  - é o ângulo entre o solo e o cabo do FIWinG ( $^\circ$ ).

Os cálculos, para verificar se houve uma alteração significativa da altura do FIWinG, foram efectuados para todas as alturas onde se pode encontrar o FIWinG (10 m - 100 m).

Decompondo as forças da Figura 38 b) aplicadas no FIWinG nos eixos X e Y obtêm-se:

$$F_{wt} = T \cos(\Phi) \quad (4.12)$$

$$T \sin(\Phi) = I_t \quad (4.13)$$

Também da Figura 38 b) pode tirar-se a seguinte equação:

$$H_{encf} = L_{cab} \times \text{sen}(\Phi) \quad (4.14)$$

O valor de  $F_{wt}$  é a soma da força de arrasto no tubo com a força de arrasto no FIWinG que já foram calculadas neste capítulo, no ponto 4.3.1. Com a soma dos valores da impulsão do hélio e da força de sustentação das asas (obtidos no ponto 4.3.1 e 4.3.2) sabe-se a impulsão no FIWinG, subtraindo a impulsão no FIWinG com o seu próprio peso obtêm-se  $I_t$ . Na tabela seguinte observam-se os valores obtidos após os cálculos enunciados anteriormente:

**Tabela 8:** Valores da força de arrasto total e da impulsão total

Altura do FIWinG dentro dos limites (m)	$F_{wt}$ (N)	$I_t$ (N)
100,00	10,45	1965,05
71,50	34,76	2124,54
21,70	34,45	2130,57
11,96	34,39	2130,57
10	43,51	2486,16

Os valores de  $I_t$  e de  $F_{wt}$  só são necessários para a altura do FIWinG dos 100 m aos 10 m visto que o FIWinG fica fixo nos 10 m.

Com as equação 4.12, equação 4.13 e a equação 4.14 retiram-se os valores de  $T$ , de  $\Phi$  e de  $H_{encf}$ , obtendo-se assim os seguintes valores, para as alturas do FIWinG entre 10 m e 100 m.

**Tabela 9:** Valores da força de tensão no cabo, ângulo entre o cabo e o solo, da altura a que fica o FIWinG e a altura a que deveria de ficar o FIWinG

$\Phi$ (graus)	$T$ (N)	HencFIWinG (m)	Altura que deveria de ficar o FIWinG (m)
112590,75	1965,08	100,00	100,00
121743,74	2124,83	71,49	71,50
121743,45	2124,82	21,70	21,70
121743,39	2124,82	11,96	11,96
125215,47	2185,42	10,00	10,00

Da Tabela 9 verifica-se que para os 71,5 m o FIWinG sofre um ligeiro deslocamento (0,01 m), que se pode desprezar para a variação da velocidade do vento.

Com o valor da força de tensão no cabo, é possível o dimensionamento do cabo que segura o FIWinG quando está suspenso. Foi aplicado um factor de segurança no cabo com valor de 3,5 (sendo este um valor já bastante elevado para factor de potência) para a segurança do FIWinG. Assim obteve-se uma tensão para o cabo de  $3,5 \times 1,97 = 6,89$  kN. O cabo3 seleccionado foi do tipo AF (porque é mais leve), o qual necessita um diâmetro de 11,5 mm para suportar tensões superiores a 6,89 kN (o cabo suporta tensões de 7,33 kN [58]).

Em seguida aplicou-se a equação 3.3, para saber a velocidade do vento na entrada do FIWinG, consultando o valor de rugosidade ( $Z_0$ ) na Tabela 1 optou-se por colocar o valor de  $Z_0$  igual a 2, visto o PE estar situado num bosque. No ponto 4.3.1.4 está efectuada esse cálculo onde se obteve a velocidade do vento a entrada do FIWinG a partir da equação 3.3.

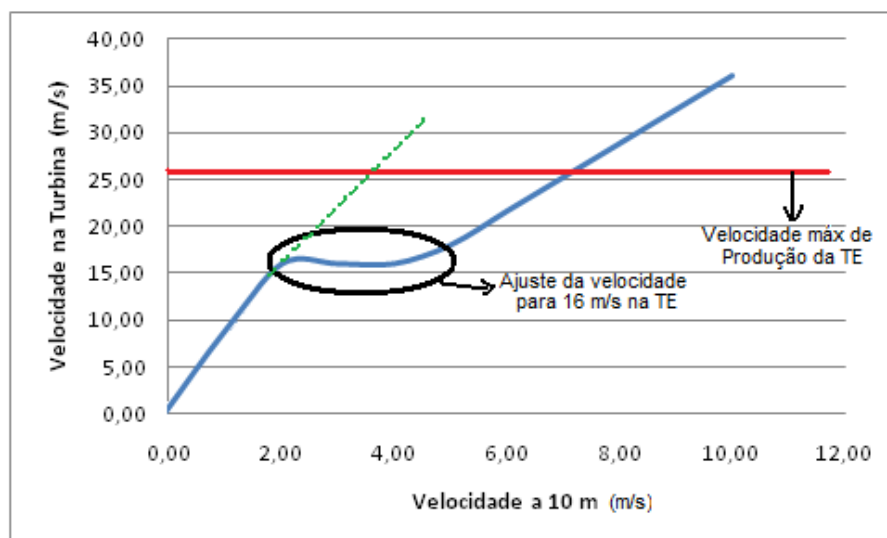
Sabendo a velocidade do vento a entrada do FIWinG, e com a equação 4.3 calcula-se a velocidade do vento na turbina eólica. Após se ter efectuado esse cálculo obteve-se:

**Tabela 10:** Cálculo dos valores da velocidade na TE

Velocidade entrada FIWinG (m/s)	Velocidade na TE(m/s)
2,43	8,75
4,44	16,00
4,44	16,00
4,44	16,00
5	18,00
6	21,60
7	25,20
8	28,80
9	32,40
10	36,00
11	39,60
12	43,20
13	46,80
14	50,40
15	54,00
16	57,60
17	61,20
18	64,80
19	68,40
20	72,00
21	75,60
22	79,20
23	82,80
24	86,40
25	90,00

A partir de velocidades do vento de 5 m/s na entrada do FIWinG este já se encontra junto ao solo como se pode verificar na Figura 35, assim a velocidade na entrada do FIWinG é igual a velocidade de referência (a 10 m).

Na seguinte figura observa-se a velocidade que vai passar na TE em relação a velocidade do vento a 10 m.



**Figura 39:** Velocidade na turbina do FIWinG em relação a velocidade de referência a 10 m

Na Figura 39 observa-se, que para velocidades de vento a 10 m com valores acima de 8 m/s, encontram-se velocidades na turbina eólica superiores a 26 m/s, para essas velocidades a turbina deixa de produzir energia. Também se pode verificar (a verde tracejado) o ajuste da velocidade do vento na TE com a variação da altura, que é efectuado para tentar ter o maior tempo possível velocidades de 16 m/s na turbina eólica e abaixo dos 25 m/s. Se não fosse efectuado esse ajuste a turbina aos 4 m/s deixava de produzir. Assim com o ajuste da velocidade, verifica-se que se pode produzir para o dobro de velocidades de vento (8 m/s).

Como se pode verificar na Figura 37 a maior probabilidade de velocidades de vento a 10 m é entre os valores de 0,5 m/s e 5 m/s, e para esses valores a TE do FIWinG está sempre a produzir.

Após o cálculo da altura e da velocidade do vento que vai passar na turbina, aplicando-se a equação 3.10 é possível calcular a energia anual produzida pela TE. Para uma velocidade média do vento de 2 m/s obteve-se o valor de 13,4 MW para a energia anual produzida pela TE como se pode observar na seguinte tabela.

**Tabela 11:** Cálculo da energia anual produzida pela TE

V na turbina(m/s)	Cp	Potência produzida pela TE (kW)	Potência nominal da Turbina (kW)	Vref 10m (m/s)	f(Vvent)	Potência produzida pela turbina (Kw)
0,00	0%	0,00	2,00	0,00	0,00%	0,00000
8,75	50%	0,34		1,00	36,17%	0,33735
16,00	50%	0,82		2,00	41,35%	0,82017
16,00	50%	0,32		3,00	16,09%	0,31909
16,00	100%	0,05		4,00	2,38%	0,04758
18,00	100%	0,00		5,00	0,13%	0,00263
21,60	100%	0,00		6,00	0,00%	0,00005
25,20	100%	0,00		7,00	0,00%	0,00000
28,80	100%	0,00		8,00	0,00%	0,00000
32,40	100%	0,00		9,00	0,00%	0,00000
36,00	100%	0,00		10,00	0,00%	0,00000
39,60	100%	0,00		11,00	0,00%	0,00000
43,20	100%	0,00		12,00	0,00%	0,00000
46,80	100%	0,00		13,00	0,00%	0,00000
50,40	100%	0,00		14,00	0,00%	0,00000
54,00	0%	0,00		15,00	0,00%	0,00000
57,60	0%	0,00		16,00	0,00%	0,00000
61,20	0%	0,00		17,00	0,00%	0,00000
64,80	0%	0,00		18,00	0,00%	0,00000
68,40	0%	0,00		19,00	0,00%	0,00000
72,00	0%	0,00		20,00	0,00%	0,00000
75,60	0%	0,00		21,00	0,00%	0,00000
79,20	0%	0,00		22,00	0,00%	0,00000
82,80	0%	0,00		23,00	0,00%	0,00000
86,40	0%	0,00		24,00	0,00%	0,00000
90,00	0%	0,00	25,00	0,00%	0,00000	
Potência produzida pela TE do FIWing (kW)						1,53
Energia anual produzida pela TE do FIWing (kWh)						13375,39

Com o valor da energia produzida pela turbina eólica é necessário introduzir o rendimento do compressor e as perdas na tubulação para calcular a energia anual em forma de ar comprimido produzida pelo FIWinG.

Segundo [54] o rendimento dos compressores rondam os 20%.

Para o cálculo das perdas dentro do tubo que transporta o ar comprimido usa-se a seguinte equação [59]:

$$\Delta p_r = 450 \times \frac{Q_{artub}^{1,85} \times l_{tub}}{d_{tub}^5 \times P_r} \quad (4.15)$$

Onde:

$\Delta p_r$  - é a diferença de pressão ou perda de carga (bar);

450 - é o coeficiente de atrito da tubulação;

$Q_{artub}$  - é o caudal do ar que passa no tubo (l/s);

$l_{tub}$  - é o comprimento do tubo de ar comprimido (m);

$d_{tub}$  - é o diâmetro da tubagem que transporta o ar comprimido (mm);

$P_{re}$  - é a pressão do ar (bar)

No ponto 3.3.1 deste capítulo já foi calculado o valor do caudal do ar comprimido e o diâmetro do tubo, tendo-se considerado uma pressão de 8 bar. Substituindo-se esses valores na equação 4.15 obteve-se:

$$\Delta p_r = 0,0003 \text{ bar.}$$

Sendo as perdas na tubulação calculadas pela seguinte formula:

$$perd_{tub} = \frac{\Delta p_r}{P_{re}} \times 100 \quad (4.16)$$

Onde:

$perd_{tub}$  - são as perdas no tubo do ar comprimido(%).

Utilizando a equação 4.16 obteve-se:

$$perd_{tub} = 0,37\%.$$

Tendo o rendimento do compressor e as perdas na tubulação pode calcular-se a energia total produzida pela FIWinG, pela seguinte expressão:

$$E_f = E_{TE} \times [1 - (perd_{tub} + (1 - \eta_{compr}))] \quad (4.17)$$

Onde:

$E_f$  - é a energia anual produzida pelo FIWinG (Wh);

$E_{TE}$  - é a energia anual produzida pela TE (Wh);

$\eta_{compr}$  - é o rendimento do compressor.

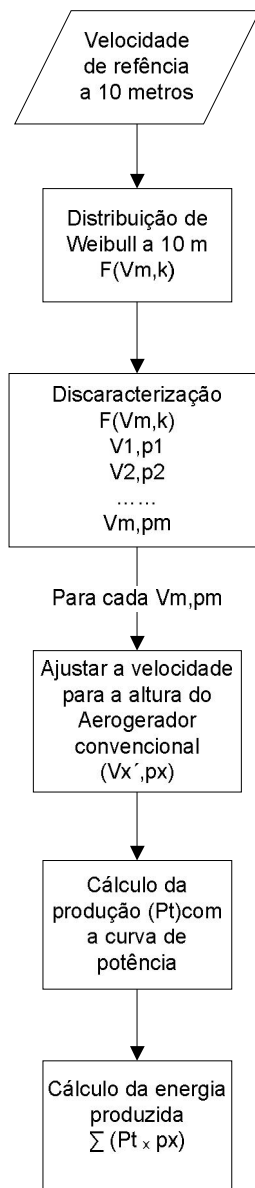
Com a equação 4.17 foi possível calcular o valor da energia total produzida pelo FIWinG, tendo-se obtido:

$$E_f = 2,6 \text{ MWh}$$

Foram efectuados os mesmos cálculos para a energia anual produzida pelo FIWinG para diferentes valores médios de velocidade do vento de referência (10 m) nomeadamente para valores entre 1 a 7 m/s.

## 4.5 Comparação Energética entre o FIWinG e um Aerogerador Convencional

Após se ter efectuado o cálculo da energia produzida no FIWinG realizou-se também o cálculo da energia produzida por um aerogerador (AG). O aerogerador será dotado de uma TE com a mesma potência que a do FIWinG, mas em vez de estar ligada ao compressor vai estar ligada a um gerador, tendo a vantagem de o gerador ter um rendimento muito superior ao compressor. Essa turbina vai estar a 20 m de altura, visto ser essa altura aplicada a turbinas na gama de 2 kW. Para o cálculo da energia produzida pelo aerogerador vai-se seguir o diagrama apresentado na seguinte figura:



**Figura 40:** Diagrama com o método utilizado para o cálculo da energia produzida pela TE num aerogerador

Em seguida vai ser demonstrado em pormenor como se calcula a energia produzida pelo AG assim como as expressões necessárias para tal.

Em primeiro lugar a partir da velocidade de referência do vento calcula-se a distribuição de probabilidade de Weibull pela equação 3.4, o valor atribuído a k foi de 2,33 como se pode observar na Tabela 2, com velocidade média do vento de 2 m/s, esse cálculo já foi efectuado anteriormente, nomeadamente no ponto 4.4. Os valores podem ser observados na Figura 37.

Em seguida com a velocidade de referência do vento (10 m) é efectuada a correcção da mesma para a altura onde vai ser colocada a TE (20 m), para fazer essa correcção é utilizada a equação 3.3.

Sabendo a velocidade do vento que vai passar na TE e com a curva de potência pode calcular-se a potência produzida pela turbina eólica do AG. Em seguida utilizando a equação 3.10 obtêm-se a energia produzida pela turbina.

Efectuando-se todos os cálculos obtêm-se os seguintes valores:

**Tabela 12:** Cálculo da energia anual produzida pela TE do aerogerador

Potência TE (kW)	Vref (m/s)	Velocidade na TE no AG(m/s)	Cp	f(Vvent)	Potencia produzida pela turbina (kW)
2	0,0	0,000	0,000%	0,00%	0,00000
	1,0	1,431	0,6%	36,17%	0,00442
	2,0	2,861	1,6%	41,35%	0,01318
	3,0	4,292	4,1%	16,09%	0,01317
	4,0	5,723	10,1%	2,38%	0,00481
	5,0	7,153	22,9%	0,13%	0,00060
	6,0	8,584	43,8%	0,00%	0,00002
	7,0	10,015	67,3%	0,00%	0,00000
	8,0	11,445	84,4%	0,00%	0,00000
	9,0	12,876	93,5%	0,00%	0,00000
	10,0	14,307	97,4%	0,00%	0,00000
	11,0	15,737	99,0%	0,00%	0,00000
	12,0	17,168	100,0%	0,00%	0,00000
	13,0	18,599	100,0%	0,00%	0,00000
	14,0	20,029	100,0%	0,00%	0,00000
	15,0	21,460	100,0%	0,00%	0,00000
	16,0	22,891	100,0%	0,00%	0,00000
	17,0	24,322	100,0%	0,00%	0,00000
	18,0	25,752	100,0%	0,00%	0,00000
	19,0	27,183	0,0%	0,00%	0,00000
	20,0	28,614	0,0%	0,00%	0,00000
	21,0	30,044	0,0%	0,00%	0,00000
	22,0	31,475	0,0%	0,00%	0,00000
	23,0	32,906	0,0%	0,00%	0,00000
	24,0	34,336	0,0%	0,00%	0,00000
25,0	35,767	0,0%	0,00%	0,00000	
Potência anual Produzida pela TE do AG (kW)					0,0362
Energia anual produzida pela TE do AG (kWh)					317,0415

Por fim multiplicando-se a energia produzida da turbina pelo rendimento do gerador, obtêm-se o rendimento do AG, ou seja:

$$E_{AG} = E_{TE} \times \eta_G \quad (4.18)$$

Onde:

$E_{AG}$  - é a energia produzida pelo aerogerador (Wh);

$E_{TE}$  - é a energia anual produzida pela turbina eólica (Wh);

$\eta_G$  - é o rendimento do gerador.

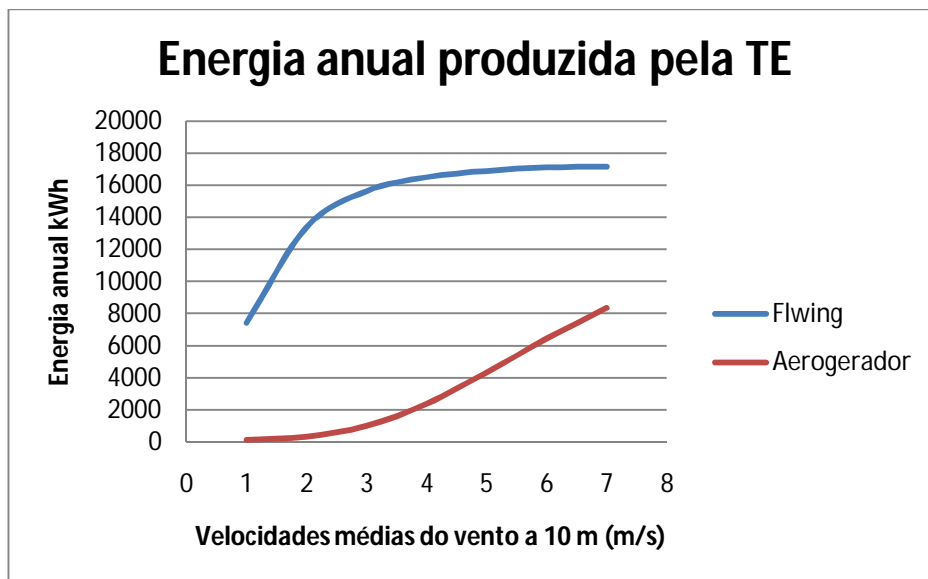
Utilizando a equação 4.18 para um rendimento do gerador de 80% [60].

Obtêm-se:

$$E_{AG} = 253,63 \text{ kWh}$$

Foram calculadas os vários valores da energia anual produzida pelo FIWinG e pelo aerogerador convencional para as diferentes velocidades médias de vento.

Na Figura 41 está representado o gráfico da comparação entre as energias anuais produzidas pela turbina eólica do FIWinG e pela turbina eólica do AG para as várias velocidades médias do vento.

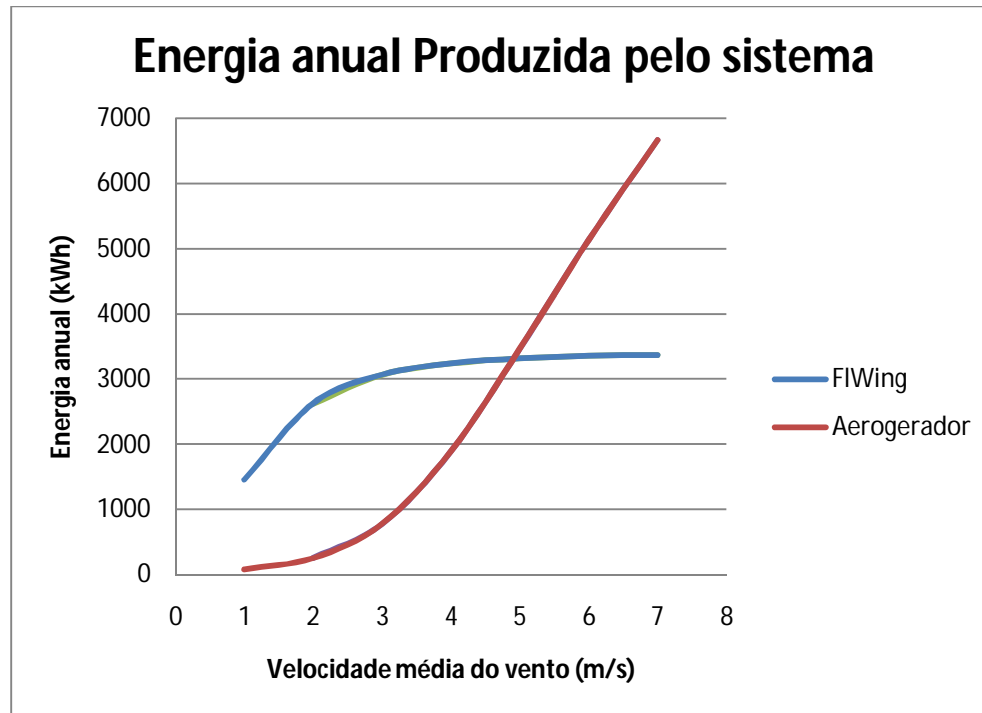


**Figura 41:** Energia anual produzida pela TE do FIWinG e pela TE do AG

Como se pode verificar a energia anual produzida pela TE do FIWinG é muito superior à energia anual produzida pela TE do AG, isto devido à possibilidade de regulação no FIWinG do vento que passa na TE pela alteração da altura, e também devido ao concentrador que possui o FIWinG, que faz com que a velocidade do vento aumente.

Pode verificar-se que a partir de uma velocidade média do vento de 4 m/s a TE do FIWinG produz aproximadamente o mesmo, isto porque a TE tem a limitação de só poder produzir energia para velocidades máximas do vento de 25 m/s. Se fosse colocada uma TE no FIWinG sem restrição de velocidade máxima do vento para a produção, a energia produzida pelo FIWinG continuaria a subir em vez de estabilizar.

Também se efectuou uma comparação entre as energias anuais produzidas pelo sistema do FIWinG e pelo sistema do AG. Na figura seguinte está ilustrada essa comparação.



**Figura 42:** Valores da energia produzida pelo FIWinG e pelo AG para diferentes valores de velocidade média do vento a 10 metros

Como se pode constatar na Figura 42, para velocidades médias do vento até 4,5 m/s o FIWinG tem uma maior produção, isto devido ao aumento provocado pelo concentrador e pela variação da altura. A partir de velocidades médias do vento de 5 m/s o aerogerador produz mais energia que o FIWinG, isto porque a TE está limitada a velocidades do vento inferiores a 25 m/s, e também porque o rendimento do gerador que se encontra no AG é muito superior ao rendimento do compressor que se encontra no FIWinG.

Mas para o PE no município de Ponte da Barca o FIWinG é uma boa solução, isto porque nesta zona a velocidade média do vento é de 2,3 m/s [15]. E como se pode verificar na Figura 42 para estas velocidades médias de vento o FIWinG produz mais dez vezes mais energia que o AG.



# Capítulo 5

## Aproveitamento do Potencial Hídrico no Parque de Energia

### 5.1 Introdução

Neste capítulo vai-se efectuar um estudo do potencial energético disponível pelo recurso hídrico no local onde se vai encontrar o PE.

Como primeira fase deste capítulo, vai-se efectuar um cálculo do caudal de água disponível, para assim calcular a potência a instalar na turbina hidráulica a colocar na CMH sendo esta uma central a fio de água. O PE tem que ser um local atractivo e para isso vão existir uns “mini” lagos. Esses lagos vão ter perdas da água por infiltração. Para manter os lagos sempre com água vai ser necessário colocar uma bomba hidráulica que transporta a água desde o rio Lima. O dimensionamento da bomba hidráulica será a segunda fase deste capítulo.

### 5.2 Dimensionamento da Turbina Hidráulica a implementar na CMH

Para o dimensionamento de uma turbina hidráulica a aplicar numa CMH é necessário conhecer os seguintes elementos:

- Caudal da água instalado;
- Altura de queda da água;
- Potência que deverá ter a TH.

Com estas três elementos é assim possível saber qual o tipo de TH assim como a potência a instalar na CMH.

A altura de queda da água é fixa, sendo neste caso de 30 m.

### 5.2.1 Cálculo da Potência a Instalar nos Equipamentos

Para o cálculo da potência a instalar nos equipamentos da CMH em primeiro lugar é necessário calcular o caudal modular (caudal médio do curso de água como enunciado no capítulo 2). Para o cálculo do caudal modular utiliza-se a equação 3.13. Para utilizar essa equação é necessário saber a pluviosidade e a área da bacia hidrográfica. O valor da pluviosidade foi retirado do site do INAG (Instituto da Água), a área da bacia foi uma medida aproximada, tendo sido utilizado o *Google Earth* para a sua medição. Na figura seguinte está ilustrado a área da bacia hidrográfica a sombreado de branco.



**Figura 43:** Demonstração da bacia hidrográfica para a mini-hídrica e da conduta forçada.

Após a medida obteve-se uma área hidrográfica de 24,43 km<sup>2</sup>.

Na figura 43 está também assinalado a azul o percurso que seria ideal para o canal a céu aberto que transporta a água até a entrada do PE.

Segundo [37] existe em média um atraso de 6 horas entre a produção e a pluviosidade. O caudal médio anual é calculado a partir da pluviosidade anual, como tal sendo anual despreza-se o atraso de 6 horas.

O valor da pluviosidade foi retirado do site do INAGI obtendo-se uma pluviosidade anual que atinge a região de 1,21 m.

Assim utilizando a equação 3.13, foi possível o cálculo do caudal modular, obtendo-se  $Q_{mod} = 0,937 \text{ m}^3/\text{s}$ .

O caudal modular, é o caudal que será garantido durante 15% a 25% do ano. Também se sabe que o caudal instalado deverá ser o caudal garantido durante 20% a 30% do ano [38].

Em primeiro lugar vai ser necessário calcular o caudal instalado. Para isso é efectuado o cálculo da curva de característica de caudais classificados, essa curva pode ser caracterizada pela seguinte expressão [38]:

$$Q_{cal} = a_1 \times e^{-\frac{t_{caud}}{b_1}} + a_2 \times e^{-\frac{t_{caud}}{b_2}} \quad (5.1)$$

Onde:

$Q_{cal}$  - é o caudal da água caracterizado ao longo do tempo ( $m^3/s$ );

$a_1$ ;  $a_2$ ;  $b_1$ ; e  $b_2$  são parâmetros da equação;

$t_{caud}$  - é o tempo total de duração do caudal (%).

Para o cálculo de  $a_1$ ;  $a_2$ ;  $b_1$ ; e  $b_2$  em primeiro lugar calcula-se o tempo em que existe cada caudal (entre 4  $m^3/s$  (caudal acima do máximo) até 0  $m^3/s$  com um intervalo de 0,1), em todos os valores do caudal durante cada mês para os quatro anos que se conhecem. Na tabela seguinte verifica-se esse cálculo.

**Tabela 13:** Cálculo do tempo total de duração de cada caudal

	Caudal ( $m^3/s$ )				Q ( $m^3/s$ )	Tempo total de duração do caudal
	2004	2005	2006	2007		
Janeiro	1,293	0,207	0,482	0,553	4	0,00%
Fevereiro	0,128	0,218	1,117	2,698	3,9	0,00%
Março	0,717	1,468	2,584	0,854	3,8	0,00%
Abril	0,996	0,674	0,641	0,391	3,7	0,00%
Maió	0,838	0,649	0,172	0,928	3,6	4,17%
Junho	0,148	0,321	0,221	1,243	3,5	0,00%
Julho	0,067	0,279	0,057	0,446	3,4	0,00%
Agosto	1,244	0,289	0,423	0,413	3,2	0,00%
Setembro	0,598	0,338	1,215	0,451	3,1	2,08%
Outubro	3,531	3,070	3,593	0,706	3	0,00%
Novembro	0,224	0,888	2,659	0,625	2,9	0,00%
Dezembro	0,752	1,168	1,690	0,892	2,8	0,00%
Máximo	3,531	3,070	3,593	2,698	2,7	4,17%
					2,6	2,08%
					2,5	0,00%
					2,4	0,00%
					2,3	0,00%
					2,2	0,00%
					2,1	0,00%
					2	0,00%
					1,9	0,00%
					1,8	0,00%
					1,7	2,08%
					1,6	0,00%
					1,5	2,08%
					1,4	0,00%
					1,3	8,33%
					1,2	4,17%
					1,1	0,00%
					1	4,17%
					0,9	8,33%
					0,8	6,25%
					0,7	8,33%
					0,6	4,17%
					0,5	10,42%
					0,4	6,25%
					0,3	12,50%
					0,2	6,25%
					0,1	4,17%
					0	0,00%

Na Tabela 13 está representado os valores do tempo em que existe cada caudal. Com o solver [61] soluciona-se a equação 5.1, na qual está substituído o valor do tempo para cada caudal, a função objectivo a introduzir no solver é o erro quadrado entre o caudal calculado ( $Q_{cal}$ ) e o caudal (Q), a qual se deve minimizar, os valores a alterar pelo solver são as células

de  $a_1$ ,  $a_2$ ;  $b_1$ ; e  $b_2$ . Após se ter efectuado os passos anteriormente o solver obteve os seguintes valores para  $a_1$ ,  $a_2$ ;  $b_1$ ; e  $b_2$ :

**Tabela 14:** Valores obtidos dos parâmetros da equação dos caudais classificados

a1	b1	a2	b2
1,287	0,586	2,703	0,143

O caudal instalado ( $Q_{inst}$ ) tem que ser garantido 25% do ano, assim substituindo na equação 5.1 os parâmetros e o tempo, obtêm-se:

$$Q_{inst} = 1,31 \text{ m}^3/\text{s}$$

Com os valores do caudal instalado e da altura da queda de água pode seleccionar-se o tipo de TH a implementar na CMH, a partir da Figura 24. Assim para uma altura da queda de água de 30 m e um caudal  $1,31 \text{ m}^3/\text{s}$  pela Figura 24 pode ver-se que as turbinas indicadas são as do tipo *Francis* e do tipo *Kaplan*.

Para o cálculo da potência a instalar na TH, precisa-se calcular a potência a instalar nos equipamentos, visto ser igual a potência da turbina. Para calcular essa potência usa-se a equação 3.12. Assume-se que o rendimento dos equipamentos é de 70% (visto normalmente estar compreendido entre 60% e 80%). Substituindo os valores na equação obteve-se uma potência a instalar na turbina hidráulica de 270 kW.

### 5.3 Cálculo da Energia Anual Produzida pela CMH

Para o cálculo da energia produzida pela CMH é necessário saber a variação do caudal que passa na CMH ao longo do tempo.

O caudal da água que vai passar na CMH vai ser dado pela curva de duração de caudais.

Para calcular a curva de duração de caudais é necessário calcular o caudal mínimo ( $Q_{min}$ ), o caudal máximo turbinável ( $Q_{max}$ ) e o caudal de cheias ( $Q_{ch}$ ).

Seleccionando a turbina do tipo *Francis* sendo esta a mais usada nas centrais mini-hídricas [37], obtêm-se [26]:

$$Q_{max} = 1,15 \times Q_{inst} \quad (5.2)$$

$$Q_{min} = 0,35 \times Q_{inst} \quad (5.3)$$

A partir da equação 5.2 e equação 5.3 obteve-se os seguintes valores:

$$Q_{max} = 1,51 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{min} = 0,46 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Com os valores dos parâmetros ( $a_1$ ;  $a_2$ ;  $b_1$ ; e  $b_2$ ), pode calcular-se os valores dos tempos  $Q_{max}$ ,  $Q_{min}$ . Para calcular esses valores foi utilizado o solver do excel utilizado a equação 5.1 como a função objectivo (fob  $Q(t)$ ) com  $a_1, a_2, b_1, b_2$ , e igualando esse valor ao  $Q_{max}$  ou ao  $Q_{min}$  consoante o tempo a calcular, a célula do tempo ficou como a célula a alterar pelo solver.

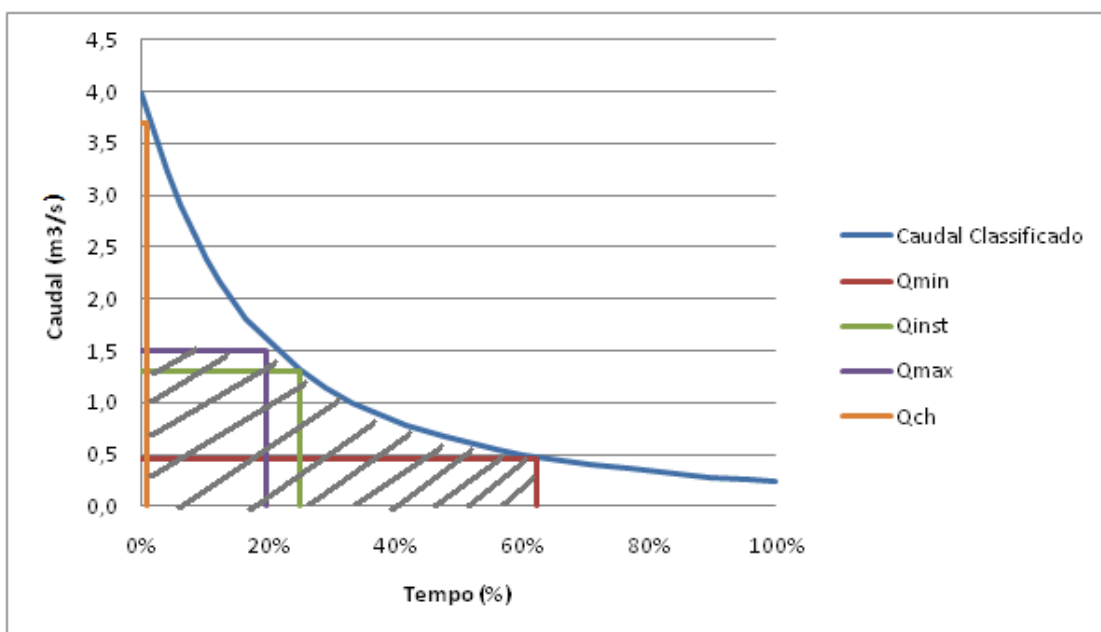
Após o solver resolver a equação obteve-se o tempo do caudal mínimo ( $t_{Qmin}$ ) e para o tempo do caudal máximo ( $t_{Qmax}$ ) obteve-se:

**Tabela 15:** Valores dos tempos para os caudais máximos e mínimos

	Qmín	Qinst	Qmáx
Q (m <sup>3</sup> /s)	0,46	1,31	1,51
tempo (%)	62%	25%	20%
fob Q (t)	0,46	1,31	1,51

Para o caudal de cheias assumiu-se que o tempo de duração seria de 1% ao ano, sendo este o valor típico. Substituiu-se esse valor na equação 5.1 obtendo-se o valor de 3,7 m<sup>3</sup>/s para o caudal de cheias.

Obteve-se assim a curva de duração de caudais apresentados na Figura 44:



**Figura 44:** Curva de caudal classificado

Na Figura 44 pode observar-se a sombreado, o tempo que a turbina vai funcionar.

Utilizando a equação 3.14, pode obter-se o valor da estimativa da energia produzida pela CMH. Tendo uma altura de queda de água de 30 m e considerando um rendimento de 70% para o sistema, com o caudal e com ao tempo de funcionamento da turbina (tempo de caudal mínimo menos o tempo de cheias) hidráulica obteve-se  $E_{aCMH} = 1,18$  GWh.

Prevê-se que o consumo anual de uma casa modular seja de 3540 kWh.

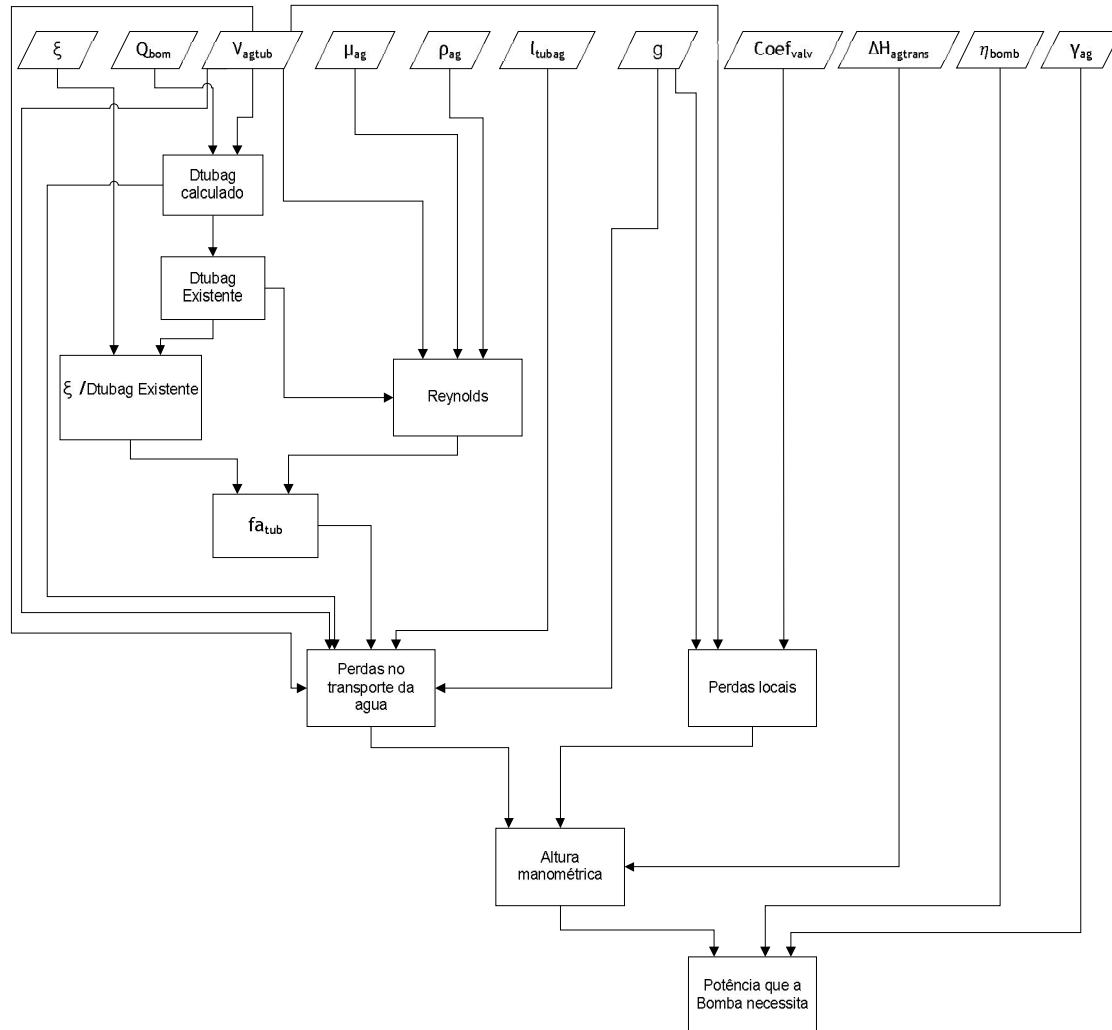
Assim constata-se que a CMH produz energia suficiente para as 114 casas modulares existentes, podendo ainda contribuir para a alimentação das infra-estruturas presentes no Parque

Assim a CMH vai ser um aproveitamento com grande relevância no Parque de Energia, contribuindo com uma parte importante para a sustentabilidade do mesmo.

## 5.4 Cálculo da Potência Necessária para a Bomba Hidráulica dos Lagos

A bomba dos lagos é a bomba que vai transportar a água do rio Lima até á cota mais elevada dos lagos. Esta bomba tem como função a manutenção de um nível de cota aceitável nos lagos do PE.

Na figura seguinte está ilustrado o diagrama com os passos necessários para calcular a potência necessária para a bomba hidráulica.



**Figura 45:** Diagrama com o método utilizado para calcular a potência da bomba dos lagos

Em seguida explica-se como se efectua cada passo do diagrama anterior.

Inicialmente calcula-se o caudal da bomba. Vai-se considerar que o caudal da bomba tem como valor  $0,045 \text{ m}^3/\text{s}$  sendo este um valor coerente para as perdas nos lagos. Assume-se também que a velocidade da água bombeada vai ser de  $1,5 \text{ m/s}$ , sendo esta a velocidade típica para este cálculo. Com estes dois valores pode se calcular o diâmetro que necessita de ter o tubo para transportar a água desde o rio até aos lagos, pela seguinte equação [44]:

$$Q_{bom} = V_{agtub} \times A_{tubag} \quad (5.4)$$

$$A_{tubag} = \frac{\pi \times d_{tubag}^2}{4} \quad (5.5)$$

Onde:

$Q_{bom}$  - é o caudal da bomba (igual ao caudal do tubo) ( $m^3/s$ );

$V_{agtub}$  - é a velocidade da água no interior da tubulação ( $m/s$ );

$A_{tubag}$  - é a área da tubulação da água ( $m^2$ );

$d_{tubag}$  - é o diâmetro do tubo que transporta a água ( $m$ ).

Da equação 5.4 obtêm-se o valor da área da tubagem da qual se obteve um valor de  $0,03 m^2$ . Com a equação 5.5 substituindo o valor da área calcula-se o valor do diâmetro do tubo que foi de  $0,19 m$ . Mas o diâmetro que existe no mercado é de  $0,2 m$  sendo este o diâmetro escolhido para o tubo.

Vai ser necessário calcular a força de atrito no tubo para se saber quais as perdas que o mesmo tem como se pode ver na Figura 45.

Para o cálculo da força de atrito no tubo é preciso saber o número de *Reynolds* e a razão entre a rugosidade e o diâmetro do tubo.

A rugosidade do tubo sabe-se a partir do material que o tubo é constituído. Escolheu-se o tubo de aço galvanizado o qual tem uma rugosidade de  $0,15 mm$ .

$$\text{Assim } \frac{\xi}{d_{tubag}} = 7,5 \times 10^{-4}.$$

Onde  $\xi$  é a rugosidade do tubo ( $mm$ ) e  $d_{tubag}$  é o diâmetro do tubo que transporta a água do rio até aos lagos.

Para calcular do número de *reynolds* é utilizada a seguinte expressão [44]:

$$Re = \frac{\rho_{ag} \times V_{agtub} \times d_{tubag}}{\mu_{ag}} \quad (5.6)$$

Onde:

$Re$  - é o número de *Reynolds*;

$\rho_{ag}$  - é a massa especificada água  $1000 (kg/m^3)$ ;

$\mu_{ag}$  - é a viscosidade dinâmica da água  $1005 \times 10^{-6} (N.s/m^2)$ .

Utilizando-se a equação 5.6 obtêm-se:

$$Re = 298507.$$

Para a obtenção da força de atrito no tubo, tem que se usar o diagrama do *Moody*<sup>5</sup>, com os valores do  $Re$  e de  $\frac{\xi}{d_{tubag}}$ , obteve-se a força de atrito no tubo igual a  $0,017 N$ .

Com a força de atrito calculada pode calcular-se as perdas no transporte de água pela seguinte equação [44]:

<sup>5</sup> No anexo A encontra-se o diagrama do Moody

$$p_{transag} = \frac{f_{atub} \times l_{tubag} \times V_{agtub}^2}{d_{tubag} \times 2 \times g} \quad (5.7)$$

Onde:

$p_{transag}$  - são as perdas de transporte da água (m);

$f_{atub}$  - é a força de atrito da tubagem;

$l_{tubag}$  - é o comprimento da tubagem (m).

O comprimento da tubagem é aproximadamente igual a 380 m tendo sido medido pelo *Google Earth* para uma diferença de cotas de 40 m, pois é a diferença entre a cota máxima do lago onde é descarregada e a cota do rio.

Substituindo os valores da força de atrito do tubo, do comprimento da tubagem, da velocidade da água e do diâmetro do tubo obtêm-se:

$$p_{transag} = 3,71 \text{ m}$$

Em seguida é necessário calcular as perdas locais para em seguida se calcular a altura manométrica.

As perdas locais calculam-se pela seguinte equação [44]:

$$p_{locais} = \frac{Coef_{val} \times V_{agtub}^2}{2 \times g} \quad (5.8)$$

Onde:

$P_{locais}$  - são as perdas locais (m);

$Coef_{valv}$  - é o coeficiente das válvulas.

O coeficiente das válvulas necessárias é de 2,15 (dado pela empresa Hidrotecnia).

Substituindo-se os valores na equação 5.8 obtêm-se:

$$p_{locais} = 0,25 \text{ m}$$

A altura manométrica é calculada pela seguinte expressão [44]:

$$H_{man} = p_{locais} + p_{transag} + \Delta H_{agtrans} \quad (5.9)$$

Onde:

$H_{man}$  - é a altura manométrica (m);

$\Delta H_{agtrans}$  - é a variação de altura desde o rio ao início dos lagos (m).

Substituindo os valores das perdas locais, das perdas de transporte da água e da variação da altura desde a cota do lago mais elevado até ao rio na equação 5.9 obtêm-se  $H_{man} = 43,9 \text{ m}$ .

Por fim para calcular a potência necessária para a bomba dos lagos é utilizada a seguinte equação[62]:

$$P_{bomlag} = \frac{\gamma_{ag} \times Q_{bom} \times H_{man}}{367 \times \eta_{bomb}} \quad (5.10)$$

Onde:

$P_{bomlag}$  - é a potência da bomba dos lagos (kW);

$\gamma_{ag}$  - é o peso específico da água em (kg/dm<sup>3</sup>);

$\eta_{bomb}$  - é o rendimento da bomba (%).

Segundo [62] para o cálculo da potência das bombas centrífugas, deve-se usar um rendimento médio da bomba de 70%.

Substituindo os valores do peso específico da água, do caudal da bomba, da altura manométrica e do rendimento da bomba, na equação 5.10, calcula-se o valor da potência que a bomba necessita para elevar a água desde o rio até ao início dos lagos o qual foi de 13,6 kW. Assim a bomba dos lagos, a qual vai ser responsável por manter a cota mínima nos lagos, deverá de ter uma potência instalada superior ou igual a 13,6 kW.



# Capítulo 6

## Frenagem Regenerativa Aplicada a uma Bicicleta

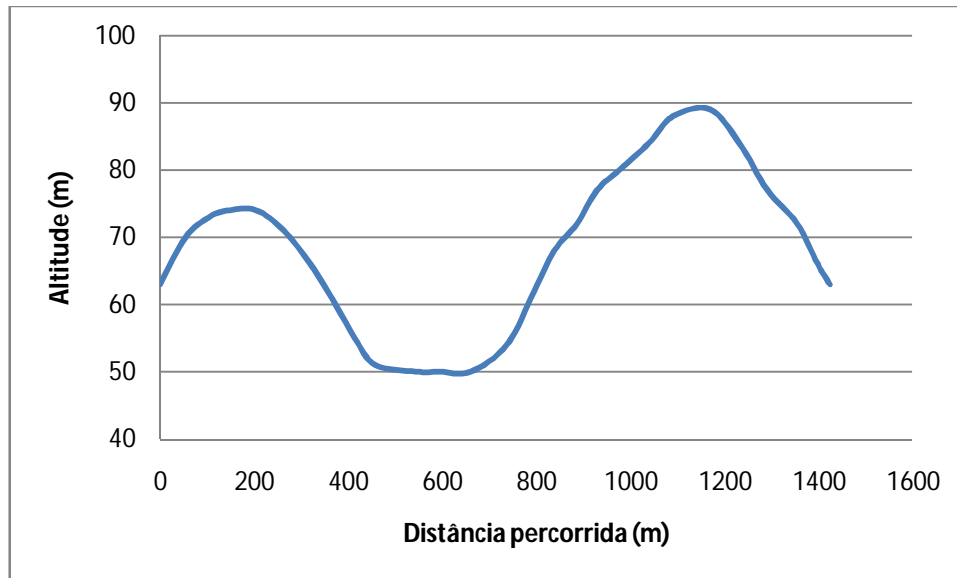
### 6.1 Introdução

No presente capítulo será efectuado um pré-estudo energético para um percurso efectuado por uma bicicleta eléctrica (BE), porque dentro do PE as pessoas não se podem movimentar com veículos que possuam motores de combustão interna. O estudo vai ser efectuado para as BE porque estas são o meio mais eficiente de locomoção humana porque necessitam de menos energia por quilómetro para se deslocar, necessitando as BE somente cerca de 5-15 Wh por quilómetro, enquanto que a pé necessita-se de 15-20 Wh por quilómetro e de comboio 30-40 Wh por quilómetro [63].

Neste capítulo será dimensionado o motor/gerador eléctrico que é necessário para a BE. Este motor/gerador deverá ter autonomia para percorrer o percurso seleccionado, sem necessitar de força humana, ou seja só por força de tracção eléctrica. Em seguida será efectuado uma simulação do balanço energético durante o percurso ou seja vai ser simulado quanta energia vai ser gasta pelo motor e quanta energia se pode recuperar pela frenagem regenerativa, considerando que o motor só funciona durante as subidas e que a frenagem regenerativa será efectuada durante as descidas para uma velocidade constante. Por fim será calculada qual a capacidade que deve ter cada componente do armazenamento de energia (bateria e banco de supercondensadores).

### 6.2 Cálculo da Potência do Motor/Gerador

Para o cálculo da potência do motor/gerador é necessário conhecer o percurso que a BE vai realizar. Na figura seguinte pode observar-se as características do percurso.



**Figura 46:** Percurso seleccionado

Pode observar-se que o percurso é bastante irregular com subidas e descidas, devido às duas colinas existentes no local onde vai ser construído o Parque de energia.

Com base no percurso seleccionado é possível calcular a inclinação ( $\beta$ ) em graus, obtendo-se ângulos com sinal negativo, tendo o significado que a etapa do percurso será num plano inclinado decrescente (descida), e ângulos positivos significado que é uma subida.

O motor/gerador deverá de ser dimensionado para o pior caso de inclinação ( $\beta$ ) que neste caso é para  $8,09^\circ$ .

Em seguida considerou-se que o motor impõe ao veículo:

- Uma velocidade de 10 km/h (2,78 m/s);
- Uma aceleração de  $0,5 \text{ m/s}^2$ .

Considerando também que o veículo tem:

- Massa da BE incluindo o utilizador 86,25 kg;
- Coeficiente de atrito de 0,008;
- Rendimento de transmissão de 90%;
- Uma área frontal de 0,88 m<sup>2</sup>;
- Coeficiente de arrasto de 1,1.

Assim aplicando a equação 3.23, obteve-se uma potência necessária para o motor de 500 W.

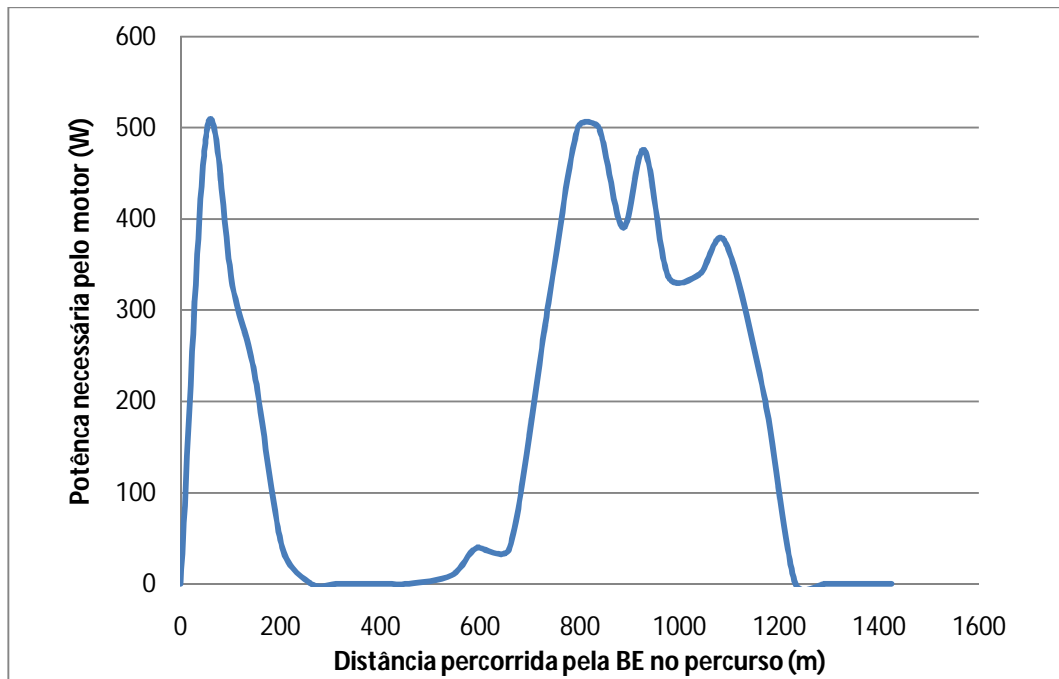
### 6.3 Cálculo da Energia absorvida pelo Motor Durante o Percurso

É importante saber qual a energia consumida pelo motor durante um percurso, para que se possa dimensionar qual deverá ser a capacidade do elemento que fornece essa energia ao motor. Para o cálculo da energia que o motor vai gastar ao longo do percurso, irá ser

necessário saber qual a potência que o motor necessita e o tempo para cada etapa do percurso.

Para o cálculo da potência que o motor precisa para cada etapa, é utilizada a equação 3.23.

Aplicando a equação 3.23, para as várias etapas com os vários ângulos, sendo só aplicados ângulos positivos (plano inclinado crescente) e nulos (plano horizontal). Considera-se que no plano inclinado decrescente o motor/gerador não irá funcionar como motor mas sim como gerador. Na seguinte figura observa-se os valores da potência necessária do motor para cada instante do percurso.



**Figura 47:** Valores da potência absorvida pelo motor em instante do percurso

Pode verificar-se na Figura 47 que a potência necessária para o motor é tanto maior quanto mais íngreme é a subida, tendo o valor de zero durante as descidas do percurso e valor de potências muito baixo durante o plano horizontal.

Em seguida é necessário saber o tempo que demora a percorrer cada etapa do percurso.

Para calcular o tempo que a bicicleta demora a percorrer cada etapa do percurso pode utilizar-se a seguinte equação:

$$\Delta X = +V_{veic} \times t_{pet} + \frac{1}{2} \times a \times t_{pet}^2 \quad (6.1)$$

Onde:

( $\Delta X$ ) - é o percurso de cada etapa (m);

$t_{pet}$  - tempo que a bicicleta demora a percorrer a etapa (s);

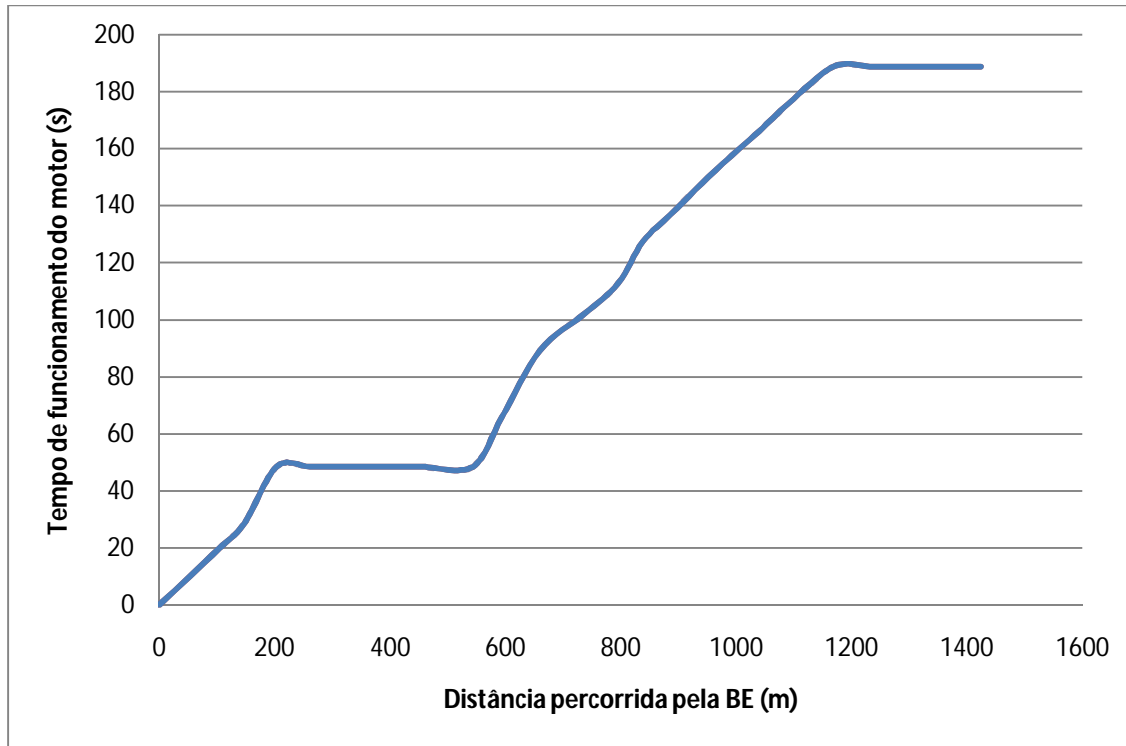
$a$  - aceleração do veículo ( $m/s^2$ );

$V_{veic}$  - Velocidade do veículo (m/s).

Usando o solver do excel, introduzindo a equação 6.1 como função objectivo e a célula com o t como a célula a alterar. Na função objectivo introduziu-se os valores de:

$$a = 0,5 \text{ (m/s}^2\text{)} \text{ e } V_{\text{veix}} = 2,78 \text{ (m/s)}.$$

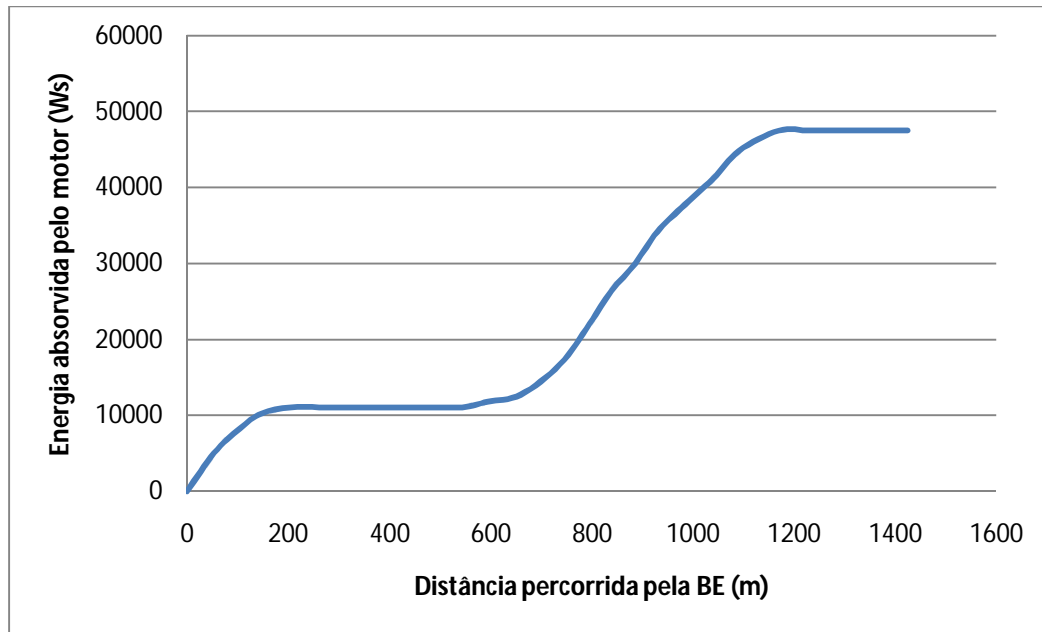
Colocando o solver a funcionar para resolver a equação 6.1 obteve-se:



**Figura 48:** Tempo necessário de funcionamento do motor para percorrer o percurso

Na Figura 48 está ilustrado o tempo que o motor necessita de funcionar para percorrer uma dada distância do percurso. É possível verificar que durante a descida o tempo não sobe porque o motor não está a funcionar.

Com o valor do tempo e da potência necessária do motor para cada etapa do percurso, é possível calcular a energia a partir da equação 3.27.



**Figura 49:** Valor da energia necessária pelo motor para percorrer o percurso

Na Figura 49 está ilustrada a energia necessária para o motor percorrer uma determinada distância do percurso.

A energia total que o motor necessita para percorrer o percurso uma vez é de 47484 Ws.

Com o procedimento efectuado anteriormente, estima-se a energia necessária para dar uma volta ao percurso.

Conhecida a energia gasta após 20 voltas ao percurso, calcula-se a capacidade da bateria. Foram assumidas 20 voltas por corresponder a um ciclo típico de utilização (29 km), isto para que a bateria possa ter uma corrente de carga suficiente para alimentar o motor eléctrico.

Para 20 voltas temos uma energia necessária para o motor eléctrico de 263,8 Wh.

Considerando uma tensão de 36 volt (poderia também ser uma tensão de 42 volt sendo estas duas tensões as mais usadas para motores a aplicar nas bicicletas eléctricas) para o motor, e com um rendimento da bateria de 90% (subcapítulo 3.3.2.3), calcula-se que a carga que a bateria necessita para 20 voltas ( $Carga\ Bateria = \frac{Energia}{Tensão_{motor} \times rendimento\ bateria}$ ) é de 8,14 Ah.

Para os valores calculados, existe um *Kit* apropriado, o qual se poderia escolher para a implementação na bicicleta. Este *kit* tem as seguintes características [64]:

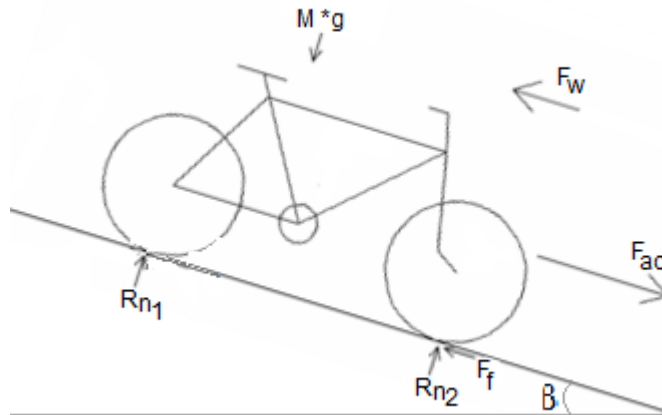
- Motor eléctrico de 500 W com uma tensão eléctrica de 36 V
- Bateria de lítio de 9,6 Ah com uma tensão eléctrica de descarga de 37 V.

## 6.4 Cálculo da Energia Recuperada pela Frenagem Regenerativa

A energia recuperada pela frenagem regenerativa é o ponto mais importante deste capítulo, porque o objectivo do Parque é a racionalização de energia, e as pessoas devem de ter a ideia da energia que é desperdiçada, e que pode ser recuperada.

Considera-se que o utilizador só vai efectuar a frenagem regenerativa durante a descida do percurso.

Para calcular a energia recuperada pela frenagem regenerativa, em primeiro lugar deve saber-se quais as forças que estão aplicadas a bicicleta durante a descida, na figura seguinte podem-se observar as forças aplicadas a bicicleta durante a descida.



**Figura 50:** Forças aplicadas a bicicleta eléctrica durante a descida

Para o cálculo da potência que se pode recuperar usa-se a equação 3.24, onde:

$$M \times a = F_{ac} - F_w - F_f \quad (6.2)$$

Onde:

M - é a massa do veículo (kg);

a - é a aceleração do veículo ( $m/s^2$ );

$F_{ac}$  - é a força de aceleração do veículo eléctrico (N);

$F_w$  - é a força de arrasto provocada pelo vento (N);

$F_f$  - é a força de atrito (N).

Sendo a força de aceleração da bicicleta eléctrica ( $F_{ac}$ ) a que provoca o movimento, e a força de atrito a força que se opõem ao movimento como se pode ver na Figura 50 (assumindo que o utilizador não está a pedalar).

Assim substituindo a equação 6.2 na equação 3.24 obtêm-se a seguinte equação:

$$P_{reg} = \eta_{reg} \times (F_{ac} - F_w - F_f) \times V_{veic} \quad (6.3)$$

Pode calcular-se a força de aceleração pela seguinte equação:

$$F_{ac} = M \times g \times \sin(\beta) \quad (6.4)$$

Onde:

M - é a massa do veículo eléctrico (kg);

g - é a aceleração da gravidade;

$\beta$  - é o ângulo entre o veículo eléctrico e a horizontal ao plano

Para os valores dos rendimentos vai-se assumir:

$\eta_G$  - 85%

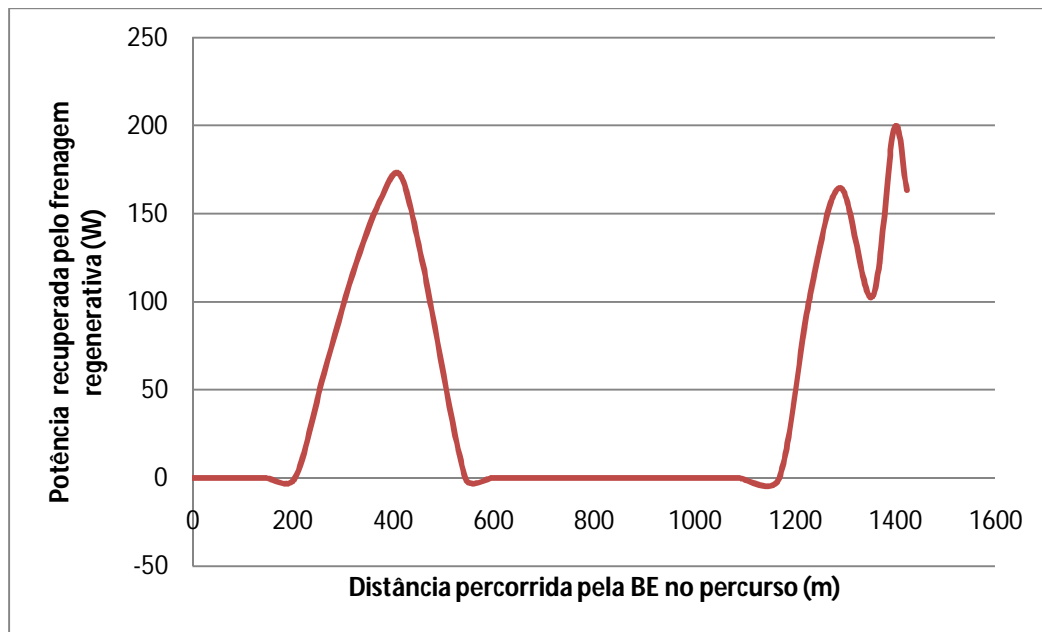
$\eta_{cont}$  - 90%

$\eta_{arm}$  - 90%

Assim utilizando a equação 3.25 obteve-se  $\eta_{reg}$  igual a 69%.

Utilizando a equação 3.18 é possível calcular o valor da força de atrito, com a equação 3.15 obtêm-se a força de arrasto do vento, com a equação 6.4 obtêm-se a força de aceleração e com a equação 6.3 obtêm-se o valor da potência da frenagem regenerativa. Assumindo uma velocidade constante da BE na descida de 10 km/h (2,78 m/s), uma aceleração de 0 m/s<sup>2</sup> para que a velocidade seja constante, com a massa da BE de 86,25 kg um coeficiente de atrito de 0,008, uma área frontal de 0,88 m (1,1 m de altura e 0,8 m de largura), com um coeficiente de arrasto de 1,1 como se pode ver na Figura 30, que aconselha a utilizar valor.

Utilizando as equações atrás referidas, alcançaram-se os valores que estão indicados na figura seguinte.



**Figura 51:** Cálculo da potência da frenagem regenerativa

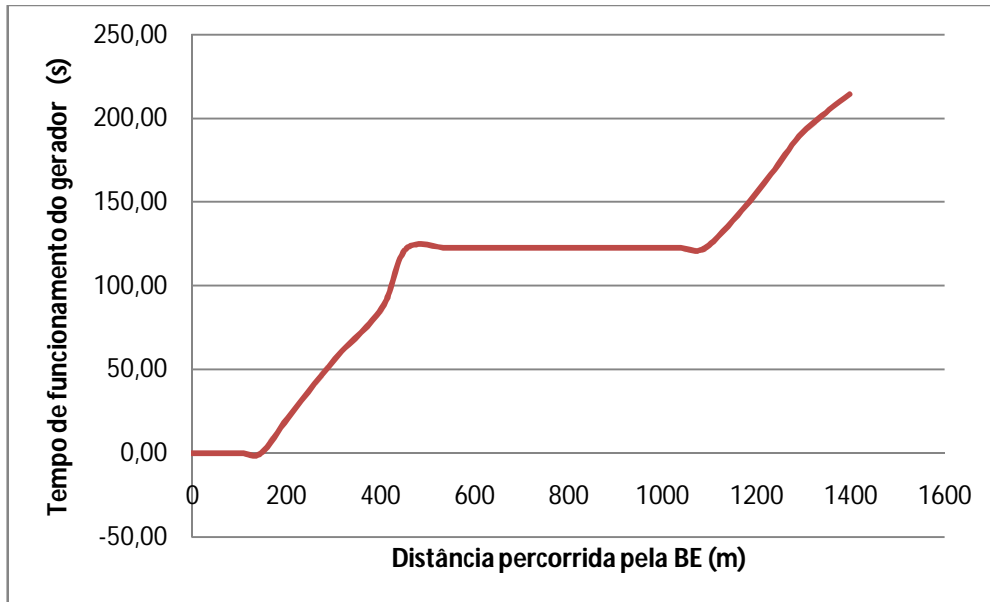
Na Figura 51 observa-se o oposto da Figura 47, isto porque o motor/gerador só vai funcionar de gerador quando a bicicleta eléctrica estiver a percorrer uma descida, logo o gerador vai efectuar a frenagem regenerativa, recuperando assim energia durante as descidas.

Verifica-se também que quanto mais acentuada é a descida maior vai ser a potência que o gerador produz.

Em seguida é necessário saber o tempo que demora a percorrer cada etapa do percurso. Para esse cálculo utiliza-se a equação 6.1. Com  $a = 0,0$  m/s<sup>2</sup> e  $V_{veic} = 2,78$  m/s. Vai-se

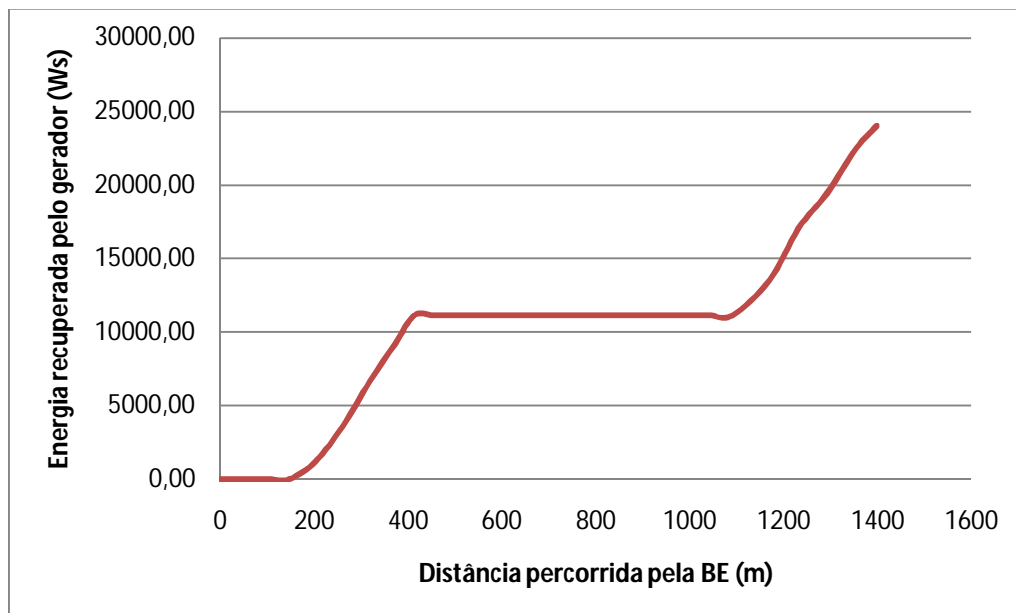
considerar que a frenagem regenerativa é efectuada a uma velocidade constante de 10 km/h, ou seja, a aceleração vai ser igual a zero.

Com o solver do excel usando como função objectivo a equação 6.1 com os valores substituídos, e como célula de alteração a célula do tempo, calcula-se os valores do tempo para cada etapa do percurso, obtendo-se os valores indicados na seguinte figura.



**Figura 52:** Tempo de frenagem regenerativa para a distância percorrida pela BE.

A Figura 52 ilustra o tempo de funcionamento do gerador em função da distância percorrida pela bicicleta, com esse tempo e com a potência da frenagem regenerativa para cada instante do percurso, é possível calcular a energia a partir da equação 3.27.



**Figura 53:** Cálculo da energia recuperada pela frenagem regenerativa no percurso

Na Figura 53 pode observar-se a potência que é recuperada pelo gerador durante as descidas do percurso.

Durante um percurso estima-se que a energia recuperada é de 24020,08 Ws (6,67 Wh).

Conclui-se assim que a recuperação de energia para uma bicicleta é um bom método para aplicar na BE. Com a recuperação de energia consegue-se obter para este caso uma energia recuperada de 50% da energia gasta pelo motor para efectuar o percurso.

Existe uma condicionante na recuperação de energia para armazenar numa bateria, que é a corrente de carga da bateria, a qual vai limitar a energia que se pode armazenar. A bateria do *kit* tem uma corrente de carga de 2 A para uma tensão de 42 V. Assim o máximo potência que pode armazenar é de 84 W. Na Figura 51, observa-se que a potência recuperada pelo motor/gerador (a funcionar como gerador) em certos pontos do percurso é superior à potência máxima que a bateria pode armazenar assim vai ser necessário a implantação de um banco de supercondensadores para poder armazenar o resto da energia recuperada.

Para o dimensionamento do banco de SCs, é necessário saber qual a quantidade de energia que vai ter de ser armazenar no SCs. Sabendo a energia máxima recuperada numa descida "completa", e a energia que a bateria consegue armazenar nessa mesma descida, subtraindo-as obtém-se o valor da energia que o banco de SCs necessita armazenar, essa diferença é de 5163 Ws.

Sendo a energia armazenada no banco SCs calculada pela seguinte equação:

$$E_{arm} = \frac{1}{2} \times C_{ap} \times U^2 \times \eta_{SCs} \quad (6.5)$$

Onde:

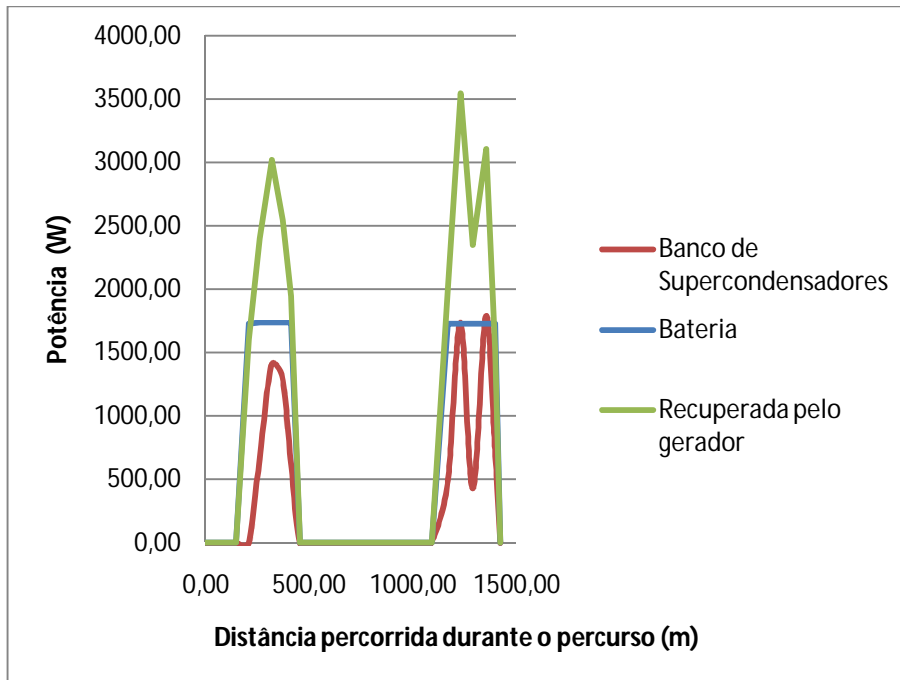
$E_{arm}$  - é a energia armazenada (Ws);

$C_{ap}$  - é a capacidade de armazenamento (F);

$\eta_{SCs}$  - é o rendimento do supercondensador (%);

U - é a tensão eléctrica (V).

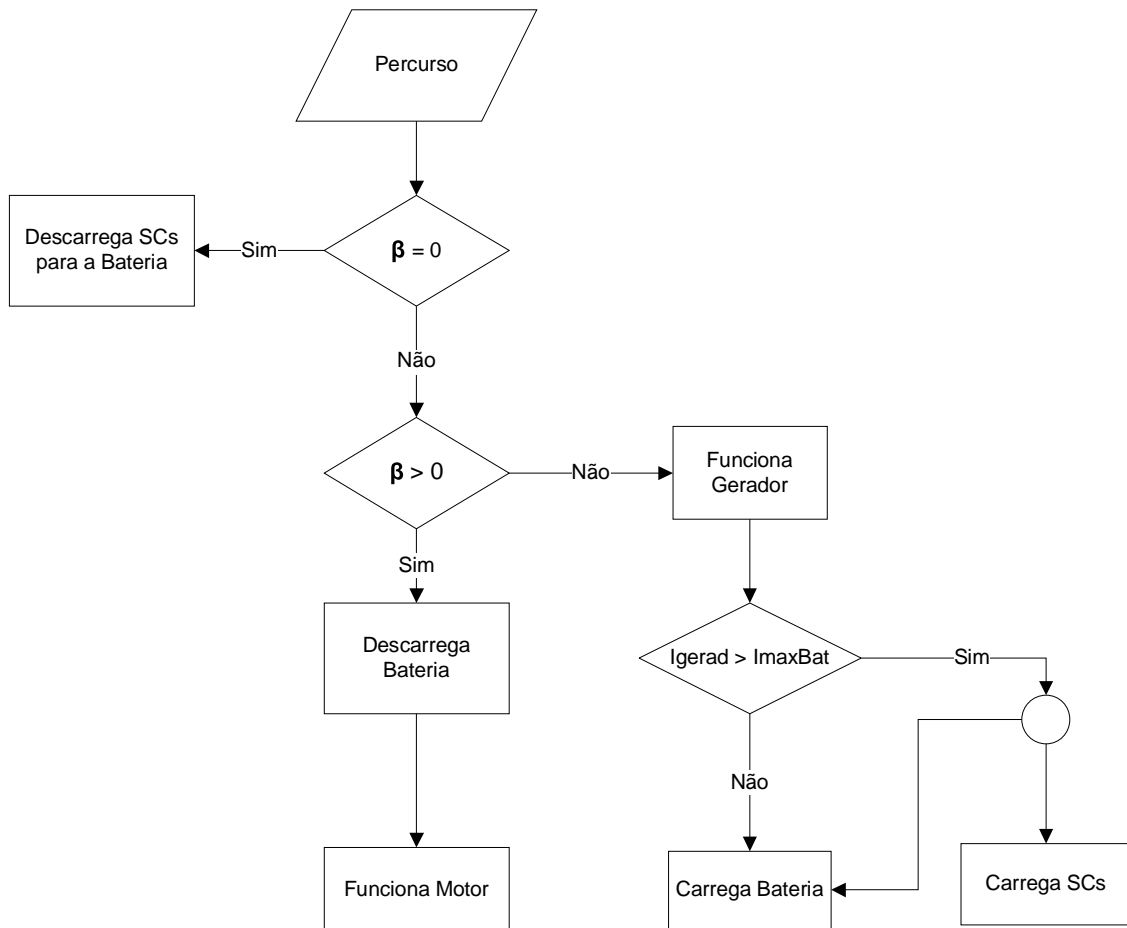
Admitindo que a tensão no banco de SCs é de 42 V, (igual a tensão de carga da bateria), a energia que tem armazenar é de 5162Ws e com um rendimento de 90%. Aplicando a equação 6.5, calcula-se que a capacidade de armazenamento que deve ter o banco de SCs é de 6,5 F.



**Figura 54:** Armazenamento da energia proveniente da frenagem regenerativa

Na Figura 54 está ilustrada os locais onde o motor/gerador funciona como gerador, e os valores da quantidade de energia armazenada na bateria e no banco de supercondensadores. Nesta figura verifica-se também em que local é que a frenagem produz mais energia e consequentemente o local onde o supercondensador armazena mais energia. Verifica-se também os locais onde é que a bateria está a carregar o seu limite máximo.

Na figura seguinte observa-se um possível funcionamento dos componentes principais que constituem a BE.



**Figura 55:** Diagrama de funcionamento dos componentes da BE

Na Figura 55 está representado o diagrama, de um possível funcionamento dos equipamentos principais da BE. O funcionamento dos componentes que constituem a BE tem que ter em conta a limitação da corrente de carga da bateria. Neste diagrama podemos observar que quando a inclinação ( $\beta$ ) é zero ou seja no plano horizontal, o banco de supercondensadores descarrega à sua energia para a bateria.

Quando a inclinação ( $\beta$ ) é maior que zero, ou seja, a bicicleta eléctrica está a subir então a bateria vai descarregar, para o motor funcionar fazendo assim com que a BE continue a percorrer o percurso.

Quando a inclinação ( $\beta$ ) é negativa, ou seja, a BE está numa descida o gerador funciona efectuando assim a frenagem regenerativa. Quando se está a efectuar a frenagem regenerativa é necessário ter em atenção a corrente que o gerador fornece ( $I_{gerad}$ ) para a bateria. No caso que a corrente do gerador ( $I_{gerad}$ ) é maior que a corrente máxima de carga da bateria ( $I_{maxBat}$ ), o gerador vai fornecer energia à bateria e também ao banco de supercondensadores para que seja possível armazenar a energia total produzida pela frenagem regenerativa.



# Capítulo 7

## Conclusões e Trabalhos Futuros

### 7.1 Conclusões Gerais

A partir dos estudos efectuados neste trabalho sobre as tecnologias a aplicar no Parque de energia podem-se retirar conclusões importantes.

No pré-estudo do FIWinG (*Floating Wind Generator*) pode verificar-se que a aplicação do concentrador é um método vantajoso para locais onde a velocidade média do vento seja baixa, na medida em que faz aumentar a velocidade do vento e consequentemente a eficiência da produção da turbina eólica que se encontra no seu interior. Conclui-se que o difusor que se encontra a seguir à turbina eólica é um elemento importante, na medida em vai igualar a velocidade na saída do FIWinG à velocidade do vento no exterior. Logo igualando as velocidades de vento vai diminuir a turbulência provocada pelo contacto dos mesmos. Com essa diminuição da turbulência, o vento flui livremente no interior do FIWinG diminuindo as perdas do sistema a passagem do vento.

A variação da altura do FIWinG é um factor importante como ilustra a Figura 39, o que possibilita alguma regulação da velocidade do vento que irá passar na TE, para que a mesma esteja a funcionar o maior tempo possível com o seu rendimento máximo. Como se pode concluir durante o estudo, é aconselhável que o FIWinG tenha a forma de um zeppelin e que possua asas, para que quando este se encontre suspenso no ar, não sofra deslocamentos consideráveis, devido a força de arrasto do vento.

Tendo o FIWinG as características descritas anteriormente, comparado energeticamente com um aerogerador convencional, para o local onde vai ser implementado o Parque, o FIWinG produz dez vezes mais energia, verificando-se assim ser uma boa tecnologia a implementar no Parque de Energia.

Para a dimensão projectada do FIWinG verifica-se ser uma boa forma de publicidade para o Parque de Energia, devido a sua dimensão, a qual foi necessária para colocar um volume de hélio suficiente para elevar o FIWinG.

No local da construção do Parque de Energia existem boas condições para a implementação de uma central mini-hídrica, pois é possível aproveitar o recurso hídrico de uma bacia hidrográfica de 24,4 km<sup>2</sup>. Assim a conversão da energia cinética da água em

energia eléctrica é uma exequível solução que contribui para a sustentabilidade do Parque de Energia. Com o estudo efectuado sobre esta tecnologia, verificou-se que a melhor solução para a mini hídrica seria a aplicação de uma turbina com uma potência de 284 kW.

Com os cálculos efectuados da produção anual de energia da central mini-hídrica, constata-se que seria uma mais-valia para a sustentabilidade do Parque aplicar este tipo de tecnologia, sendo esta bastante eficiente e com recurso abundante na zona onde vai ser construído o Parque de Energia.

Relativamente à recuperação de energia nos transportes, nomeadamente a frenagem regenerativa, pode concluir-se que para o percurso seleccionado, o motor/gerador a aplicar na bicicleta eléctrica deve ter uma potência de 500W, para que se possa efectuar um percurso sem a necessidade de tracção humana.

Relativamente aos dispositivos de armazenamento verificou-se que seria necessário não só uma bateria mas também um banco de supercondensadores para armazenar toda a energia que é possível recuperar pelo gerador.

Efectuando-se o balanço energético do percurso conclui-se que com a recuperação de energia seria possível recuperar cerca de 50% da energia gasta pelo motor durante o percurso.

Conclui-se que o Parque de Energia no município de Ponte da Barca, é um bom investimento pedagógico, isto porque irá permitir ao cidadão comum tomar contacto com diferentes forma de energia mais ecológicas e mais eficientes, logo subentende-se que a sustentabilidade é uma temática que não está longe da nossa realidade e que é possível alcançar.

## 7.2 Trabalhos Futuros

O trabalho que deveria ser feito no futuro, em relação ao *Floating Wind Generator* seria:

- O dimensionamento da estrutura rígida onde se vai fixar o tecido e os componentes que o constituem (pelo programa Autodesk Inventor Professional 2010 simulação da estrutura);
- Testes num programa de simulação de túnel de vento para verificar a sua viabilidade prática;
- O dimensionamento do armazenamento do ar comprimido em função da sua utilização;
- Sistema de controlo da altura com a velocidade do vento;
- Minimizar o peso do FIWinG, pela utilização de materiais mais inovadores;
- Dimensionamento do motor para recolher o FIWinG.

Em relação à central mini-hídrica seria importante efectuar um estudo dos impactos ambientais devido a sua construção, e um estudo económico para verificar se é viável a sua construção.

Quanto à recuperação de energia por frenagem regenerativa aplicada a bicicleta eléctrica seria necessário efectuar:

- O sistema de controlo entre o motor e os dispositivos de armazenamento de energia;
- O *display* onde será possível consultar instantaneamente o balanço energético até ao momento.

Para o Parque de Energia seria necessário o estudo de mais tecnologias inovadoras com características adequadas para o local onde vai ser implementado o Parque, nomeadamente tecnologia de conversão da energia das ondas.



# Anexo A

## Diagrama de *Moody*

O diagrama de *Moody* é a representação gráfica em escala duplamente logarítmica do factor de atrito em função de *Reynolds* e da rugosidade relativa de uma tubulação. Com base neste diagrama, é possível obter o valor da força de atrito numa tubulação conhecendo o valor da rugosidade da tubulação, do diâmetro da mesma e do número de *Reynolds*. O número de *Reynolds* permite avaliar o tipo de escoamento que existe no tubo e pode ainda indicar se o líquido flui de uma forma turbulenta ou laminar. Na Figura 56 está ilustrado o diagrama de *Moody* onde se pode retirar o valor da força de atrito no tubo.

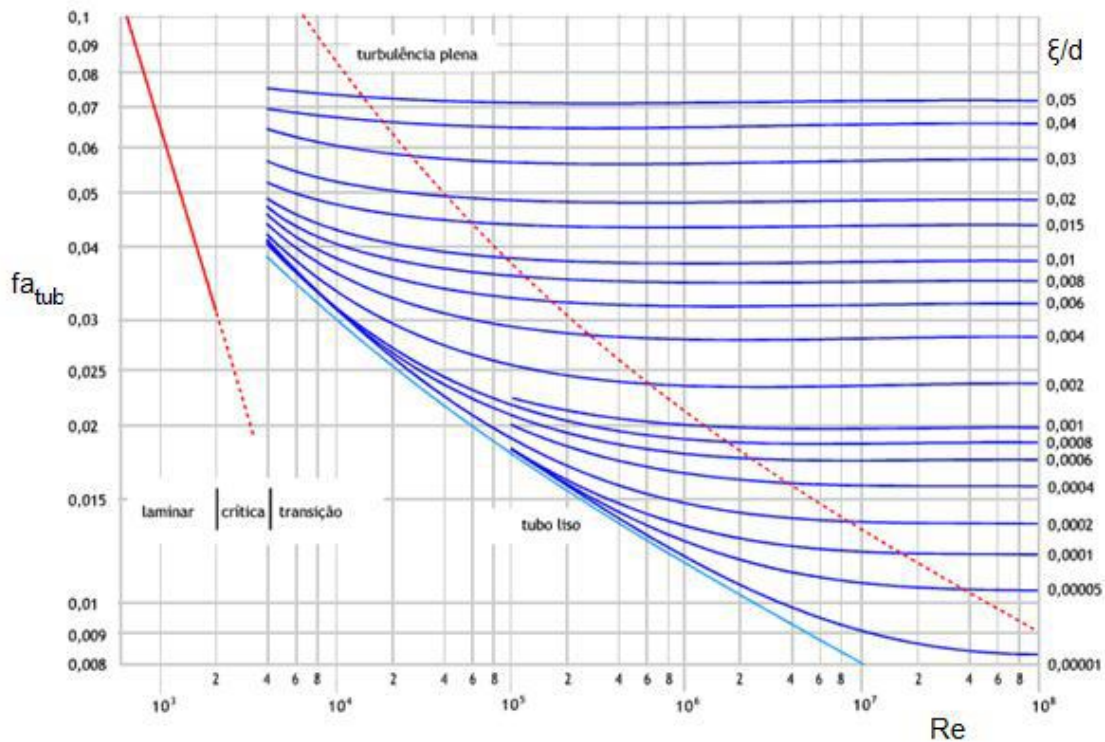


Figura 56: Diagrama de *Moody* (adaptado de [65])



## Referências

- [1] Pedro Varela, *Parque de Energia*, Engenheiros Associados, 2009.
- [2] Sheppard, D.G., *In Wind Turbine technology, fundamental concepts of wind turbine engineering*, D.A. Spera, Editor. 1994.
- [3] OLINO, *Renewable Energy*, Disponível em: <http://www.olino.org/us/articles/2009/04/02/wind-energy-the-sky-is-the-limit>, Consultado a 20 de Janeiro de 2010.
- [4] EWEA (2008) *annual report 2008*.
- [5] Erich Hau, *Wind Turbines in Fundamentals, Technologies Application, Economics*, Springer, pp. 67-102, 2006.
- [6] Sérgio Salvo Brito, *Energia Eólica Princípios e tecnologias*, Disponível em: [www.portal-energia.com](http://www.portal-energia.com), Consultado a 20 de Novembro de 2009.
- [7] Hermann-Josef Wagner, Jyotirmay Mathur, *Introduction to Wind Energy Systems, in Basics, Technology and Operation*, Springer, pp. 41-57, 2009.
- [8] Vaughn Nelson, *Wind Energy - Renewable Energy and the environment*, Taylor & Francis Group, pp. 75-100, 2009.
- [9] Toshio Matsushima, Shinya Takagi, Seiichi Muroyama, *Characteristics of a Highly efficient Propeller Type Small Wind Turbine With a Diffuser*, Elsevier. Ltd, 2005.
- [10] *Portal São Francisco*, Disponível em: <http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/ventos/ventos-3.php>, Consultado a 5 de Janeiro de 2010.
- [11] F. Martins, Guarnieri e Pereira, *O Aproveitamento da Energia Eólica*, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 2008.
- [12] Fernando Bianchi, Hernán Battista, Ricaro Mantz, *Wind Turbine Control Systems: principles, modelling and gain scheduling design*, Springer, pp. 1-30, 2006.
- [13] Cláudio Monteiro, *Recursos Eólicos*. Faculdade de Engenharia de Universidade do Porto, 2009.
- [14] Gary Johnson, *Wind Energy Systems*, K. Manhattan, 1994.
- [15] Troen, Erik Petersen, *European Wind Atlas*, Commission of the European Communities, 1989.
- [16] Orosa e Garcia-Bustelo. *Climate effects in low speed wind turbine's concentrators*. *Power Engineering, Energy and Electrical Drives, International Conference*, 2009.
- [17] Vasco de Brederode, *Fundamentos de Aerodinâmica Incompressível*, pp. 9-70, 1997.
- [18] Kevin Hall, Ken Sander, Stewart Wolpin. *Dvice live the futur*, Disponível em: <http://dvice.com/archives/2007/12/mars-is-the-mac.php>, Consultado a 10 de Janeiro de 2010.
- [19] *Inovação Tecnológica*, Disponível em <http://www.inovacaotecnologica.com.br>, Consultado a 10 de Janeiro de 2010.
- [20] Ricardo Dutra, *Energia Eólica Princípios e Tecnologia*, CEPE.
- [21] Hermann-Josef Wagner, Jyotirmay Mathur, *Introduction to Wind Energy Systems, in Basics, Technology and Operation*, Springer, pp. 41-57, 2009.

- [22] Rui Castro, *Energias Renováveis e Produção Descentralizada Introdução a Energia Eólica*. Universidade Técnica de Lisboa, 2007.
- [23] Redes Energética Nacional, *Potencial Hidroeléctrico Nacional*. Importância Sócio-Económica e Ambiental do Seu Desenvolvimento.
- [24] Ministério da Economia e da Inovação, *Energia e Alterações Climáticas*, 2007.
- [25] Fernando Gallano, Ernesto Veiga, Benjamin Pereira, *Manual de Pequena Hidraulica*, C. Penche, Instituto Nacional de Investigação Científica, 1998.
- [26] Rui Castro, *Energias Renováveis e Produção Descentralizada Introdução a Energia Mini-Hídrica*. Universidade Técnica de Lisboa, Março de 2008.
- [27] Helder Leite, *Mini-Hídricas*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [28] Manuel Guedes, *O alternador Síncrono Trifásico nos Pequenos Aproveitamento Hidroeléctricos*. Faculdade de Engenharia de Universidade do Porto, 1994.
- [29] Cláudio Monteiro, *Continuação de mini-hídricas e Energia das Ondas*. Faculdade de Engenharia de Universidade do Porto.
- [30] *Soluciones Energéticas S.A.*, Disponível em: [http://www.solener.com/novedad\\_e.html](http://www.solener.com/novedad_e.html), Consultado a 8 de Janeiro de 2010.
- [31] *Turbina Kaplan*, Disponível em: [http://ro.wikipedia.org/wiki/Turbin%C4%83\\_Kaplan](http://ro.wikipedia.org/wiki/Turbin%C4%83_Kaplan), Consultado a 13 de Janeiro de 2010.
- [32] Magureanu, R. Albu, *Optimal operation of Francis Small Hydro turbines with variable flow*. in *Industrial Electronics, IEEE International Symposium*, 2008.
- [33] Manuel Guedes, *O gerador de Indução Trifásico*. Faculdade de Engenharia de Universidade do Porto, 2007.
- [34] Ministério da Industria e Energia, *Decreto-Lei nº 189/88, 27/05/1988*.
- [35] Fred Schawartz, Rajani Pegallapati e Mohammad Shahidehpour, *Small Hydri as Green Power*, IEE, pp. 2-5, 2005.
- [36] Oliver Paish, Derwent Hydro e Duffield, *A Guide To UK Min-Hydro Developments*. British Hydropower Association, Janeiro 2005.
- [37] Helder Teixeira, *Caracterização da Produção de Centrais Mini-Hídricas*, in *Engenharia Electrotécnica e de Computadores*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [38] Cláudio Monteiro, *Mini-Hídricas*. Faculdade de Engenharia de Universidade do Porto.
- [39] *Organização Internacional de Construtores de Automóveis*, Disponível em: <http://oica.net/category/climate-change-and-co2/>, Consultado a 19 de Dezembro de 2010.
- [40] *Direcção Geral de Energia e Geologia*, Disponível em: <http://www.dgge.pt/upload/membro.id/imagens/i006924.jpg>, Consultado a 20 de Dezembro de 2010.
- [41] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Ali Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*, in *Fundamental, Theory and Design*, Taylor & Francis Group, Editor, pp. 411-433, 2010.
- [42] David Barton, Brian Shilton, *Brakind 2002 in From the Driver to the Road*, P.E. Publishing, pp. 175-211, 2002.
- [43] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Ali Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*, in *Fundamental, Theory and Design*, Taylor & Francis Group, pp. 19-300, 2010.
- [44] Bruce R. Muson, Donald Young, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, J.W. Sons, pp. 401-600, 2006.
- [45] To Anju, Anita and Aarti, *Electric Vehicle Battery Systems*, Butterworth-Heinemann, 2002.
- [46] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao e SebastienGay, *Characterization of Electric Motor Drives for Traction Applications*. p. 891-896.
- [47] C. Chan, Y. Wong, *The State of the Art of Electric Vehicles Technology*.
- [48] Carlos Sousa, *Veículos eléctricos*.
- [49] Allen Fuhs, *Hybrid Vehicles and the Future of Personal Transportation*, Taylor & Francis Group, 2009.
- [50] *Supercapacitor and Ultracapacitor New Energy Storage*, Disponível em: <http://www.supercapacitors.org/>, Consultado a 3 de Janeiro de 2010.

- [51] Neil Campbell, Sinisa Stankovic, Mike Graham, *Wind Energy for the Built Environment*, European Wind Energy Conference & Exhibition, 2001.
- [52] Wind Energy Market, Disponível em: <http://www.wind-energy-market.com/de/kleine-anlagen/einzelansicht/details/sp/sw2000/>, Consultado a 15 de Outubro de 2009.
- [53] Yunus A. Çengel, M.A.B., *Termodinâmica*, McGraw-Hill, pp. 843-886, 2001.
- [54] Paulo Abreu, *Automação industrial* Faculdade de Engenharia de Universidade do Porto ed. 2009.
- [55] Zeppelines, Disponível em: [http://www.publi-zeppelines.com/v\\_portal/apartados/pl\\_basica.asp?te=172](http://www.publi-zeppelines.com/v_portal/apartados/pl_basica.asp?te=172), Consultado a 22 de Outubro de 2009.
- [56] Universidade da Madeira, *Princípio de Arquimedes*. 2009.
- [57] NASA, Disponível em: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/lifteq.html>, consultado a 10 de Janeiro de 2010
- [58] Comercial Ari LTDA, Disponível em: <http://www.comercialari.com.br/index.asp>, consultado a 20 de Outubro de 2010
- [59] Paul Lindeberg, *Compressed Air Manual*, Atlas Copco Compressor AB, pp. 70-109, 1998.
- [60] Erich Hau, *Wind Turbines in Fundamentals, Technologies Application, Economics*, Springer, pp. 319-355, 2006.
- [61] Aloísio Sousa, *Solver (Excel) Manual de Referência*, Departamento de Computação Universidade Federal de Ouro Preto, 2004.
- [62] Carnicer Royo e Mainar Hasta, *Bombas Centrífugas*, T. Paraninfo, 1996.
- [63] Justin Lemire *The Energy Cost of Electric and Human Powered Bicycles*, 2004.
- [64] ebikes. *Specifications and Installation Manual*. Disponível em: [http://ebikes.ca/store/store\\_ezee.php](http://ebikes.ca/store/store_ezee.php), Consultado a 2 de Dezembro de 2009.
- [65] *Diagrama de Moody*, Disponível em: [http://www.mspc.eng.br/fldetc/fluid\\_0550.shtml](http://www.mspc.eng.br/fldetc/fluid_0550.shtml), Consultado a 10 de Novembro de 2010.